

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І
НАУКИ УКРАЇНИ**

**Державний вищий
навчальний заклад
«ПРИАЗОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
(ДВНЗ «ПДТУ»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***ВІСНИК
ПРИАЗОВСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ***

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

**Видається 2 рази на рік
з 1995 року**

Випуск 46

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2023

**MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE**

**State higher
educational institution
«PRIAZOVSKYI STATE
TECHNICAL UNIVERSITY»
(SHEI «PSTU»)**

**p-ISSN 2225-6733
e-ISSN 2519-271X**

***REPORTER
OF THE PRIAZOVSKYI
STATE
TECHNICAL
UNIVERSITY***

**COLLECTION OF SCIENTIFIC
WORKS**

**Published twice a year,
since 1995**

Issue 46

Section: Technical sciences

Dnipro, 2023

УДК 06.055.2

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Вип. 46. – Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2023. – 166 с. – (Технічні науки). – Режим доступу: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023>.

У збірнику публікуються результати теоретичних та експериментальних досліджень вчених вищого навчального закладу та провідних спеціалістів у галузі технічних наук, показаний їхній вклад у розвиток науки та сучасних технологій. Публікації видання зберігаються на офіційному сайті Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського.

Головний редактор

Іщенко Анатолій Олексійович *д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»*

Відповідальний секретар

Савенко Ольга Сергіївна *канд. техн. наук, ДВНЗ «ПДТУ»*

Редакційна колегія

<i>Angeliki G. Lekatou</i>	<i>Dr., PhD, University of Ioannina (UOI), Greece</i>
<i>Hossam Ahmed Mohamed Halfa</i>	<i>Dr., PhD, Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, Egypt</i>
<i>Sergey Edward Lyshevski</i>	<i>Dr., PhD, Rochester Institute of Technology, New York, USA</i>
<i>Dmytro Makarchuk</i>	<i>PhD, Solent University, Southampton, UK</i>
<i>Oleksandr Vrublevskiy</i>	<i>Dr., PhD, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Olsztyn, Poland</i>
<i>Азархов Олександр Юрійович</i>	<i>д-р мед. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»</i>
<i>Белоконь Каріна Володимирівна</i>	<i>канд. техн. наук, доц., Запорізька державна інженерна академія</i>
<i>Білоусов Євген Вікторович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., Херсонська державна морська академія</i>
<i>Булгаков Микола Петрович</i>	<i>канд. техн. наук, доц., Одеський національний морський університет</i>
<i>Бялобржеський Олексій Володимирович</i>	<i>канд. техн. наук, доц., КрНУ ім. Михайла Остроградського</i>
<i>Володарець Микита Віталійович</i>	<i>канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»</i>
<i>Головань Андрій Ігорович</i>	<i>канд. техн. наук, доц., Одеський національний морський університет</i>
<i>Грицук Ігор Валерійович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., Херсонська державна морська академія</i>
<i>Губинський Михайло Володимирович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., Національна металургійна академія України</i>
<i>Єфременко Василь Георгійович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»</i>
<i>Кириллова Олена Вікторівна</i>	<i>д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет</i>
<i>Клецька Ольга Віталіївна</i>	<i>канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»</i>
<i>Ковалевська Олена Сергіївна</i>	<i>канд. техн. наук, доц., Донбаська державна машинобудівна академія</i>
<i>Кухар Володимир Валентинович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., «Технічний університет «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»</i>
<i>Лук'яненко Анна Олегівна</i>	<i>канд. техн. наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України</i>
<i>Мазур Владислав Олександрович</i>	<i>канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»</i>
<i>Онищенко Олег Анатолійович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., НУ «Одеська морська академія»</i>
<i>Парфененко Юлія Вікторівна</i>	<i>канд. техн. наук, доц., Сумський державний університет</i>
<i>Петренко Тетяна Григорівна</i>	<i>канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ</i>
<i>Плахтій Олександр Андрійович</i>	<i>канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ</i>
<i>Погорлецький Дмитро Сергійович</i>	<i>канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія</i>
<i>Проніна Ольга Ігорівна</i>	<i>канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»</i>
<i>Прус В'ячеслав В'ячеславович</i>	<i>д-р техн. наук, доц., КрНУ ім. Михайла Остроградського</i>
<i>П'ятикоп Олена Євгенівна</i>	<i>канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»</i>
<i>Саєнко Юрій Леонідович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»</i>
<i>Симоненко Роман Вікторович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., Національний транспортний університет</i>
<i>Тарандушка Людмила Анатоліївна</i>	<i>д-р техн. наук, проф., Черкаський державний технологічний університет</i>
<i>Ткачов Віктор Васильович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка»</i>
<i>Худяков Ігор Валентинович</i>	<i>канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія</i>
<i>Чабак Юлія Геннадіївна</i>	<i>канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»</i>
<i>Чеберячко Юрій Іванович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка»</i>
<i>Чупринов Євген Валерійович</i>	<i>канд. техн. наук, доц., Державний університет економіки і технологій</i>
<i>Шумило Олександр Миколайович</i>	<i>д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет</i>

Адреса: ДВНЗ «ПДТУ», проспект Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна.

Address: PSTU, Dmytro Yavornytskyi Avenue 19, Dnipro, 49005, Ukraine.

Телефон редакції: (098) 480-24-03.

E-mail: yestnik.pgту@gmail.com (для надсилання статей).

Зареєстрований Міністерством Юстиції України 21.06.2011 р., Свідоцтво КВ № 17950 – 6800 ПР. Збірник входить до переліку наукових фахових видань (категорія «Б»), в якому можуть публікуватися основні результати дисертаційних робіт, згідно з Наказами Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020, № 886 від 02.07.2020. Видається два рази на рік.

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 13 від 29.06.2023 р.

ISSN 2225-6733 (Print), ISSN 2519-271X (Online)

© ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ»), 2023

ЗМІСТ

CONTENTS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**

- | | | |
|--|----|---|
| <p>Ліп'яніна-Гончаренко Х.В., Кім І.Р.
Метод удосконалення рекламних текстів на основі генеративних моделей</p> | 6 | <p>Kh.V. Lipianina-Honcharenko, I.R. Kit
The method of improving advertising texts based on the use of generative models</p> |
| <p>Іванов Д.Є., Алексеєнко В.В., Ярмоленко Т.А.
Особливості взаємозалежності технологій Великих даних (Big Data) та Інтернету речей (Internet of Things)</p> | 13 | <p>D. Ivanov, V. Alekseienco, T. Yarmolenko
Features of the interdependence of Big Data and Internet of Things technologies</p> |
| <p>Марченко І.Ф., Балалаєва О.Ю., Сергієнко А.В., Кіор А.С.
Розробка додатку для моніторингу психологічного здоров'я людини на основі методів когнітивно-поведінкової терапії з використанням мови Python та бібліотеки Tkinter</p> | 27 | <p>I. Marchenko, O. Balalaieva, A. Serhiienco, O. Kior
Development of an application for monitoring human mental health based on cognitive-behavioral therapy methods using Python and library Tkinter</p> |
| <p>Марченко І.Ф., Балалаєва О.Ю., Сергієнко А.В., Таразанов М.О.
Розробка веборієнтованого додатку для організації роботи станції технічного обслуговування легкових автомобілів</p> | 36 | <p>I. Marchenko, O. Balalaieva, A. Serhiienco, M. Tarazanov
Development of a web-based application for organizing the operation of a car service station</p> |

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

APPLIED MECHANICS

- | | | |
|---|----|--|
| <p>Карпенко Т.М., Музика І.М., Шишкін В.В.
Про силовий розрахунок захватних механізмів і затискачів за допомогою «золотого» правила механіки</p> | 45 | <p>T.M. Karpenko, I.M. Muzyka, V.V. Shishkin
On the force calculation of capture mechanisms and clamps using the «golden» rule of mechanics</p> |
|---|----|--|

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTORIAL ENGINEERING

- | | | |
|--|----|---|
| <p>Іщенко А.О., Рассохін Д.О., Носовська О.В.
Відновлення прокатного обладнання за допомогою композитних матеріалів</p> | 55 | <p>A.O. Ishchenko, D.O. Rassokhin, O.V. Nosovska
Restoration of rolled equipment using composite materials</p> |
| <p>Суглобов В.В., Ткачук К.В.
Вдосконалення механізації портових перевантажувальних комплексів</p> | 62 | <p>V.V. Suglobov, K.V. Tkachuk
Improving the mechanism of port handling complexes</p> |

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

- Стоянов О.М., Нізяєв К.Г., Малій Х.В., Кухар В.В.**
Застосування вогнетривких матеріалів для сталерозливного ковша
- О.М. Stoianov, K.H. Niziaev, Kh.V. Malii, V.V. Kukhar**
Application of refractory materials for steel ladles
- Кривенко В.В., Чупринов Є.В., Олійник Т.А., Харітонов В.М., Скляр Л.В.**
Дослідження технологічних властивостей проби ефіопської залізної руди аравійсько-нубійського щита. Частина 2. Мікроскопічний аналіз проб руди +40,0+5,0 мм
- V.V. Krivenko, E.V. Chuprinov, T.A. Oliinyk, V.M. Haritonov, L.V. Skliar**
Study of technological properties of the sample ethiopian iron ore of the arabian-nubian shield. Part 2. Microscopic analysis of ore samples with a thickness of +40.0+5.0 mm
- Руських В.П., Хавалиць Ю.В.**
Про перехід на водневу металургію
- V.P. Russkikh, Yu.V. Khavalits**
On transition to hydrogen metallurgy

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

- Рой С.В., Качан А.В., Тихонов А.С., Якунін Д.І., Рябов Є.С.**
Застосування тягового електроприводу при модернізації тепловозу ТГМ6
- S.V. Roi, A.V. Kachan, A.S. Tykhonov, D.I. Yakunin, Ye.S. Riabov**
Application of electric traction drive for the modernization of locomotives with hydraulic power transmission
- Постіл А.О., Бялобржеський О.В.**
Математична модель асинхронного генератора з фазним ротором для дослідження режимів генерації з несиметрією електричних параметрів машини
- A.O. Postil, O.V. Bialobrzheskyi**
Double feed inductor generator mathematical model for studying generation modes with unbalance of electrical machine parameters

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

RIVER AND SEA TRANSPORT

- Худяков І.В., Грицук І.В., Погорлецький Д.С., Черненко В.В., Поліщук О.В.**
Особливості використання датчика концентрації заліза у маслі для безперервного моніторингу технічного стану суднового дизельного двигуна
- I.V. Khudiakov, I.V. Gritsuk, D.S. Pohorletsy, V.V. Chernenko, A.V. Polishuk**
Use of iron in oil concentration sensor for continuous monitoring of marine diesel engine technical condition
- Погорлецький Д.С., Грицук І.В., Худяков І.В., Черненко В.В., Поліщук О.В.**
Особливості протидії низькотемпературній корозії гільзи циліндрів суднових малооборотних двигунів
- D.S. Pohorletsy, I.V. Gritsuk, I.V. Khudiakov, V.V. Chernenko, A.V. Polishuk**
Features of low-temperature corrosion protection of cylinder sleeves of ship low-speed engines

Дубинець О.І.

Розробка пропозицій щодо формалізації процесу фільтрації навігаційної інформації підводного робота на малих глибинах

130

O. Dubynets

Development of proposals for formalising the process of filtering navigation information of an underwater robot at shallow depths

Левченко О.В., Боріна М.В.

Удосконалення методу управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом

137

O.V. Levchenko, M.V. Borina

Improving the method of controlling the search for surface and underwater objects by a hybrid robotic complex

Головань А.І.

Формування цифрових стратегій для вирішення задач підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден

149

A.I. Golovan

Formation of digital strategies for solving problems of increasing the efficiency of cargo ship maintenance systems

Маранов О.В.

Метод моніторингу та підвищення характеристик точності суднового супутникового навігаційного обладнання

158

O.V. Maranov

Method for monitoring and improving the accuracy characteristics of shipboard satellite navigation equipment

ДО УВАГИ АВТОРІВ

166

INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

122 КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.02

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288087

© Ліп'яніна-Гончаренко Х.В.¹, Кіт І.Р.²

МЕТОД УДОСКОНАЛЕННЯ РЕКЛАМНИХ ТЕКСТІВ НА ОСНОВІ ГЕНЕРАТИВНИХ МОДЕЛЕЙ

Стаття присвячена розробці нового методу удосконалення рекламних текстів на основі використання генеративних моделей. Рекламний контент відіграє важливу роль в сучасному маркетингу, адже він сприяє взаємодії бренду з аудиторією та залученню нових клієнтів. Проте створення ефективного рекламного контенту – це часто виклик. Генеративні моделі відкривають нові можливості для створення рекламних текстів. Вони можуть використовуватися для автоматизації процесу створення контенту, забезпечуючи при цьому високий рівень оригінальності та творчості. Зокрема, ця стаття фокусується на використанні моделей серії GPT для генерування рекламних текстів. Першою задачею в рамках цього дослідження є вивчення теоретичних основ генеративних моделей та їх можливостей для створення тексту. Автори проводять детальний аналіз основних принципів роботи цих моделей, а також їх потенційного використання в контексті рекламного тексту. Далі, в статті описується метод збору та підготовки вхідних даних для навчання генеративних моделей. Оскільки якість вихідних текстів сильно залежить від якості вхідних даних, цей етап важливий для успішного застосування генеративних моделей. На наступному етапі автори розробляють алгоритм для навчання генеративної моделі на основі зібраних даних, для досягнення найкращих результатів. У цій статті представлений підхід є значним внеском в розробку нових методів удосконалення рекламних текстів. Він має великий потенціал для застосування в сфері маркетингу, де потрібно швидко та ефективно генерувати великі об'єми контенту. Водночас, результати дослідження можуть бути корисними для подальших наукових досліджень в цій області.

Ключові слова: генеративні моделі, удосконалення рекламних текстів, моделі серії GPT, автоматизація створення контенту, маркетинг в соціальних мережах.

Kh.V. Lipianina-Honcharenko, I.R. Kit. The method of improving advertising texts based on the use of generative models. The article is dedicated to the development of a new method of improvement advertising texts based on the use of generative models. Advertising content plays a crucial role in modern marketing, as it fosters a brand's interaction with the audience and attracts new customers. However, creating effective advertising content often presents a challenge. Generative models open up new opportunities for creating advertising texts. They can be used to automate the process of content creation, providing a high level of originality and creativity. Specifically, this article focuses on the use of GPT series models for generating advertising texts. The first task within this research is to study the theoretical basis of generative models and their capabilities for text creation. The authors conduct a detailed analysis of the main principles of these models' operation, as well as their potential use in the context of advertising text. Further, the article describes a method of collecting and preparing input data for training generative models. Since the

¹ канд. техн. наук, доцент, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, ORCID: 0000-0002-2441-6292, kh.lipianina@wunu.edu.ua

² викладач, Західноукраїнський національний університет, м. Тернопіль, ORCID: 0000-0002-4526-0020, i.kit@wunu.edu.ua

quality of output texts heavily depends on the quality of input data, this stage is important for the successful application of generative models. Next, the authors develop an algorithm for training the generative model based on the collected data. They describe the process of selecting optimal hyperparameters for the model, which is vital to achieve the best results. The approach presented in this article is a significant contribution to developing new methods for optimizing advertising texts. It has considerable potential for use in the marketing sphere, where there is a need to quickly and effectively generate large volumes of content. At the same time, the research results may be useful for further scientific studies in this field.

Key words: *generative models, improvement of advertising texts, GPT series models, content creation automation, social media marketing.*

Постановка проблеми. Постійне зростання використання соціальних медіа для маркетингових цілей призводить до збільшення конкуренції між брендами за увагу користувачів. У цьому контексті, ефективність рекламних текстів в соціальних мережах стає ключовим фактором успіху. Однак створення ефективних рекламних текстів – це складний процес, який вимагає глибоких знань маркетингу, психології споживача, мови, а також творчості.

Водночас, з появою потужних генеративних моделей, таких як GPT-4, з'явилася можливість автоматизувати та оптимізувати процес створення рекламних текстів. Однак, як використати ці моделі для максимально ефективного генерування рекламних текстів, є проблемою, що вимагає дослідження.

Таким чином, основна проблема, яку це дослідження намагається вирішити, полягає в тому, як використовувати генеративні моделі для удосконалення створення рекламних текстів в соціальних мережах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз попередніх досліджень показує, що генеративні моделі вже використовуються для створення тексту у різних сферах: від графічного дизайну до синтезу мови. Однак, використання цих моделей для удосконалення рекламних текстів є новим напрямком дослідження.

Ряд джерел [1-4] надають огляд різних аспектів використання моделей штучного інтелекту, заснованих на GPT. Лунд та Ванг [1] розглядають потенційний вплив ChatGPT на академічний світ і бібліотеки, враховуючи покращення пошуку інформації та контенту, а також етичні аспекти. Робота авторів Bubeck et al. [2] аналізує експерименти з GPT-4 і висуває припущення про її загальний інтелект, здатний вирішувати різноманітні завдання без спеціальних вказівок. Zhang et al. [3] пропонують огляд генеративного штучного інтелекту, наголошуючи на різноманітних застосуваннях та потенційних обмеженнях, у тому числі для ChatGPT. Робота Lecler et al. [4] підкреслює можливості застосування GPT-моделей в радіології для покращення діагностики та ефективності практики. Усі ці джерела обговорюють різні аспекти використання GPT-підходів у відповідних галузях та наголошують на перспективах та викликах впровадження цих технологій.

У дослідженні Wang et al. [5] пропонується модель VGAN для генерації реалістичних текстів. Проте, її основне застосування – генерування текстів у загальному сенсі, не в контексті рекламних текстів.

Li et al. [6] розробили модель CS-GAN для генерування текстів категорій, але цей підхід важко застосувати для рекламних текстів, що вимагають специфічних властивостей.

Жен і ін. [7] використовують генеративні моделі для створення графічних макетів, але цей підхід має обмежений потенціал для удосконалення текстів.

Samanta et al. [8] фокусуються на кодо-змінному тексті, що не повністю корисно в контексті рекламних текстів.

Наостанок, Li et al. [9] пропонують StyleTTS для генерування тексту до мовлення, що також не можна безпосередньо застосувати до рекламних текстів.

У порівнянні з існуючими дослідженнями, метод удосконалення рекламних текстів на основі генеративних моделей зосереджується на використанні генеративних моделей для створення більш ефективних рекламних текстів. Це робить наше дослідження актуальним, оскільки рекламні кампанії в соціальних медіа стають все більш важливими для бізнесу.

Метою даної статті є розробка та детальний опис методу удосконалення рекламних текстів за допомогою генеративних моделей, особливо моделей серії GPT. Метод має на меті автоматизувати процес створення рекламних текстів і збільшити їх ефективність в соціальних мережах.

Задачі статті:

- вивчення теоретичних основ генеративних моделей і їх можливостей для створення тексту;
- розробка методу збору та підготовки вхідних даних для навчання генеративних моделей;
- розробка алгоритму для навчання генеративної моделі на основі зібраних даних.

Узагальнюючи, стаття спрямована на розробку нового підходу до автоматизації та удосконалення створення рекламних текстів з використанням сучасних генеративних моделей. Це передбачає дослідження теоретичних засад цих моделей, створення ефективного процесу підготовки даних для навчання, а також розробку алгоритму навчання, що дозволяє використовувати потужність цих моделей для генерування високоякісних рекламних текстів.

Виклад основного матеріалу. Удосконалення рекламних текстів за допомогою генеративних моделей є складним процесом, що включає кілька кроків. Починаючи зі збору даних і їх підготовки, до навчання моделі і генерування нових текстів, цей процес вимагає експериментів та налаштування для досягнення оптимальних результатів. Ітеративний підхід дозволяє постійно вдосконалювати якість рекламних текстів, враховуючи результати тестування і змінюючи стратегію. Необхідна ретельна робота з даними і моделлю, щоб створити привабливі та ефективні рекламні повідомлення.

Удосконалення рекламних текстів за допомогою генеративних моделей може бути виконана в кілька етапів та представлено алгоритмом (рис. 1):

Етап 1. Збір даних: Зберіть велику кількість рекламних текстів з різних джерел, які ви вважаєте успішними [10, 11]. Успіх можна вимірювати за допомогою метрик, таких як кількість переглядів, взаємодій (лайки, коментарі, репости) або конверсій (переходів по посиланню, покупок, тощо).

Етап 2. Підготовка даних: Проведіть очищення та токенизацію даних. Очищення включає видалення небажаних елементів, таких як хештеги, URL, некоректне форматування, тощо. Токенизація включає перетворення текстів на послідовності токенів, з якими може працювати модель.

Етап 3. Навчання моделі: Натренуйте генеративну модель (наприклад, GPT-4) на цих даних. Модель має навчитися структурі мови та контексту рекламних текстів, вивчаючи згенеровані вхідні дані.

Етап 4. Генерування тексту: Використайте натреновану модель для генерування нових рекламних текстів. Ви можете вводити ключові слова або фрази, щоб керувати темою або напрямком згенерованого тексту.

Етап 5. Удосконалення: Застосуйте відповідні техніки, щоб удосконалити згенеровані тексти. Це може включати A/B тестування, де різні версії текстів порівнюються за їх здатністю досягти певних метрик (наприклад, клікабельність), та додаткове налаштування моделі з урахуванням отриманих результатів.

Етап 6. Ітерація: Повторюйте цей процес, щоб постійно вдосконалювати якість ваших рекламних текстів. Для цього ви можете збирати нові дані, налаштовувати модель або змінювати вхідні ключові слова.

Алгоритм (див. рис. 1) починається зі збору даних, де визначаються критерії та збираються тексти. Потім проводиться підготовка даних, видаляючи елементи та проводячи токенизацію. Наступний крок – навчання моделі, використовуючи такі моделі, як GPT-4, і проводячи епохи навчання. Після цього генерується текст, вибираючи ключові слова для генерування текстів. Удосконалення включає застосування A/B тестування та коригування моделі. Нарешті, проводиться ітерація процесу генерування, повторюючи кроки для подальшого вдосконалення моделі.

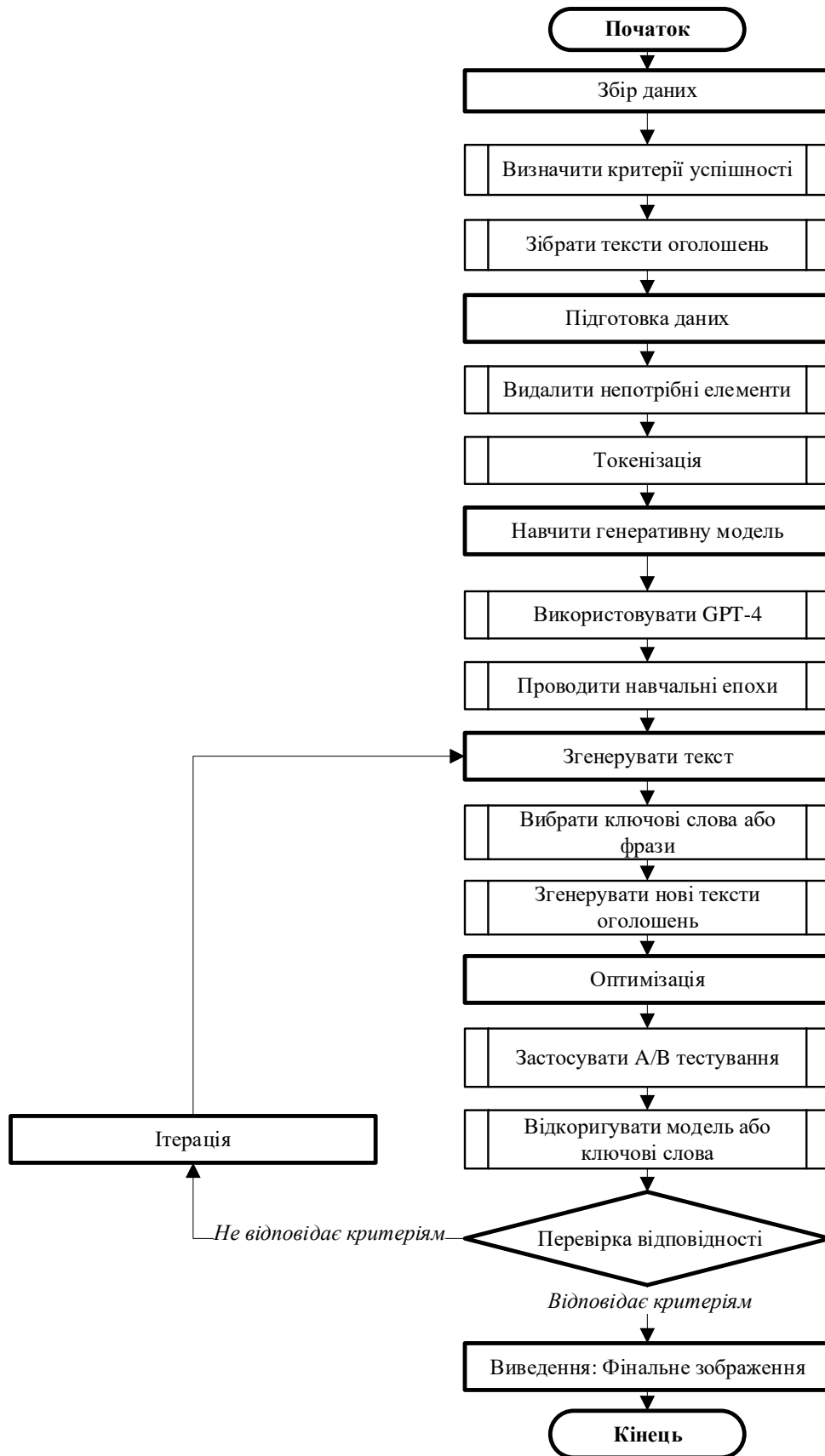


Рис. 1 – Алгоритм удосконалення рекламних текстів на основі генеративної моделі

Реалізація.

Для реалізації розробленого алгоритму (рис. 1) удосконалення рекламних текстів на основі генеративних моделей вибрано безкоштовну мову програмування Python та відкриті бібліотеки, такі як LangChain, OpenAI, Streamlit та FAISS. LangChain бібліотека потрібна для зв'язку мовної моделі GPT-3.5 з нашими даними. OpenAI в свою чергу використовується для перетворення частини CSV-Файлу на вектори. Потужна бібліотека FAISS використовується для створення векторного сховища, яке зберігає векторні представлення CSV-даних. І бібліотека Streamlit надає інструменти для створення користувацького інтерфейсу для чат-бота. Вона дозволяє користувачам вводити та відправляти свої запитання до чат-бота.

Далі продемонструємо коротко кроки роботи нашого чат-бота (рис. 2). Спершу користувач вводить ключ API OpenAI, після чого завантажує CSV-файл, на основі якого буде базуватися чат-бот. Якщо користувач завантажив CSV-файл, він обробляється за допомогою класу CSVLoader з LangChain. CSV-файл розбивається на унікальні рядки.

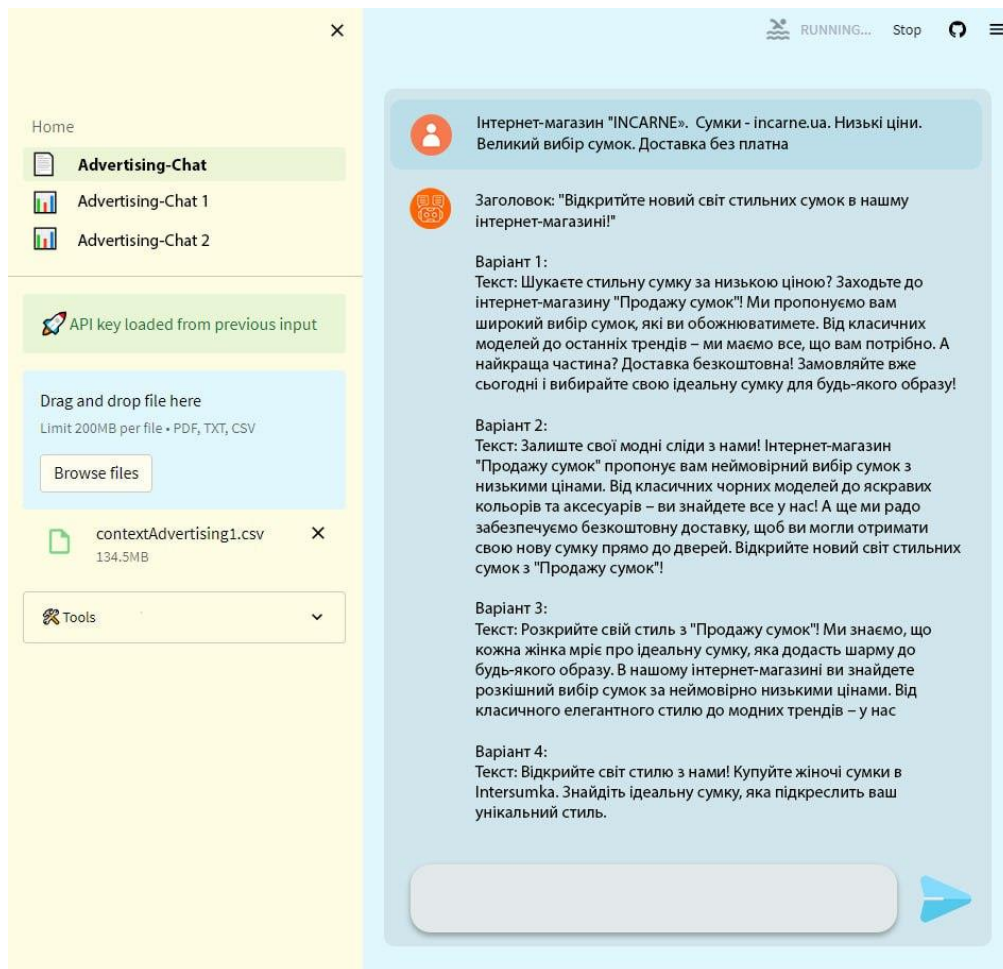


Рис. 2 – Процес роботи чат-бота з використанням API OpenAI та CSV-файлу

Частини CSV-файлу, отримані після розбиття, перетворюються на вектори за допомогою вбудовування OpenAI. Ці вектори потім представляють індекс, заснований на вмісті кожного рядка даного файлу. Векторне сховище (FAISS) створюється з документів, отриманих після вбудовування.

Наступне додається ConversationalRetrievalChain, надаючи йому потрібну модель чату (наприклад, gpt-3.5-turbo) та векторне сховище FAISS, яке зберігає наш файл, перетворений на вектори за допомогою OpenAIEmbeddings(). Цей ланцюг дозволяє мати чат-бота з пам'яттю, використовуючи векторне сховище для знаходження відповідної інформації з нашого датасету.

Це все працює в раніше створеному користувацькому інтерфейсі за допомогою Streamlit. Коли користувач вводить запит, він передається до функції `conversational_chat`, яка генерує відповідь чат-бота. Ця функція передає запит користувача та історію розмови до `ConversationalRetrievalChain`, який генерує відповідь чат-бота. Відповіді чат-бота та повідомлення користувача відображаються в користувацькому інтерфейсі.

Для порівняння ефективності сформованого рекламного контенту на основі запропонованого методу проведено порівняльний експеримент в Google (рис. 3). Перший варіант реклами (рис.3А), розроблений на основі загальних правил побудови реклами в системі.



А. Попередня версія

В. Сформовано на основі методу

Рис. 3 – Реклама «Продажу сумок» в Google

В таблиці 1 представлено порівняння ефективності сформованого рекламного контенту на основі запропонованого методу. В період з March 1, 2023 – March 31, 2023 була проведена рекламна компанія з великим текстовим контентом (див. рис. 3А). В період April 1, 2023 – April 30, 2023 проведено рекламну кампанію з текстовим контентом, що розроблений на основі запропонованого методу (див. рис. 3В).

Таблиця 1

Порівняння ефективності сформованого рекламного контенту

Показник	March 1, 2023 – March 31, 2023	April 1, 2023 – April 30, 2023	Change
Покази	6 160	8 360	2 200
CTR	0,11%	0,15%	0,06%
Сер. ціна за клік	0,17 грн	0,11 грн	-0,06 грн
Коефіцієнт переглядів	4,27%	10,8%	6,53%

Отже, аналіз змін у показниках (див. табл. 1):

- Покази: Цей показник збільшився на 2 200 від березня до квітня, що показує збільшення відвідуваності або видимості оголошення. Це позитивна динаміка, оскільки більше показів зазвичай веде до більшої кількості кліків і потенційних продажів.
- CTR (Click-Through Rate): Зріс на 0,06% від 0,11% до 0,15%. Це означає, що більше людей клікає на ваші оголошення, коли вони їх бачать, що є добрим знаком.
- Середня ціна за клік: Вартість за клік знизилася з 0,17 грн до 0,11 грн. Це може бути позитивним, якщо це зниження ціни не вплинуло на якість трафіку або продажів.
- Коефіцієнт переглядів: Показник значно зросли - з 4,27% до 10,8%, що свідчить про збільшення кількості людей, які дивились або взаємодіяли з рекламою. Це дуже позитивна зміна, яка показує більшу взаємодію користувачів з рекламою.

У цілому, ці дані вказують на покращення ефективності нашої рекламної кампанії в квітні порівняно з березнем. Продовжуйте слідкувати за цими показниками, щоб виявити, які стратегії найбільше впливають на позитивну динаміку.

Висновки

У ході дослідження було розроблено метод удосконалення рекламних текстів на основі генеративних моделей. Цей метод передбачає використання великих обсягів успішних рекламних текстів з соціальних мереж для навчання генеративних моделей, які потім можуть генерувати нові, високоякісні рекламні тексти.

Також було розроблено детальний алгоритм для впровадження цього методу. Алгоритм складається з кількох етапів: збору та підготовки даних, навчання моделі, генерування тексту з використанням моделі, удосконалення результатів і їхньої ітерації.

Показники рекламної кампанії з березня до квітня 2023 року показують покращення в усіх категоріях. Покази зросли на 2 200, свідчаючи про більшу видимість оголошення. CTR також зріс на 0,06%, що означає, що більше людей клікають на оголошення. Середня ціна за клік знизилася з 0,17 грн до 0,11 грн, що позитивно впливає на економічну ефективність. Коефіцієнт переглядів значно зріс з 4,27% до 10,8%, свідчаючи про більшу взаємодію користувачів з рекламою. Всі ці показники свідчать про зростаючу ефективність рекламної стратегії на основі запропонованого методу.

Подальші наукові дослідження будуть включати розробку та тестування більш точних метрик успіху для оцінки ефективності рекламних текстів. Окрім того, варто дослідити, як цей метод може бути адаптований для різних мов, культур та демографічних груп.

Перелік використаних джерел:

1. Lund B., Ting W. Chatting about ChatGPT: How May AI and GPT Impact Academia and Libraries? *SSRN Electronic Journal*. 2023. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4333415>.
2. Sparks of artificial general intelligence: Early experiments with gpt-4 / S. Bubeck et al. 2023. 155 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.12712>.
3. A Complete Survey on Generative AI (AIGC): Is ChatGPT from GPT-4 to GPT-5 All You Need? / C. Zhang et al. 2023. 56 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.11717>.
4. Lecler A., Duron L., Soyer P. Revolutionizing radiology with GPT-based models: Current applications, future possibilities and limitations of ChatGPT. *Diagnostic and Interventional Imaging*. 2023. Vol. 104, iss. 6. Pp. 269-274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.diii.2023.02.003>.
5. Wang H., Qin Z., Wan T. Text Generation Based on Generative Adversarial Nets with Latent Variables. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. 2018. Vol. 10938. Pp. 92-103. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93037-4_8.
6. A Generative Model for category text generation / Y. Li, Q. Pan, S. Wang, T. Yang, E. Cambria. *Information Sciences*. 2018. Vol. 450. Pp. 301-315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.03.050>.
7. Content-aware generative modeling of graphic design layouts / X. Zheng, X. Qiao, Y. Cao, R. W. H. Lau. *ACM Transactions on Graphics*. 2019. Vol. 38, no. 4. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1145/3306346.3322971>.
8. A Deep Generative Model for Code Switched Text / S. Bidisha et al. *Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-19)*, Macao, China, 10-16 August 2019. 2019. Pp. 5175-5181. DOI: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/719>.
9. Zen H. Generative Model-Based Text-to-Speech Synthesis. *2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Nara, 9-12 October 2018. 2018. Pp. 327-328. DOI: <https://doi.org/10.1109/gcce.2018.8574762>.
10. Decision tree based targeting model of customer interaction with business page / H. Lipyanina, S. Sachenko, T. Lendyuk, A. Sachenko. *CMIS*. 2020. Pp. 1001-1012. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2732/20200487.pdf>.
11. Lipyanina H., Sachenko S., Lendyuk T. Targeting Model of HEI Video Marketing based on Classification Tree. *ICTERI Workshops*. 2020. Vol. 2732. Pp. 487-498. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2732/20200487.pdf>.

References:

1. Lund B.D., Wang T. Chatting about ChatGPT: how may AI and GPT impact academia and libraries? *SSRN Electronic Journal*, 2023, pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.2139/ssrn.4333415>.

2. Bubeck S., Chandrasekaran V., Eldan R., Gehrke J., Horvitz E., Kamar E., Lee P., Tat Lee Y., Li Y., Lundberg S., Nori H., Palangi H., Tulio Ribeiro M., Zhang Y. Sparks of artificial general intelligence: Early experiments with gpt-4. 2023. 155 p. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.12712>.
3. Zhang C., Zhang C., Zheng S., Qiao Y., Li C., Zhang M., Kumar Dam S., Myaet Thwal C., Lin Tun Y., Luang Huy L., Kim D., Bae S.-H., Lee L.-H., Yang Y., Tao Shen H., So Kweon I., Seon Hong C. A Complete Survey on Generative AI (AIGC): Is ChatGPT from GPT-4 to GPT-5 All You Need? 2023. 56 p. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.11717>.
4. Lecler A., Duron L., Soyer P. Revolutionizing radiology with GPT-based models: Current applications, future possibilities and limitations of ChatGPT. *Diagnostic and Interventional Imaging*, 2023, vol. 104, iss. 6, pp. 269-274. doi: <https://doi.org/10.1016/j.diii.2023.02.003>.
5. Wang H., Qin Z., Wan T. Text Generation Based on Generative Adversarial Nets with Latent Variables. *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, 2018, vol. 10938, pp. 92-103. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-93037-4_8.
6. Li Y., Pan Q., Wang S., Yang T., Cambria E. A Generative Model for category text generation. *Information Sciences*, 2018, vol. 450, pp. 301-315. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.03.050>.
7. Zheng X., Qiao X., Cao Y., Lau R. W. H. Content-aware generative modeling of graphic design layouts. *ACM Transactions on Graphics*, 2019, vol. 38, no. 4, pp. 1-15. doi: <https://doi.org/10.1145/3306346.3322971>.
8. A Deep Generative Model for Code Switched Text / S. Bidisha et al. *Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-19)*, Macao, China, 2019, pp. 5175-5181. doi: <https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/719>.
9. Zen H. Generative Model-Based Text-to-Speech Synthesis. *2018 IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, Nara, 2018, pp. 327-328. doi: <https://doi.org/10.1109/gcce.2018.8574762>.
10. Lipyana H., Sachenko S., Lendyuk T., Sachenko A. Decision tree based targeting model of customer interaction with business page. *CMIS*, 2020, pp. 1001-1012. Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2732/20200487.pdf> (accessed 15 February 2023).
11. Lipyana H., Sachenko S., Lendyuk T. Targeting Model of HEI Video Marketing based on Classification Tree. *ICTERI Workshops*, 2020, vol. 2732, pp. 487-498. Available at: <https://ceur-ws.org/Vol-2732/20200487.pdf> (accessed 10 December 2022).

Рецензент: М.П. Комар
д-р техн. наук, проф., ЗУНУ

Стаття надійшла 05.05.2023

Стаття прийнята 13.06.2023

УДК 004.6.004.738

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288096

© Іванов Д.Є.¹, Алексеєнко В.В.², Ярмоленко Т.А.³

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОЗАЛЕЖНОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ВЕЛИКИХ ДАНИХ (BIG DATA) ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ (INTERNET OF THINGS)

Один з основних аспектів даного дослідження полягав у використанні інструментів Великих даних для аналізу та ефективного використання даних, що генеруються пристроями Інтернету речей. Великі дані надають змогу зберігати та аналізувати

¹ д-р техн. наук, професор, Житомирський державний університет ім. Івана Франка, м. Житомир, ORCID: 0000-0001-9956-6589, dmitryivanov32@outlook.com

² асистент, Житомирський державний університет ім. Івана Франка, м. Житомир, ORCID: 0000-0002-4966-6300, viltoriiaalekseien23@ukr.net

³ асистент, Житомирський державний університет ім. Івана Франка, м. Житомир, ORCID: 0000-0002-8182-0830, tetianayarmolenko24@ukr.net

величезний обсяг різноманітних даних, а також отримувати цінну інформацію з них. За допомогою інструментів Великих даних, можна ефективно опрацьовувати ці дані, використовуючи паралельні алгоритми та методи аналізу в реальному або квазіреальному часі. Метою статті є аналіз останніх релевантних досліджень в області Великих даних та Інтернету речей, а також розкриття особливостей їхньої взаємозалежності. Для досягнення поставленої мети було використано метод систематичного огляду наукової літератури, який дозволив систематично прослідкувати та аналізувати значимі дослідження та публікації з даної області. Методологія даного наукового дослідження базується на ретроспективному аналізі літературних джерел та наукових публікацій, які стосуються використання Великих даних та Інтернету речей в різних сферах. Для збору даних було використано систематичний пошук по електронним базам, таким як IEEE Xplore, ScienceDirect та пошук у веб-ресурсах, таких як Google Scholar. В результаті аналізу були ідентифіковані ключові концепції, методи та практичні застосування поєднання Великих даних та Інтернету речей. Були проаналізовані останні розробки архітектури Інтернету речей та моделей Великих даних. Практичне значення дослідження полягає в тому, що воно сприяє глибшому розумінню останніх досліджень в областях Великих даних та Інтернету речей, взаємодії між ними і виявленню нових можливостей для використання цього поєднання в різних галузях. Результати цього дослідження можуть бути використані для розвитку нових технологій та покращення існуючих систем збору, обробки та аналізу даних. Окрім того, ці висновки можуть бути використані як основа для подальших наукових досліджень в даній області, спрямованих на вдосконалення та впровадження нових рішень. Дане дослідження допомагає поглибити розуміння потенціалу поєднання Великих даних та Інтернету речей та вказати на шляхи подальшого розвитку в цій області.

Ключові слова: аналіз даних, архітектура даних, збереження даних, інтернет, збір даних.

D. Ivanov, V. Alekseienco, T. Yarmolenko. Features of the interdependence of Big Data and Internet of Things technologies. One of the main aspects of this study was the use of Big Data tools to analyze and effectively use the data generated by Internet of Things (IoT) devices. Big data allows you to store and analyze a huge amount of diverse data, as well as to obtain valuable information from it. With the help of Big Data tools, it is possible to process this data efficiently using parallel algorithms and analysis methods in real or quasi-real time. The purpose of the article is to analyze the latest relevant research in the field of Big Data and the Internet of Things, as well as to reveal the features of their interdependence. To achieve this goal, the method of systematic review of scientific literature was used, which allowed to systematically trace and analyze significant research and publications in this area. The methodology of this research is based on a retrospective analysis of literature sources and scientific publications related to the use of Big Data and the Internet of Things in various fields. To collect data, a systematic search of electronic databases such as IEEE Xplore, ScienceDirect, and searches on web resources such as Google Scholar were used. The analysis identified key concepts, methods, and practical applications of combining Big Data and the Internet of Things. The latest developments in the Internet of Things architecture and Big Data models were analyzed. The practical significance of the study is that it contributes to a deeper understanding of the latest research in the areas of Big Data and the Internet of Things, the interaction between them and the identification of new opportunities for using this combination in various industries. The results of this research can be used to develop new technologies and improve existing systems for collecting, processing, and analyzing data. In addition, these findings can be used as a basis for further research in this area aimed at improving and implementing new solutions. This study helps to deepen the understanding of the potential of combining Big Data and the Internet of Things and to point out ways for further development in this area.
Key words: data analysis, data architecture, data storage, Internet, data collection.

Постановка проблеми. Великі дані (Big Data) та Інтернет речей (Internet of Things (IoT)) є двома ключовими напрямками, які активно прогресують та набувають популярності в різних сферах, включаючи промисловість, охорону здоров'я, транспорт, науку та багато інших. Ці технології дозволяють збирати значні обсяги даних з різноманітних джерел та використовувати їх для різноманітних цілей, включаючи прогнозування поведінки, вдосконалення процесів та прийняття рішень. Для досягнення максимального потенціалу цих технологій необхідно розуміти, як їх поєднувати.

Взаємодія Інтернету речей та Великих даних відкриває нові можливості в різних галузях, зокрема в охороні здоров'я, безпеці та економіці. У сучасному світі ми стикаємося з постійним зростанням обсягу інформації, яку потрібно обробляти. За статистикою з [statista.com](https://www.statista.com), обсяг даних по всьому світу безперервно зростає і очікується, що до 2025 року він досягне 181 зетабайту. Це означає, що ми стикаємося з надзвичайно великим обсягом інформації, що викликає проблеми з її обробкою та аналізом. Проте, не тільки наша здатність аналізувати дані зазнала змін у зв'язку зі зростанням їх обсягу. Також зростає кількість пристроїв, підключених до Інтернету речей. За даними з [iot-analytics.com](https://www.iot-analytics.com), до 2025 року очікується, що їх кількість становитиме 22,2 мільярди. Це означає, що наші можливості збирання даних збільшуються, але одночасно зростає складність їх обробки та аналізу.

Мета дослідження: ретельний аналіз взаємодії технологій Великих даних та Інтернету речей, а також розкриття їх впливу на розвиток суспільства та технологій. Дослідження також націлене на систематичний огляд найсвіжіших наукових відкриттів та досліджень, що дозволяє актуалізувати наявні дані та підвищити рівень обізнаності у цій галузі. Загалом, мета дослідження полягає в глибшому розумінні ролі та значення взаємодії між Великими даними та Інтернетом речей для суспільства та прогресу технологій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розглядаючи роботу І.О. Клопова та О.О. Шапурова, можна зазначити, що вона розкриває архітектуру Інтернету речей та концепцію Великих даних через трійку V – обсяг, швидкість та різноманітність [1]. Дослідження Б.Ю. Жураковського та І.О. Зеніва спрямоване на застосування Інтернету речей, але не включає аналіз практичного використання комбінації Інтернету речей та Великих даних для вирішення конкретних проблем [2]. Слід зауважити, що концепція трійки V для Великих даних вже застаріла, оскільки останні дослідження вказують на нову концепцію – п'ятірку V [3]. Робота І.В. Пулеко та А.А. Єфіменко зосереджена на розгляді загальних аспектів Інтернету речей та аналізу даних. Вони проводять дослідження, яке ставить за мету зрозуміти основні принципи та проблеми, пов'язані з цими технологіями [4]. Робота також наголошує на значенні безпеки, оскільки вона є критичним аспектом в контексті Інтернету речей.

Дослідники з США, Р.К. Sadhu et al. також присвятили свою увагу питанням безпеки Інтернету речей [5]. Їх дослідження спрямовані на виявлення потенційних загроз та розробку заходів для забезпечення безпеки в цій галузі. Крім того, V. Saravanan et al. та інші у своїй роботі розглядають основні алгоритми розробки та безпеки Інтернету речей та Великих даних [6]. Вони зосереджуються на розробці та використанні ефективних алгоритмів для збору, обробки та захисту даних в цій області.

У сфері освіти великі дані допомагають аналізувати дані про студентів, їх активність та успішність з метою вдосконалення методів навчання. Результати даного дослідження співпадають з висновками авторів Y. Najjaji et al., що застосування різних типів даних, таких як записи, доступ до інформації, аналіз та використання, допомагає краще розуміти та реагувати на індивідуальну поведінку учнів у цифровій сфері [7]. Поширення великих даних в освітній сфері також підкреслює важливість навчання студентів методам науки про дані в магістерських програмах, а також розвитку відкритих наукових і дослідницьких структур, які сприяють співпраці команд з метою поліпшення можливостей аналізу великих даних в освіті. Це надає нові можливості для досліджень у галузі освіти та сприяє покращенню її ефективності та результативності.

Висновки дослідження також підтверджуються в інших галузях. У галузі охорони здоров'я великі дані використовуються для аналізу медичних записів та діагностичних зображень, що сприяє виявленню тенденцій у здоров'ї пацієнтів та покращенню діагностики та лікування. Значається, що великі дані також мають важливе значення в маркетингу, де вони допомагають аналізувати дані про споживачів, їх звички та покупки, що підвищує ефективність маркетингових кампаній та персоналізує пропозиції. У сільському господарстві великі дані використовуються

для покращення врожайності та ефективності виробництва, аналізуючи дані про ґрунт, кліматичні умови та інші фактори. Таким чином, використання інструментів Великих даних дозволяє ефективно зберігати та аналізувати великий обсяг різноманітних даних, що генеруються пристроями Інтернету речей. Це допомагає отримати цінну інформацію та реалізувати потенціал великих даних у різних галузях, сприяючи покращенню ефективності та інноваційності відповідних процесів і послуг.

Порівнюючи результати даного дослідження з дослідженнями інших авторів, було виявлено спільність поглядів та підтримку ідеї про взаємозв'язок між Інтернетом речей і Великими даними. Інші дослідники зосереджувалися на інших аспектах проблематики, таких як збереження даних, методи аналізу даних та питання безпеки. Зокрема, автори С. Stergiou et al. [8], М.А. Amanullah et al. [9] та Y. Chen [10], що досліджували питання безпеки даних, виявили проблеми, пов'язані з безпекою та конфіденційністю Великих даних та Інтернету речей. Ці автори розглядали методи та підходи до захисту великих обсягів даних, що генеруються IoT-пристроями, від несанкціонованого доступу, зловживання та витоку інформації. Вони також акцентували увагу на аспектах конфіденційності та приватності при обробці та передачі цих даних. У даному дослідженні розглядалося не лише питання безпеки, але також вплив Великих даних на різні галузі, такі як громадський транспорт, освіта, охорона здоров'я, маркетинг та сільське господарство. Виявлено, що результати цього дослідження підтверджують ідею про використання Великих даних та IoT у цих галузях і сприяють розвитку більш ефективних та інтелектуальних додатків і послуг.

Результати даного дослідження підтверджують висновки авторів D. Ushakov et al. [11]. З'ясовано, що технологія Інтернету речей може бути використана для розробки розширених послуг, що покращують якість та ефективність громадського транспорту. Завдяки гнучкому використанню поточних даних, що доступні через Інтернет речей, користувачі можуть отримувати точну інформацію про прибуття транспорту та оператори можуть повідомляти громадськість про можливі затримки. Таке поєднання забезпечує вигоди як для пасажирів, так і для операторів громадського транспорту. Дослідження також підтверджує використання різних методів та сервісів Інтернету речей в транспортній галузі, від збору даних про пасажирів до управління даними та надання нових послуг. Більше того, Інтернет речей знаходиться в процесі поступового розвитку, з удосконаленням компонентів, що сприяє масштабуванню таких рішень. Однак, щоб реалізувати потенційні переваги Інтернету речей у громадському транспорті, потрібна вміння інтегрувати технології та готові рішення. У галузі громадського транспорту за допомогою аналізу даних можна розуміти попит на транспортні послуги, виявляти тенденції та вдосконалювати систему громадського транспорту.

У роботі І.О. Клопова та О.О. Шапурова була описана модель великих даних, що включала три основні характеристики: швидкість, об'єм і різноманітність (3V) [1]. Однак в даному дослідженні модель великих даних була розширена до семи характеристик 7V, запропонованих в роботі авторів М.А. Ashaari et al. [12]. У додаток до швидкості, об'єму і різноманітності, до моделі були додані ще чотири компоненти: цінність, правдивість, мінливість та візуалізація. Ця оновлена модель дозволяє краще враховувати складність і особливості великих даних, враховуючи їхній контекст та потенціал для аналізу та використання у різних галузях. Вона покращує наше розуміння великих даних і відображає їхню більш повну сутність, що є важливим для розробки ефективних стратегій збору, обробки та аналізу даних.

У даному дослідженні була запропонована узагальнена архітектура Інтернету речей, яка співпадає з результатами, представленими авторами Б.Ю. Жураковським та І.О. Зенівим [2]. У роботі авторів також була описана архітектура Інтернету речей, яка включає в себе різноманітні компоненти та зв'язки між ними. Однак обидва дослідження дійшли до подібних висновків стосовно необхідності розробки і використання узагальненої архітектури Інтернету речей для забезпечення ефективного та координаційного функціонування пристроїв та систем, пов'язаних з IoT.

Виклад основного матеріалу. Інтернет речей можна визначити як систему взаємопов'язаних фізичних елементів з чіткою адресацією, що мають різний рівень обробки, сприйняття та активації і здатні взаємодіяти та спілкуватися через Інтернет як спільну платформу [7]. Інтернет речей представляє собою мережу взаємопов'язаних фізичних об'єктів та речей, яку часто називають «мережею мереж» [8]. Ця інтерактивна мережа, що зображена на рис. 1, об'єднує різні об'єкти та речі, які взаємодіють між собою та зовнішнім середовищем за допомогою Інтернету. Ці об'єкти можуть бути датчиками, пристроями, розумними пристроями, системами автоматизації,

розподіленою інформацією та багатьма іншими. Вони забезпечують збір, передачу, обробку та аналіз даних, а також взаємодію та обмін інформацією через Інтернет. Цей широкий спектр підключених об'єктів та речей у межах Інтернету речей відкриває безліч можливостей у різних сферах, включаючи науку, технологію, промисловість, медицину, транспорт, енергетику та багато інших. Розвиток Інтернету речей став ключовим фактором у створенні «розумного» середовища, де пристрої та системи взаємодіють та співпрацюють між собою для досягнення спільної мети.

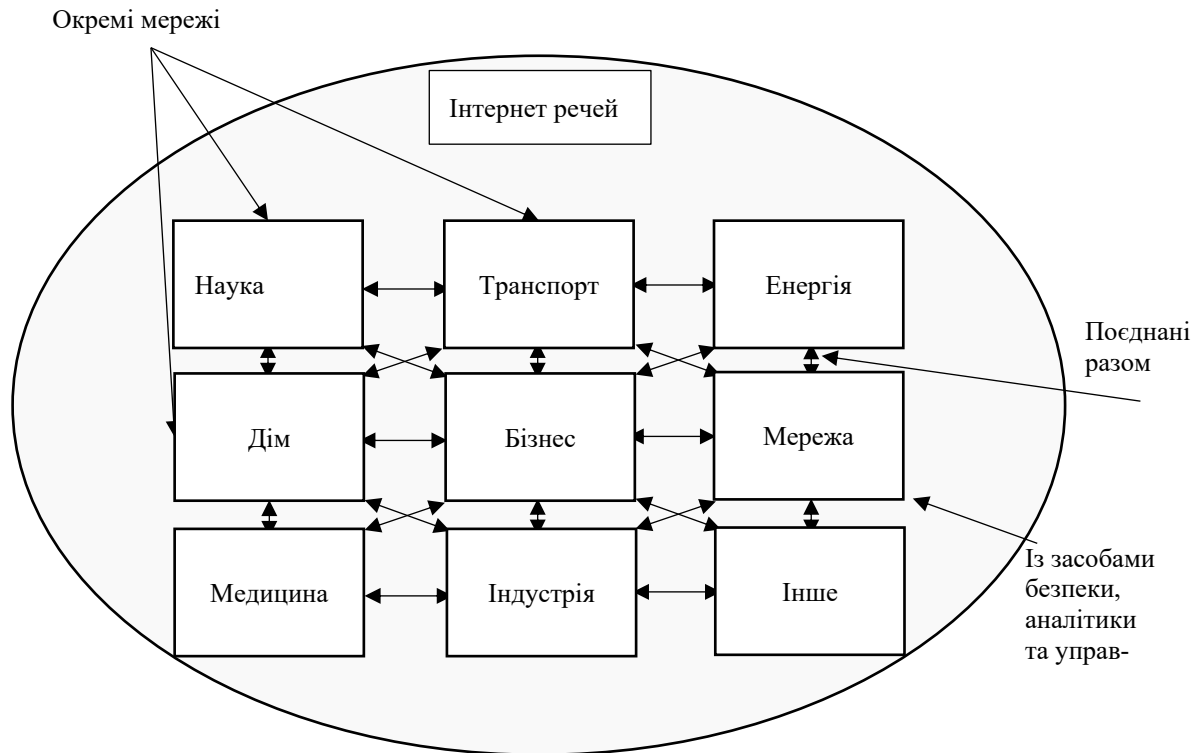


Рис. 1 – Інтернет речей можна розглядати як мережу мереж [8]

Інтеграція Інтернету речей в різні сфери людської діяльності, такі як медицина, освіта, лінгвістика, екологія, агрономія, маркетинг, сфера правових відносин, сфера безпеки, виробництво, страхування і кредитування, транспорт, туризм і розваги, дозволяє значно розширити можливості та контроль людини над її оточуючим середовищем [9].

Результати аналізу статистичних даних свідчать про значний ріст обсягу даних, що зібрані з Інтернету речей. У 2019 році обсяг таких даних становив 13,6 зетабайт та очікується, що до 2025 року він зросте до 79,4 зетабайт [10]. Цей ріст супроводжується збільшенням кількості підключених до Інтернету речей пристроїв, які, як очікується, зростуть на 12,2 мільярди до 2025 року [11]. Ці тенденції свідчать про все більшу поширеність та значущість Інтернету речей в різних сферах життя. Для ефективної роботи з цими великими обсягами даних, а також для забезпечення безпеки, оптимізації та ефективного управління Інтернетом речей, необхідний подальший розвиток та вдосконалення методів їх обробки, алгоритмів та моделей. Також постає потреба у гнучкій архітектурі, яка здатна ефективно впоратися з інтенсивним потоком інформації.

Типова архітектура Інтернету речей складається з трьох рівнів [3, 12], як показано на рис. 2, а саме: прикладний рівень (Application layer), мережевий рівень (Network layer) та рівень сприйняття (Perception layer).

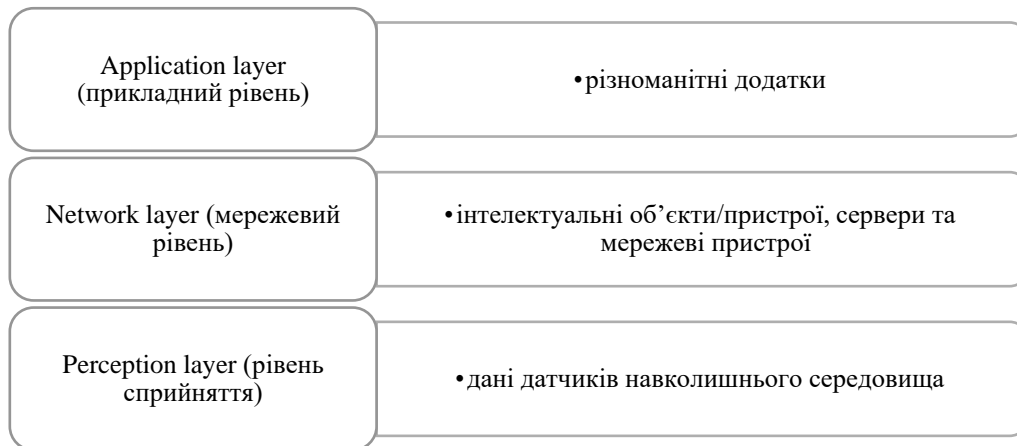


Рис. 2 – Трьох-рівнева архітектура Інтернету речей

На прикладному рівні розташовані різноманітні додатки, які використовуються в Інтернеті речей. Ці додатки можуть включати системи моніторингу, управління, аналізу даних, споживчі додатки та інші. Вони забезпечують взаємодію користувача з системою, обробку та аналіз отриманих даних, а також виконання специфічних функцій залежно від потреб конкретного застосування. Мережевий рівень включає інтелектуальні об'єкти/пристрої, сервери та мережеві пристрої, які забезпечують комунікацію та обмін даними в мережі Інтернету речей. Ці об'єкти можуть бути датчиками, актуаторами, контролерами, хмарними серверами та іншими пристроями. Вони виконують функцію збору, передачі, обробки та зберігання даних, а також забезпечують керування та управління пристроями в мережі. Рівень сприйняття включає дані, отримані від датчиків, розташованих у навколишньому середовищі. Ці датчики можуть бути різного типу і міряти такі параметри, як температура, вологість, освітленість, рух та інші. Вони забезпечують збір інформації про стан навколишнього середовища та перетворюють її на цифрові дані, які подальше передаються на мережевий рівень для подальшої обробки та аналізу.

Інтернет речей (IoT) є перспективною технологією, яка знаходить застосування у різних сферах діяльності [13]. Нижче наведено опис декількох таких сфер:

1. Інтернет розумного життя: IoT може використовуватись для побутової автоматизації та управління різними пристроями у домашньому середовищі. Наприклад, системи «розумного дому» дозволяють контролювати освітлення, опалення, безпеку та інші побутові пристрої з використанням мобільних додатків.

2. Інтернет розумного міста: IoT може забезпечувати впровадження різноманітних «розумних» технологій у містах, що поліпшують якість життя громадян. Наприклад, системи управління транспортом, моніторинг якості повітря, управління відходами та інші технології можуть забезпечити ефективніше функціонування міст.

3. Інтернет розумного навколишнього середовища: IoT може використовуватись для моніторингу та управління довкіллям, таким як моніторинг рівня забруднення повітря, води та ґрунту, контроль за природними резерватами та охоронюваними зонами.

4. Інтернет розумної індустрії: Впровадження IoT у промисловості дозволяє створити «розумні» фабрики та системи управління виробництвом. Автоматизація процесів, моніторинг обладнання та прогнозування відмов, оптимізація логістики та ресурсів – це лише деякі приклади застосування IoT у промисловій сфері.

5. Інтернет розумного здоров'я: Використання IoT у галузі здоров'я дозволяє створити медичні системи та пристрої, які забезпечують моніторинг здоров'я, дистанційне спостереження, віддалену діагностику та телемедицину. Носимі пристрої, датчики та медичні імпланти зібрані в одну мережу, що дозволяє збирати та аналізувати дані про пацієнтів в реальному часі, сприяючи ранньому виявленню захворювань та покращенню медичного догляду.

6. Розумна енергія: IoT може використовуватись для оптимізації та керування енергетичними системами. Системи «розумного будинку» дозволяють ефективно використання енергії

шляхом автоматичного регулювання освітлення, опалення та кондиціонування повітря відповідно до потреб жителя. Крім того, IoT може бути використаний для моніторингу та управління розподільчими мережами енергопостачання, прогнозування попиту та інтеграції відновлювальних джерел енергії.

7. Розумна агрокультура: Використання IoT в сільському господарстві дозволяє оптимізувати процеси вирощування рослин, контролювати рівень вологості, температуру, освітлення та інші параметри вирощування. Датчики, автоматичні системи поливу та розпізнавання хвороб рослин допомагають підтримувати оптимальні умови росту та збільшувати врожайність.

У сучасному світі, відомому як «епоха даних», спостерігається надзвичайно швидке накопичення нових даних усіма секторами промисловості та державними органами. Цей процес постійно зростає, що призводить до великого ентузіазму і зацікавленості організацій у пошуках способів використання своїх даних для створення цінності. Заради досягнення конкурентних переваг і покращення рішень прийняття рішень, організації здійснюють значні інвестиції в аналіз даних та впровадження новітніх технологій для оптимального використання накопичених ресурсів даних [14]. Великі дані в останні роки стали одним з найбільш актуальних і захоплюючих напрямків в галузі науки та технологій. Швидкий розвиток інформаційних технологій, постійний приріст обсягів даних та поява нових джерел інформації створили потребу у нових підходах до збереження, обробки та аналізу цих даних. Великі дані відкривають необмежені можливості для отримання цінної інформації та розуміння складних явищ, що відбуваються у різних сферах діяльності. Статистика показує що кількість даних невинно зростає – у 2025 році кількість Великих даних зростає до 181 зетабайту [15].

Наукові дослідження в галузі великих даних визначають різні підходи до класифікації та характеристик великих даних. Початково використовувалися три V – швидкість, об'єм та різноманітність, щоб описати вимоги, пов'язані з обробкою та управлінням великими обсягами даних [16]. Пізніше цей набір був розширений до чотирьох V, додавши аспект цінності, який вказує на необхідність виділення корисної інформації з великих даних [17]. Прогресивний розвиток великих даних привів до введення поняття п'ятих V, включаючи обсяг, швидкість, різноманітність, цінність та правдивість. Ця модель дозволяє більш повно описати і врахувати особливості великих даних та їх потенціал для створення цінності [18]. Однак, недавні дослідження розширили цю модель до семи V, додавши до неї аспекти мінливості та візуалізації [19]. Мінливість вказує на значення та постійні зміни даних, тоді як візуалізація акцентує увагу на візуальному відображенні зв'язків та зрозумілості даних.

Великі дані широко використовуються в різних галузях для різноманітних цілей. Наприклад, в галузі громадського транспорту вони використовуються для аналізу поведінки користувачів та оцінки якості послуг [20]. Це дозволяє зрозуміти попит на транспортні послуги, виявити тенденції та вдосконалити систему громадського транспорту. У сфері освіти великі дані використовуються з метою покращення ефективності освітнього процесу. Вони допомагають аналізувати дані про студентів, їхню активність та успішність, щоб зрозуміти сильні та слабкі сторони навчання та вдосконалити методи навчання [21, 22]. Також великі дані мають великий потенціал у сфері охорони здоров'я. Вони можуть бути використані для аналізу медичних записів, діагностичних зображень та інших медичних даних з метою виявлення тенденцій у здоров'ї пацієнтів, покращення діагностики та лікування [23]. Великі дані також є цінним інструментом в маркетингу. Вони дозволяють аналізувати дані про споживачів, їхні звички, вподобання та покупки, що допомагає підвищити ефективність маркетингових кампаній та персоналізувати пропозиції [24]. У сільському господарстві великі дані використовуються для покращення врожайності та ефективності виробництва. Аналізуючи дані про ґрунт, кліматичні умови та інші фактори, великі дані допомагають виявити оптимальні підходи для регулювання внесення ресурсів та управління виробництвом [25].

Великі дані мають значний вплив на багато галузей, підтримуючи прийняття рішень, заснованих на даних. Використання великих даних в цих галузях допомагає покращити ефективність, якість та інноваційність відповідних процесів і послуг. Використання великих даних та IoT дозволяє забезпечити покращення ефективності та точності збору, обробки та аналізу даних. Великі дані забезпечують багатоцільову інформацію, в якій можна виявити складні зв'язки та патерни, а IoT дозволяє збирати реальні дані з фізичних об'єктів та середовища, що розширює обсяг інформації для аналізу. Інструменти для великих даних мають великий потенціал для зберігання

та аналізу великого обсягу різноманітних даних. Вони дозволяють ефективно опрацювати ці дані, використовуючи паралельні алгоритми та методи аналізу в реальному або квазіреальному часі. Також великі дані можуть використовуватись з інтелектуальними методами аналізу для виділення цінної інформації [26].

У поєднанні з Інтернетом речей, технології великих даних виявляють ще більший потенціал у розумних середовищах. Завдяки збільшеному обсягу та різноманітності даних, що генеруються IoT-пристроями, великі дані можуть бути використані для отримання цінних результатів у цих додатках. Наприклад, використання технологій великих даних та IoT може сприяти вдосконаленню систем розумного середовища, оптимізації транспортних мереж, покращенню управління водними ресурсами та багатьох інших аспектах розумного середовища [27, 28]. Основні переваги такого поєднання, наведені на рис. 3, включають можливість використання різноманітних джерел даних для збору інформації, швидкий аналіз даних у реальному часі, здатність виявляти складні залежності та патерни, а також покращення ефективності прийняття рішень.



Рис. 3 – Основні переваги великих даних та IoT у сфері розумного середовища [26]

Інтернет речей і Великі дані мають тісний взаємозв'язок, оскільки середовища IoT засновані на зборі, зберіганні та обробці даних. Пристрої IoT, такі як сенсори, виконавчі механізми, камери, RFID-мітки та Bluetooth-пристрої, здатні генерувати величезний обсяг даних. Ці дані потім передаються на зберігання та обробку, а користувачі отримують доступ до них через хмарні ресурси (рис. 4).

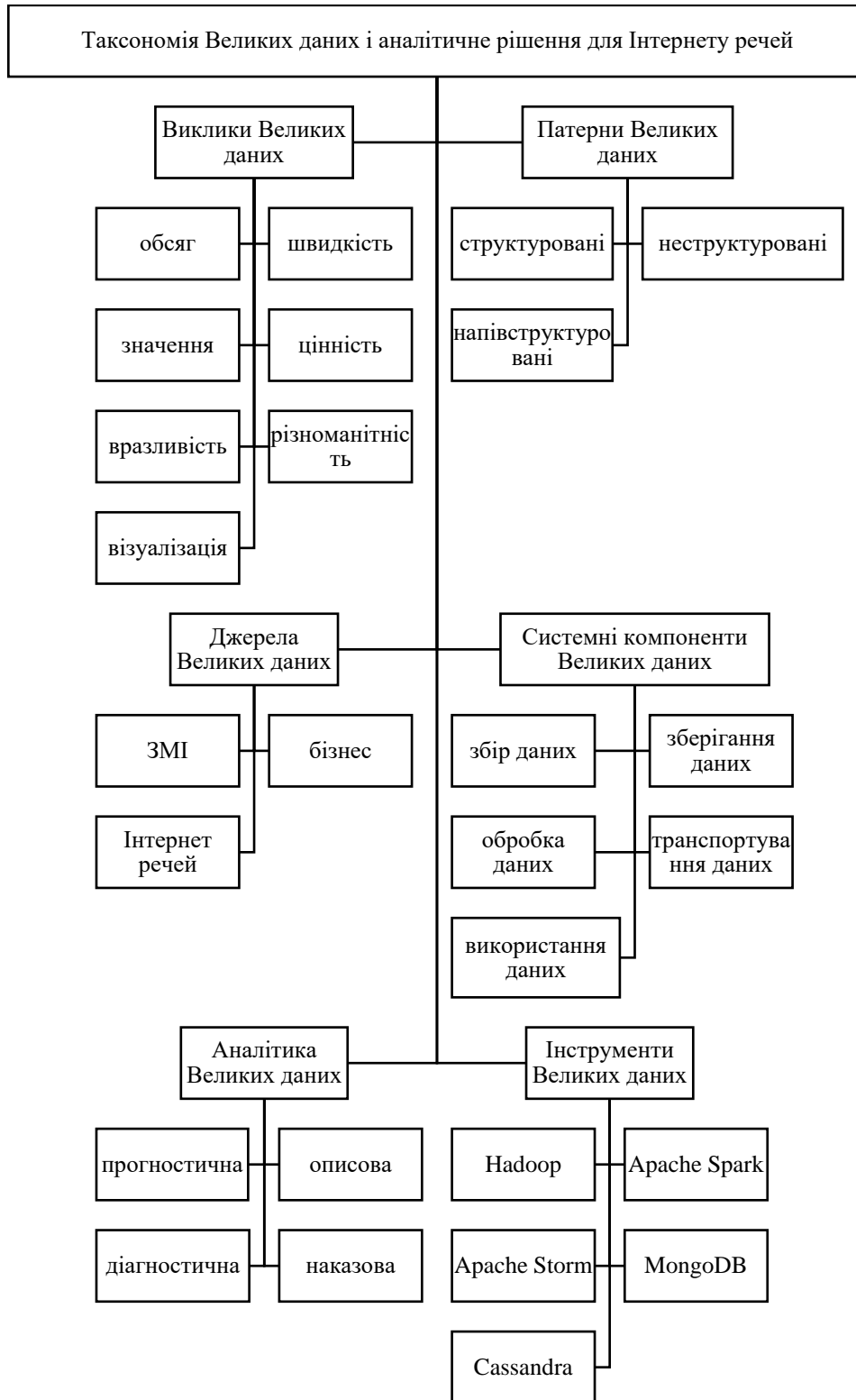


Рис. 4 – Таксономія Великих даних і аналітичне рішення для Інтернету речей [29]

Великі дані та Інтернет речей взаємопов'язані і пропонують широкі можливості для розвитку різних галузей. Використання інструментів великих даних дозволяє зберігати та аналізувати величезний обсяг різноманітних даних, що генеруються пристроями IoT [30-32]. Це дозволяє отримувати цінну інформацію та зробити додатки IoT більш ефективними та інтелектуальними. Один із аспектів використання великих даних в IoT полягає у зменшенні розмірності даних. Методи зменшення розмірності дозволяють вилучати важливі функції з вихідних даних та зберігати

їх після зменшення розмірності. Це сприяє ефективному збереженню даних та забезпеченню швидкого доступу до них. Класифікація даних та присвоєння міток важливості дозволяють встановити ступінь конфіденційності даних. Мітки використовуються для виконання різних алгоритмів аналізу даних, а самі дані можуть зберігатися в різних місцях залежно від їх конфіденційності [33-35]. Це забезпечує підвищену безпеку та захист важливої інформації. У багатьох дослідженнях для аналізу даних використовувалися інструменти, такі як Apache Spark. Однак не було проведено порівняльного аналізу між різними методами аналізу даних, такими як Spark та Storm, для конкретних застосувань IoT.

Поєднання IoT і великих даних відкриває нові можливості для розробки програм та послуг. Наприклад, використання аналізу даних може сприяти вдосконаленню процесу надсилання та доставки поштових пакетів, управлінню освітленням магістралей для енергозбереження, аналізу систем для попередження та вирішення проблем, управлінню дорожнім рухом для забезпечення безпеки та задоволеності громадян, а також забезпеченню безпеки та конфіденційності даних [36].

Висновки та напрямок подальших досліджень

У цьому дослідженні було виявлено тісний взаємозв'язок між Інтернетом речей і Великими даними. Використання інструментів Великих даних дозволяє ефективно зберігати та аналізувати величезний обсяг різноманітних даних, що генеруються пристроями IoT. Це відкриває широкі можливості для розвитку різних галузей та сприяє покращенню ефективності відповідних процесів і послуг. Було проведено аналіз наукових праць, що містяться у відкритому доступі, з фокусом на темі Великих даних та Інтернету речей. Аналізувалися наукові статті, дисертації, конференційні матеріали та інші джерела, що містять результати досліджень в цій області. В процесі аналізу було звернуто увагу на різні аспекти Великих даних та IoT, зокрема на методи збереження, обробки, аналізу та використання великого обсягу даних, що генеруються пристроями IoT. Досліджувалися різні варіанти використання Великих даних та IoT у різних галузях, таких як громадський транспорт, освіта, охорона здоров'я та інші.

Висновком з аналізу наукових праць стало підтвердження важливості взаємозв'язку між Великими даними та IoT. Цей взаємозв'язок надає широкі можливості для розвитку різних галузей і сприяє покращенню ефективності та якості процесів і послуг. Використання великих даних та IoT має значний потенціал у різних галузях. У практичному плані, результати даного дослідження мають важливе значення для розуміння взаємозв'язку між IoT і Великими даними та сприяють розвитку нових інноваційних рішень та послуг в різних галузях. Дане дослідження підкреслює важливість взаємозв'язку між IoT і Великими даними, а також надає підстави для подальших досліджень і реалізації практичних застосувань цього взаємозв'язку у різних галузях.

Одним з напрямків подальших досліджень є розвиток нових методів збору та обробки даних з пристроїв Інтернету речей в контексті Великих даних. Дослідники можуть працювати над розробкою ефективних алгоритмів для оптимізації обробки великого обсягу даних. Іншим напрямком досліджень є вдосконалення методів безпеки та конфіденційності в поєднанні Великих даних та Інтернету речей. Враховуючи потенційні загрози та ризики, пов'язані зі збереженням та обробкою великого обсягу даних, дослідники можуть працювати над розробкою нових методів шифрування та захисту даних, а також розробкою політик безпеки для використання в контексті Великих даних та Інтернету речей. Крім того, важливим напрямком досліджень є вивчення етичних та правових аспектів використання Великих даних та Інтернету речей. Дослідники можуть досліджувати питання конфіденційності даних, збереження приватності, правового регулювання та відповідальності, пов'язані з використанням цих технологій.

Перелік використаних джерел:

1. Клопов І.О., Шапуров О.О. Інтернет речей та Big Data: аналітика в режимі реального часу. *Науковий погляд: економіка та управління*. 2022. Т. 2, вип. 78. С. 156-163. DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-666X/2022-78-22>.
2. Жураковський Б.Ю., Зенів І.О. Технології інтернету речей. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 271 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42078/1/Zhurakovskiy_B_Zeniv_Tehnologii_internet_rechey.pdf.

3. Big Data, Cloud Computing and IoT: Tools and Applications / S. Rani, P. Bhambri, A. Kataria, A. Khang, A.K. Sivaraman. Boca-Raton: CRC Press, 2023. 258 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003298335>.
4. Пулеко І.В., Єфіменко А.А. Архітектура та технології Інтернету речей: навч. посіб. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. 234 с. URL: <https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/8093/%D0%9F%D1%83%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D0%BE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
5. Sadhu P.K., Yanambaka V.P., Abdelgawad A. Internet of Things: Security and solutions survey. *Sensors*. 2022. Vol. 22, iss. 19. Pp. 7433. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197433>.
6. Securing IoT and Big Data: Next generation intelligence / V. Saravanan, A. Anpalagan, T. Poongodi, F. Khan. Boca Raton: CRC Press, 2021. 190 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003009092>.
7. Big data and IoT-based applications in smart environments: A systematic review / Y. Hajjaji, W. Boulila, I.R. Farah, I. Romdhani, A. Hussain. *Computer Science Review*. 2021. Vol. 39. Pp. 100318. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100318>.
8. Security, privacy & efficiency of sustainable Cloud Computing for Big Data & IoT / C. Stergiou, K.E. Psannis, B.B. Gupta, Y. Ishibashi. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2018. Vol. 19. Pp. 174-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.06.003>.
9. Deep learning and big data technologies for IoT security / M.A. Amanullah, R.A. Ariyaluran Habeeb, F.H. Nasaruddin, A. Gani, E. Ahmed, A.S.M. Nainar, N. Md Akim, M. Imran. *Computer Communications*. 2020. Vol. 151. Pp. 495-517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.016>.
10. Chen Y. IoT, cloud, big data and AI in interdisciplinary domains. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2020. Vol. 102. Pp. 102070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102070>.
11. The Internet of Things impact on smart public transportation / D. Ushakov, E. Dudukalov, E. Kozlova, K. Shatila. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63. Pp. 2392-2400. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.275>.
12. Big data analytics capability for improved performance of higher education institutions in the Era of IR 4.0: A multi-analytical SEM & ANN perspective / M.A. Ashaari, K.S.D. Singh, G.A. Abbasi, A. Amran, F.J. Liebana-Cabanillas. *Technological Forecasting and Social Change*. 2021. Vol. 173. Pp. 121119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121119>.
13. Hussein A.R.H. Internet of Things (IOT): Research challenges and future applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2019. Vol. 10, iss. 6. Pp. 77-82. DOI: <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100611>.
14. Internet of nano-things, things and everything: Future growth trends / M.H. Miraz, M. Ali, P.S. Excell, R. Picking. *Future Internet*. 2018. Vol. 10, iss. 8. Pp. 1-28. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi10080068>.
15. Смолин О.І., Олексюк В.П. Інтернет речей як технологічний феномен XXI століття. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання: досвід, тенденції, перспективи: матеріали IV міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., м. Тернопіль, 30 квіт. 2020 р. Тернопіль, 2020. С. 147-149. URL: http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/15393/1/50_Smolyn_Oleksiuk.pdf.*
16. Taylor P. Data volume of internet of things (IoT) connections worldwide in 2019 and 2025. 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/1017863/worldwide-iot-connected-devices-data-size/>.
17. Sinha S. State of IoT 2023: Number of connected IoT devices growing 16% to 16.7 billion globally. 2023. URL: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>.
18. Самойленко М.Ю. Принципи застосування технології інтернет речей у сучасному світі техніки. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Т. 31 (70), ч. 1, вип. 6. С. 142-148. DOI: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-1/24>.
19. Patel K.K., Patel S.M. Internet of things IOT: Definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application future challenges. *International Journal of Engineering Science and Computing*. 2016. Vol. 6, iss. 5. Pp. 6122-6131. DOI: <https://doi.org/10.4010/2016.1482>.

20. Big data analytics and firm performance: Findings from a mixed-method approach / P. Mikalef, M. Boura, G. Lekakos, J. Krogstie. *Journal of Business Research*. 2019. Vol. 98. Pp. 261-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.044>.
21. Taylor P. Big data – statistics & facts. 2023. URL: <https://www.statista.com/topics/1464/big-data/#topicOverview>.
22. Russim Ph. Big Data analytics. The Data Warehousing Institute, 2011. 40 p. URL: http://download.101com.com/pub/tdwi/Files/TDWI_BPReport_Q411_Big_Data_Analytics_Web.pdf.
23. Shu H. Big data analytics: six techniques. *Geo-spatial Information Science*. 2016. Vol. 19, iss. 2. Pp. 119-128. DOI: <https://doi.org/10.1080/10095020.2016.1182307>.
24. How «big data» can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study / S. Fosso Wamba, S. Akter, A. Edwards, G. Chopin, D. Gnanzou. *International Journal of Production Economics*. 2015. Vol. 165. Pp. 234-246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.031>.
25. Welch T.F., Widita A. Big data in public transportation: A review of sources and methods. *Transport Reviews*. 2019. Vol. 39, iss. 6. Pp. 795-818. DOI: <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1616849>.
26. Mining Big Data in education: Affordances and challenges / C. Fischer, Z.A. Pardos, R.S. Baker, J.J. Williams, P. Smyth, R. Yu, S. Slater, R. Baker, M. Warschauer. *Review of Research in Education*. 2020. Vol. 44, iss. 1. Pp. 130-160. DOI: <https://doi.org/10.3102/0091732X20903304>.
27. Яриніч Е.Ю., Минайленко Р.М. Проблеми та перспективи технології ІоТ. *Інформаційна безпека та комп'ютерні технології: тези доповідей V міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. Кропивницький, 19-20 травня 2022 р. Кропивницький, 2022. С. 34. URL: http://kbpz.kntu.kr.ua/wp-content/uploads/2022/06/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D1%82%D0%B5%D0%B7-2022-1.pdf*.
28. Big data in healthcare: management, analysis and future prospects / S. Dash, S.K. Shakyawar, M. Sharma, S. Kaushik. *Journal of Big Data*. 2019. Vol. 6. Pp. 1-25. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0217-0>.
29. Cao G., Tian N., Blankson Ch. Big Data, marketing analytics, and firm marketing capabilities. *Journal of Computer Information Systems*. 2022. Vol. 62, iss. 3. Pp. 442-451. DOI: <https://doi.org/10.1080/08874417.2020.1842270>.
30. Big data in agriculture: Between opportunity and solution / S.A. Osinga, D. Paudel, S.A. Mouzakitis, I.N. Athanasiadis. *Agricultural Systems*. 2022. Vol. 195. Pp. 103298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103298>.
31. Balas V.E., Solanki V.K., Kumar R. Internet of Things and Big Data applications: Recent advances and challenges. Cham: Springer. Nature, 2020. 270 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39119-5>.
32. Saleem T.J., Chrishti M.A. Big Data Analytics for Internet of Things. Hoboken: John Wiley & Sons, 2021. 400 p.
33. The Internet of Things and Big Data analytics: Integrated platforms and industry use cases / P. Raj, T. Poongodi, B. Balusamy, M. Khari. Boca Raton: CRC Press, 2020. 338 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003036739>.
34. Sunhare P., Chowdhary R.R., Chattopadhyay M.K. Internet of things and data mining: An application oriented survey. *Journal of King Saud University – Computer and Information Science*. 2022. Vol. 34, iss. 6(B). Pp. 3569-3590. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.07.002>.
35. Shadroo S., Rahmani A.M. Systematic survey of big data and data mining in internet of things. *Computer Networks*. 2018. Vol. 139. Pp. 19-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.com-net.2018.04.001>.
36. Andersen D.L., Ashbrook C.S.A., Karlborg N.B. Significance of big data analytics and the internet of things (IoT) aspects in industrial development, governance and sustainability. *International Journal of Intelligent Networks*. 2020. Vol. 1. Pp. 107-111. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2020.12.003>.

References:

1. Klopov I., Shapurov A. The internet of things and big data: real-time analysis. *Scientific View: Economics and Management*, 2022, vol. 2, no. 78, pp. 156-163. doi: <https://doi.org/10.32836/2521-666X/2022-78-22>. (Ukr.)
2. Zhurakovskii B.Iu., Zeniv I.O. *Internet of things technologies*. Kyiv, KPI im. Igoria Sikors'kogo Publ., 2021. 271 p. Available at: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/42078/1/Zhurakovskiy_B_Zeniv_Tehnologii_internet_rechey.pdf (Accessed 03 December 2022). (Ukr.)
3. Rani S., Bhambri P., Kataria A., Khang A., Sivaraman A.K. *Big Data, Cloud Computing and IoT: Tools and Applications*. Boca-Raton, CRC Press Publ., 2023. 258 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003298335>.
4. Puleko I.V., Efimenko A.A. *Architecture and technologies of the Internet of things: a study guide*. Zhytomyr, Derzhavnii universitet «Zhitomir'ska politekhnik» Publ., 2022. 234 p. Available at: <https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/8093/%D0%9F%D1%83%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D0%BE.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (Accessed 15 December 2022). (Ukr.)
5. Sadhu P.K., Yanambaka V.P., Abdelgawad A. Internet of Things: Security and solutions survey. *Sensors*, 2022, vol. 22, iss. 19, pp. 7433. doi: <https://doi.org/10.3390/s22197433>.
6. Saravanan V., Anpalagan A., Poongodi T., Khan F. *Securing IoT and Big Data: Next generation intelligence*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2021. 190 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003009092>.
7. Hajjaji Y., Boulila W., Farah I.R., Romdhani I., Hussain A. Big data and IoT-based applications in smart environments: A systematic review. *Computer Science Review*, 2021, vol. 39, pp. 100318. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100318>.
8. Stergiou C., Psannis K.E., Gupta B.B., Ishibashi Y. Security, privacy & efficiency of sustainable Cloud Computing for Big Data & IoT. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2018, vol. 19, pp. 174-184. doi: <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.06.003>.
9. Amanullah M.A., Ariyaluran Habeeb R.A., Nasaruddin F.H., Gani A., Ahmed E., Nainar A.S.M., Md Akim N., Imran M. Deep learning and big data technologies for IoT security. *Computer Communications*, 2020, vol. 151, pp. 495-517. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.01.016>.
10. Chen Y. IoT, cloud, big data and AI in interdisciplinary domains. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2020, vol. 102, pp. 102070. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2020.102070>.
11. Ushakov D., Dudukalov E., Kozlova E., Shatila K. The Internet of Things impact on smart public transportation. *Transportation Research Procedia*, 2022, vol. 63, pp. 2392-2400. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.275>.
12. Ashaari M.A., Singh K.S.D., Abbasi G.A., Amran A., Liebana-Cabanillas F.J. Big data analytics capability for improved performance of higher education institutions in the Era of IR 4.0: A multi-analytical SEM & ANN perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 2021, vol. 173, pp. 121119. doi: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121119>.
13. Hussein A.R.H. Internet of Things (IOT): Research challenges and future applications. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2019, vol. 10, iss. 6, pp. 77-82. doi: <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100611>.
14. Miraz M.H., Ali M., Excell P.S., Picking R. Internet of nano-things, things and everything: Future growth trends. *Future Internet*, 2018, vol. 10, iss. 8, pp. 1-28. doi: <https://doi.org/10.3390/fi10080068>.
15. Smolin O.I., Oleksiuk V.P. The Internet of Things as a technological phenomenon of the XXI century. *Modern information technologies and innovative teaching methods: experience, trends, perspectives*: Proceedings of IV Int. Sci.-Pract. internet-conf. Ternopil, 2020, pp. 147-149. Available at: http://dspace.tnpu.edu.ua/bitstream/123456789/15393/1/50_Smolyn_Oleksiuk.pdf (Accessed 10 February 2023). (Ukr.)
16. Taylor P. *Data volume of internet of things (IoT) connections worldwide in 2019 and 2025*. 2022. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1017863/worldwide-iot-connected-devices-data-size/> (Accessed 13 October 2022).
17. Sinha S. *State of IoT 2023: Number of connected IoT devices growing 16% to 16.7 billion globally*. 2023. Available at: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> (Accessed 10 January 2023).

18. Samoilenko M. Yu. Principles of application of the internet of things technology in the modern world of technical devices. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2020, vol. 31 (70), p. 1, iss. 6, pp. 142-148. doi: <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.6-1/24>. (Ukr.)
19. Patel K.K., Patel S.M. Internet of things IOT: Definition, characteristics, architecture, enabling technologies, application future challenges. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 2016, vol. 6, iss. 5, pp. 6122-6131. doi: <https://doi.org/10.4010/2016.1482>.
20. Mikalef P., Boura M., Lekakos G., Krogstie J. Big data analytics and firm performance: Findings from a mixed-method approach. *Journal of Business Research*, 2019, vol. 98, pp. 261-276. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.01.044>.
21. Taylor P. *Big data – statistics & facts*. 2023. Available at: <https://www.statista.com/topics/1464/big-data/#topicOverview> (Accessed 28 January 2023).
22. Russim Ph. *Big Data analytics*. The Data Warehousing Institute, 2011. 40 p. Available at: http://download.101com.com/pub/tdwi/Files/TDWI_BPReport_Q411_Big_Data_Analytics_Web.pdf (Accessed 03 January 2023).
23. Shu H. Big data analytics: six techniques. *Geo-spatial Information Science*, 2016, vol. 19, iss. 2, pp. 119-128. doi: <https://doi.org/10.1080/10095020.2016.1182307>.
24. Fosso Wamba S., Akter S., Edwards A., Chopin G., Gnanzou D. How «big data» can make big impact: Findings from a systematic review and a longitudinal case study. *International Journal of Production Economics*, 2015, vol. 165, pp. 234-246. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.12.031>.
25. Welch T.F., Widita A. Big data in public transportation: A review of sources and methods. *Transport Reviews*, 2019, vol. 39, iss. 6, pp. 795-818. doi: <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1616849>.
26. Fischer C., Pardos Z.A., Baker R.S., Williams J.J., Smyth P., Yu R., Slater S., Baker R., Warschauer M. Mining Big Data in education: Affordances and challenges. *Review of Research in Education*, 2020, vol. 44, iss. 1, pp. 130-160. doi: <https://doi.org/10.3102/0091732X20903304>.
27. Iarinich E.Iu., Minailenko R.M. Problems and prospects of IoT technology. *Information security and computer technologies: proceedings of V Int. sci.-pract. internet-conf. Kropyvnytskyi, 2022*, pp. 34. Available at: http://kbpz.kntu.kr.ua/wp-content/uploads/2022/06/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D1%82%D0%B5%D0%B7-2022-1.pdf (Accessed 10 February 2023). (Ukr.)
28. Dash S., Shakyawar S.K., Sharma M., Kaushik S. Big data in healthcare: management, analysis and future prospects. *Journal of Big Data*, 2019, vol. 6, pp. 1-25. doi: <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0217-0>.
29. Cao G., Tian N., Blankson Ch. Big Data, marketing analytics, and firm marketing capabilities. *Journal of Computer Information Systems*, 2022, vol. 62, iss. 3, pp. 442-451. doi: <https://doi.org/10.1080/08874417.2020.1842270>.
30. Osinga S.A., Paudel D., Mouzakitis S.A., Athanasiadis I.N. Big data in agriculture: Between opportunity and solution. *Agricultural Systems*, 2022, vol. 195, pp. 103298. doi: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103298>.
31. Balas V.E., Solanki V.K., Kumar R. *Internet of Things and Big Data applications: Recent advances and challenges*. Cham, Springer. Nature Publ., 2020. 270 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-39119-5>.
32. Saleem T.J., Chrishti M.A. *Big Data Analytics for Internet of Things*. Hoboken, John Wiley & Sons Publ., 2021. 400 p.
33. Raj P., Poongodi T., Balusamy B., Khari M. *The Internet of Things and Big Data analytics: Integrated platforms and industry use cases*. Boca Raton, CRC Press Publ., 2020. 338 p. doi: <https://doi.org/10.1201/9781003036739>.
34. Sunhare P., Chowdhary R.R., Chattopadhyay M.K. Internet of things and data mining: An application oriented survey. *Journal of King Saud University – Computer and Information Science*, 2022, vol. 34, iss. 6(B), pp. 3569-3590. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2020.07.002>.
35. Shadroo S., Rahmani A.M. Systematic survey of big data and data mining in internet of things. *Computer Networks*, 2018, vol. 139, pp. 19-47. doi: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.04.001>.

36. Andersen D.L., Ashbrook C.S.A., Karlborg N.B. Significance of big data analytics and the internet of things (IoT) aspects in industrial development, governance and sustainability. *International Journal of Intelligent Networks*, 2020, vol. 1, pp. 107-111. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijin.2020.12.003>.

Рецензент: Б.Ю. Жураковський
д-р техн. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського

Стаття надійшла 28.02.2023

Стаття прийнята 14.04.2023

УДК 004.9:159.9

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288122

© Марченко І.Ф.¹, Балалаєва О.Ю.², Сергієнко А.В.³, Кіор А.С.⁴

РОЗРОБКА ДОДАТКУ ДЛЯ МОНИТОРИНГУ ПСИХОЛОГІЧНОГО ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ КОГНІТИВНО-ПОВЕДІНКОВОЇ ТЕРАПІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ МОВИ PYTHON ТА БІБЛІОТЕКИ TKINTER

У статті наведено матеріал стосовно моніторингу ментального здоров'я людини з застосуванням сучасних психологічних підходів та інформаційних технологій. Проведено аналіз наявного програмного забезпечення для збору та аналізу даних про психологічний стан людини, її настрій, режим сну, наявність ознак депресії, різного виду розладів тощо. Виявлено, що головним недоліком існуючих програмних продуктів є відсутність сертифікації тестувань та підтвердження використання науково-обґрунтованих методик для інтерпретації отриманих результатів. У роботі представлено власне програмне забезпечення для моніторингу психологічного здоров'я людини, в основу якого покладено методи когнітивно-поведінкової терапії. Продукт реалізовано у форматі desktop-додатку, написаного мовою Python з використанням бібліотеки побудови графічних інтерфейсів Tkinter. Функціональні можливості додатку дозволяють людині проводити попередню самодіагностику для виявлення депресії, САР, ОКР, ПТСР, тривожного та когнітивного розладу, а також використати таблиці СМЕР та нотатник для подальшого самоаналізу. При створенні програми використано об'єктно-орієнтований підхід із застосуванням алгоритмів оптимальної генерації кнопок і генерації опитування за допомогою фреймів. **Ключові слова:** психологічне здоров'я, когнітивно-поведінкова терапія, тестування, додаток, Python, Tkinter, фрейми.

I. Marchenko, O. Balalaieva, A. Serhiienko, O. Kior. Development of an application for monitoring human mental health based on cognitive-behavioral therapy methods using Python and library Tkinter. The article provides material on monitoring a person's mental health using modern psychological approaches and information technologies. IT products in the field of mental health can be implemented as Telegram bots, mobile applications, desktop applications, websites, social networks, etc. An analysis of available software for

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4566-3866, irsa665@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1461-4399, balalaevaev@gmail.com

³ канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1328-2572, sergienko_a_v@pstu.edu

⁴ магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, kior_o_s@pstu.edu

collecting and analyzing data on a person's psychological state, his mood, sleep patterns, the presence of signs of depression, various types of disorders, etc. was carried out. It was revealed that the main drawback of the existing software products is the lack of certification of tests and confirmation of the use of scientifically based methods for the interpretation of the obtained results. The work presents its own software for monitoring a person's mental health, which is based on the methods of cognitive-behavioral therapy. The product is implemented in the format of a desktop application written in Python using standard GUI library Tkinter and additional libraries CustomTkinter and, TTKBOOTSTRAP. The main purpose of the developed software product is to allow the user to monitor his own psychological health, including tracking mood, anxiety level, emotional state, stress level, sleep quality, etc. The app also provides helpful tips and advice on maintaining mental health and reducing stress. Functional capabilities of the application allow a person to conduct preliminary self-diagnosis to detect depression, SAD, OCD, PTSD, anxiety and cognitive disorder, as well as use SMER tables and a notebook for further self-analysis. When creating the program, an object-oriented approach was used with the use of algorithms for optimal button generation and survey generation using frames. To test the developed software and the mathematical model that underlies it, experimental studies were carried out in real time on the recognition of gestures of the sign language.

Keywords: *mental health, cognitive behavioral therapy, testing, application, Python, Tkinter, frames.*

Постановка проблеми. Одним з найактуальніших проблем сучасного суспільства є підтримання психологічного здоров'я, адже це є важливою складовою загального здоров'я людини, на яку звертається найменше уваги. Здорова психіка допомагає людині створити позитивний психологічний клімат у родині та колективі, бути успішною та розвиватися, а також отримувати задоволення від життя в цілому. На жаль, у багатьох країнах через певні переконання цієї тематиці не прийнято приділяти необхідної уваги, що призводить до виникнення психологічних травм та передачі такого травмуючого досвіду дітям у процесі виховання.

Наразі проблема ментального здоров'я вкрай актуальна для громадян України, які постраждали від повномасштабного вторгнення РФ та наслідків бойових дій. Ситуація ускладнюється тим, що у нашому суспільстві не сформувалася звичка звернення за психологічною допомогою до відповідних фахівців. За даними останніх соціологічних досліджень, лише 8% українців налаштовані на регулярне проходження терапії. Крім того, послуги якісних психологів доступні не усім категоріям населення з матеріальної точки зору.

Одним з варіантів вирішення наявної проблеми є використання інформаційних технологій, а саме різноманітних додатків для проведення первинної психологічної діагностики. Такий підхід сприятиме популяризації культури психологічного здоров'я, а також дозволить залучити представників вікового діапазону від 30 років до психологічного самоаналізу. Крім того, результати таких тестувань можуть бути у нагоді при першому зверненні до психотерапевта.

Наразі існують чотири основні напрямки у психології для роботи з людиною: психоаналіз, гештальт-терапія, когнітивно-поведінкова терапія та схема-терапія. У роботі було прийнято рішення працювати саме з когнітивно-поведінковим підходом (КПТ), який фокусується на аналізі впливу думок, переконань та відносин на почуття та поведінку людини. Цей підхід базується на конкретних протоколах діагности психологічного здоров'я та проведенні подальшої терапії, дозволяє підвищити точність виявлення когнітивних викривлень.

Метою даної роботи є розробка програмного продукту для моніторингу психологічного здоров'я людини на основі методів КПТ для проведення первинного психологічного самообстеження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливість моніторингу психічного стану людини знайшла своє відображення в Концепції розвитку охорони психічного здоров'я в Україні на період до 2030 року, яка була прийнята у січні 2017 року та окреслює основні напрямки надання допомоги особам з психологічними розладами та їхнім родинам [1-3]. Концепція передбачає вихід послуг з охорони психічного здоров'я за межі лікарень та диспансерів. Оптимальну комбінацію таких заходів запропоновано у вигляді піраміди ВООЗ, основою якої є самопомога як неформальна складова системи охорони здоров'я. Особлива увага звертається на те, що

самодопомога стає найефективнішою лише за підтримки її на інших рівнях піраміди. До неформальних послуг у цій сфері можна віднести онлайн-курси та електронні посібники з самопомоги. Наприклад, у рамках проекту «Психічне здоров'я для України» (MH4U) [4], що здійснюється за підтримки Швейцарії, видано посібник «Mental Trek», який розрахований на формування у молоді правил поведінки, що допоможуть зберегти їхнє ментальне здоров'я [5]. Також у 2022 році в Україні опубліковано електронний довідник «Травматичні події: психологічна підтримка та самодопомога» [6], але він перш за все розрахований на використання фахівцями допоміжних професій соціальної сфери. У цілому такий підхід вимагає великих витрат часу та глибокого занурення людини у теоретичний матеріал та детальне вивчення складних методик моніторингу психологічного стану, що не є оптимальним варіантом вирішення проблеми.

На сьогоднішній день існує понад десятка тисяч різноманітних мобільних пристроїв для аналізу психологічного здоров'я, що використовують вбудовані датчики для збору та обробки інформації про поведінку людини, а також надання рекомендацій або оперативної допомоги у разі необхідності [7]. Дані, отримані з датчиків (рухи, тембр голосу, тиск, пульс, дихання), дозволяють оперативно розпізнати зміни в поведінці людини, нагадати про необхідність прийому ліків або зв'язатися з лікарем у разі критичного стану. Недоліком таких мобільних пристроїв є достатньо висока ціна покупки та технічної підтримки, питання конфіденційності даних, отриманих від користувача, а також відсутності інформації щодо методик, які використовуються для видачі рекомендацій. Такі прилади найчастіше розраховані на допомогу людям з серйозними психічними захворюваннями, що потребують лікарського нагляду, і рідко використовуються для самодіагностики та боротьби зі стресом, тривогою та розладами сну на ранніх етапах.

Популярними програмами для моніторингу психологічного здоров'я, що можуть використовуватися будь-якою людиною, є інструменти відстеження настрою. Прикладами таких онлайн-сервісів є Mood Tracker, eMoods, Moodfit, Sanvello [8, 9], які на основі реєстрації подій протягом визначеного інтервалу часу аналізують отримані дані та шукають «тригери». Такі програми часто використовують алгоритми машинного навчання, можуть надавати рекомендації та нагадування, а також дозволяють вести щоденники або журнали настрою, будувати та зберігати графіки настрою тощо. Це надає можливість проаналізувати чинники, що впливають на зміну настрою, та у подальшому підтримувати емоційну стабільність. Аналогічні прикладення існують для відстеження, наприклад, режиму сну. Недоліком таких програмних застосунків є необхідність відстеження настрою протягом деякого проміжку часу для отримання достовірних результатів, тобто неможливість моментального визначення поточного стану. Крім того, зазвичай велика частина розширеного функціоналу є платною, що зменшує аудиторію користувачів такого продукту.

Основною метою більшості існуючих програм та додатків у сфері психологічного здоров'я є допомога людям у розвитку психологічної стійкості, управлінні стресом та тривожністю, підвищенні самоповаги та самооцінки, покращенні стосунків з оточуючими тощо. Серед функцій, що найчастіше використовуються у таких додатках, виділяють наступні:

- тестування та аналіз – перевірка рівня тривожності та стресу, поради щодо покращання психологічного стану;
- візуалізація та медитація – зосередження на позитивних емоціях та зняття стресу;
- інтерактивні вправи та ігри – покращання психологічного стану в ігровій формі або з використанням симуляцій;
- професійна допомога – онлайн-консультації з психологом.

Аналіз ІТ-продуктів у сфері психологічного здоров'я показав, що вони можуть бути реалізовані як телеграм боти, мобільні додатки, desktop-прикладення, сайти, соціальні мережі тощо. На сьогоднішній день велику популярність набувають різноманітні боти, які допомагають людям впоратися з тривогою та стресом, спираючись у своїй роботі на науково-обґрунтовані підходи у психології (КІПТ). Такі боти можуть, як варіант, на прикладах із життя розбирати механізми створення тривоги, а також пропонувати користувачу десятки вправ та технік, у тому числі й медитації. Відомі такі англійські чат-боти, як ELIZA, Woebot, Wysa [10, 11], але неможливість подолання мовного бар'єру робить їх вкрай незручними для україномовних користувачів. В Україні в 2022 році створено телеграм бота «Друг. Перша допомога», який на основі відповідей на поставлені запитання може запропонувати вправи для на заспокоєння і надати рекомендації для подолання стресової ситуації [12]. Перевагою цього бота є україномовний та англійський

інтерфейси. Але такий продукт призначений для вирішення тільки однієї задачі – подолання стресу, тому не може бути застосований для діагностики депресії та різних розладів.

Широке розповсюдження отримали різноманітні онлайн-сервіси, що містять популярні психологічні тести, у тому числі на виявлення депресії, тривожності, імпульсивності тощо [13]. Англійські веб-додатки містять одразу більше тисячі психологічних тестів, але для переважної більшості користувачів вони не підходять через відсутність можливості змінити мову тестування. Недоліком використання більшості онлайн-платформ для тестування є неможливість перевірити, на яких загальноновизначених методиках дослідження психологічного здоров'я базуються запропоновані тести, що ставить під сумнів достовірність отриманих результатів.

Таким чином, головним недоліком наявного програмного забезпечення є відсутність сертифікації тестувань та підтвердження використання науково-обґрунтованих методик для інтерпретації отриманих результатів. Вітчизняне або локалізоване для українського користувача програмне забезпечення зазвичай містить обмежений перелік тестувань саме за напрямом ментального здоров'я у порівнянні з англійськими аналогами. Зазвичай існуюче програмне в безкоштовних версіях має обмежений функціонал (наприклад, відсутність можливості робити нотатки). Крім того, розглянуті програмні аналоги не передбачали використання таблиці СМЕР (Ситуація – Мислення – Емоції – Реакції), яка була би зручним інструментом для когнітивно-поведінкової терапії.

Виклад основного матеріалу. У даній статті представлено розроблене програмне забезпечення для моніторингу психологічного здоров'я людини, в основу якого покладено науково-обґрунтовані методи когнітивно-поведінкової терапії.

Продукт реалізовано у форматі desktop-додатку, написаного мовою Python з використання бібліотеки побудови графічних інтерфейсів Tkinter, а також додаткових бібліотек CustomTkinter та TTKBOOTSTRAP, що є розширенням стандартної бібліотеки Tkinter і дозволяє створювати більш сучасний та естетичний дизайн для інтерфейсу користувача.

Додаток розроблено у програмному середовищі PyCharm від компанії JetBrains. В якості системи контролю версій використано GitHub, а для менеджменту розробки – застосунок Notion.

Інтерфейс розробленої програми «FoxMental» наведено на рис. 1.

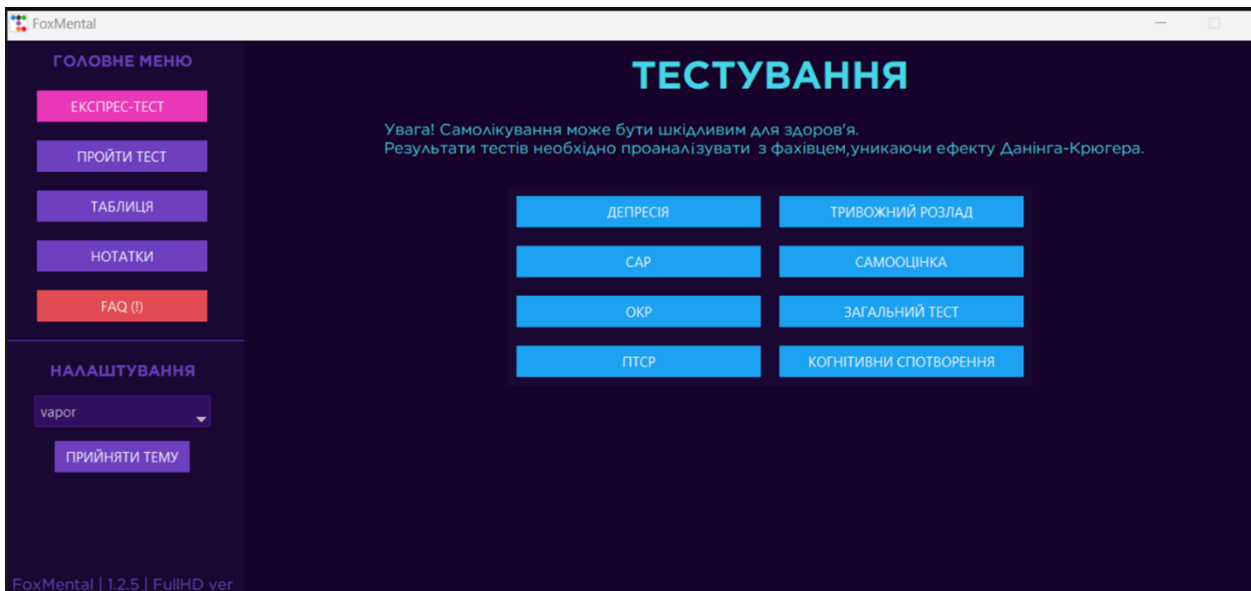


Рис. 1 – Інтерфейс додатку «FoxMental» та вибір тестування

Основним призначенням розробленого програмного продукту є можливість здійснення користувачем моніторингу власного психологічного здоров'я, у тому числі відстеження настрою, рівня тривоги, емоційного стану, рівня стресу, якості сну тощо. Додаток також надає корисні поради та рекомендації щодо збереження ментального здоров'я та зменшення стресу.

Функціональні можливості розробленого програмного прикладення передбачають:

- 1) проходження тестувань для виявлення наступних розладів:
 - депресії;
 - сезонно-афективного розладу (САР);
 - obsesивно-компульсивного розладу (ОКР);
 - посттравматичного стресового розладу (ПТСР);
 - тривожного розладу;
 - когнітивних спотворень;
- 2) проходження тестування на самооцінку;
- 3) проходження загального тесту;
- 4) використання таблиці СМЕР;
- 5) ведення нотатків.

Таблиця СМЕР, приклад якої наведено на рис. 2, є зручним інструментом когнітивно-поведінкової терапії, що допомагає людині розібратися у власних емоціях та думках стосовно конкретної життєвої ситуації.

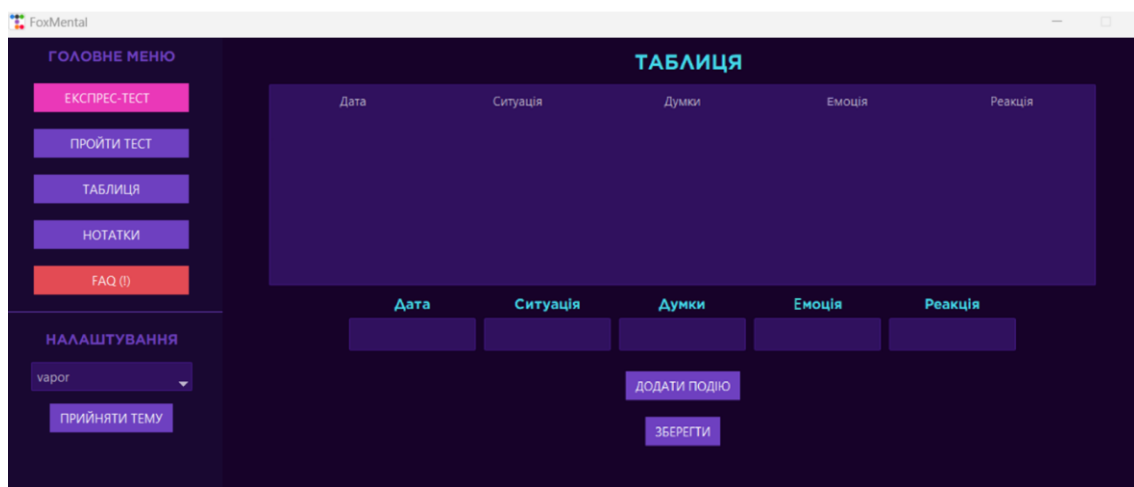


Рис. 2 – Таблиця СМЕР

Ця таблиця має чотири колонки:

- «Ситуація» – описує життєву ситуацію, в якій людина відчуває дискомфорт або негативні емоції;
- «Мислення» – описує думки та переконання, які виникають у людини у зв'язку з цією ситуацією;
- «Емоції» – допомагає людині описати, які саме емоції вона відчуває в даній ситуації (почуття тривоги, страху, розчарування, злості тощо);
- «Реакції» – допомагає людині розібратися, які саме дії або реакції вона виявляє у відповідь на дану ситуацію, а також як вони впливають на її емоції та думки.

Розглянемо детальніше реалізацію тестування у запропонованому додатку, що проілюстровано на рис. 3.

Крок 1. Вибір тесту шляхом натискання кнопки з відповідною назвою (депресія, тривожний розлад, ОКР, САР тощо).

Крок 2. Генерація опитування:

- а) звернення до словника;
- б) звернення до списку словника;
- в) візуальна генерація питання відносно кнопки;

Крок 3. Підрахунок відміток.

Крок 4. Виведення результатів (три варіанти) відносно кількості відміток.



Рис. 3 – Етапи проведення тестування

Основні принципи генерації меню та опитування проілюстровано на рис. 4.

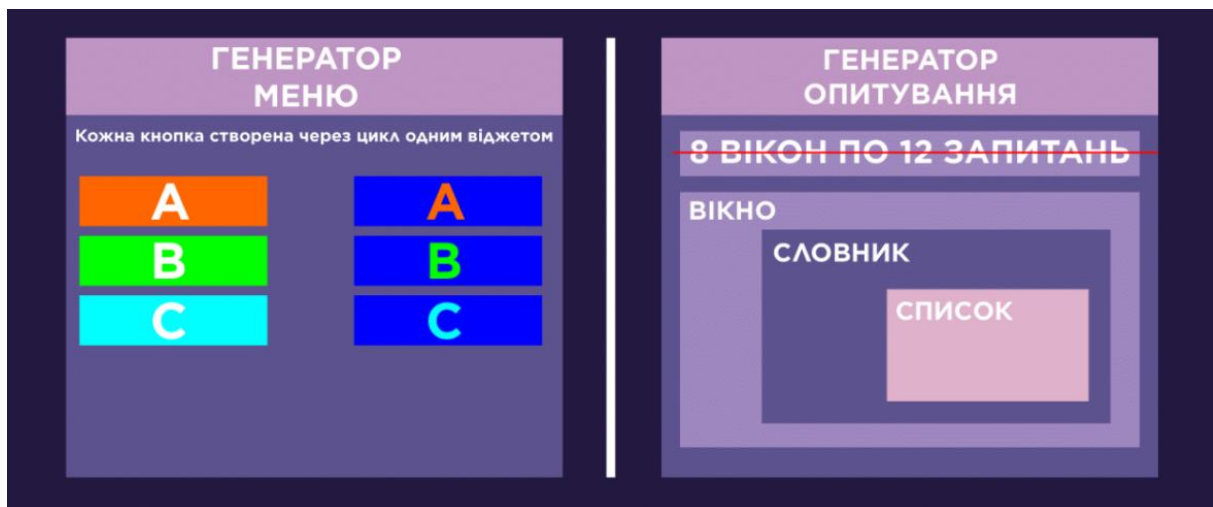


Рис. 4 – Принципи генерації меню та опитування

При створенні додатку було використано об'єктно-орієнтований підхід. MainRoot – головне вікно програми, яке включає у себе усі основні фрейми та метод виклику додаткового вікна для проходження тестування (клас-нащадок від Window). TestingWindowFrame – другорядне вікно програми, яке автоматично генерується при натисканні будь-якої кнопки тестування у TestQuestionsFrame (клас-нащадок від Frame). NoteBookFrame – фрейм із віджетом «Блокнот». TableFrame – фрейм, у якому реалізовано таблицю СМЕР та поля введення даних.

Алгоритм оптимальної генерації кнопок TestQuestionsFrame (рис. 5) передбачає їх розміщення у вигляді таблиці за допомогою методу grid(). Алгоритм запуску тестування реалізовано у функції Tests_Main_Logic, де у циклі перевіряється, чи співпадає текст на кнопці з елементом зі списку self.variants_list. У разі співпадіння створюється новий об'єкт класу TestingFrame, передаючи йому значення тексту кнопки в якості аргументу. Після цього викликається метод mainloop(), який запускає головний цикл подій вікна TestingFrame, що дає можливість користувачеві взаємодіяти зі створеним вікном тестування.

Фрагмент коду програми для реалізації алгоритму оптимальної генерації кнопок наведено на рис. 5.

```
# Button Buildings Loop
self.r, self.c = 0, 0
for i in range(0, 8):
    button = tkb.Button(self.Frame_For_Buttons bootstyle='info' text=self.variants_list[i], width=30)
    button.config(command=lambda button=button: self.Tests_Main_Logic(button))
    button.grid(row=self.r, column=self.c, padx=10, pady=10)
    self.r += 1
    if self.r == 4:
        self.c += 1
        self.r = 0

def Tests_Main_Logic(self, button):
    for i, test in enumerate(self.variants_list):
        if self.variants_list[i] == button["text"]:
            test = twf.TestingFrame(self.variants_list[i])
            test.mainloop()
```

Рис. 5 – Фрагмент коду програми для реалізації алгоритму оптимальної генерації кнопок

Алгоритм генерації питань в тестуванні представляє собою цикл, який проходить по ключах та значеннях у словнику TEST_DATABASE, який містить питання для різних тестів, та виявляє, чи збігається назва тесту в словнику з назвою поточного тесту self.test_title. Якщо назва збігається, то для кожного питання у списку питань цього тесту створюється змінна типу IntVar(), яка використовується для збереження стану прапорця та додається до списку self.vars. Далі створюється прапорець Checkbutton з текстом поточного питання, а також параметрами. Checkbutton додається у вікно за допомогою методу grid().

Фрагмент коду для реалізації алгоритму генерації опитування наведено на рис. 6.

```
for test, questions in tdb.TEST_DATABASE.items():
    if test == self.test_title:
        i = 0
        for question in questions:
            var = tkb.IntVar()
            self.vars.append(var)
            tkb.Checkbutton(self.questions_frame bootstyle='primary', variable=var, text=question, offvalue=0, onvalue=1).grid(row=i, column=1, padx=10, pady=6, sticky="w")
            i += 1
        print(i)
```

Рис. 6 – Фрагмент коду програми для реалізації алгоритму генерації опитування

Приклад роботи програми наведено на рис. 7, де продемонстровано результати тестування на наявність депресії (а) та тривожного розладу (б).

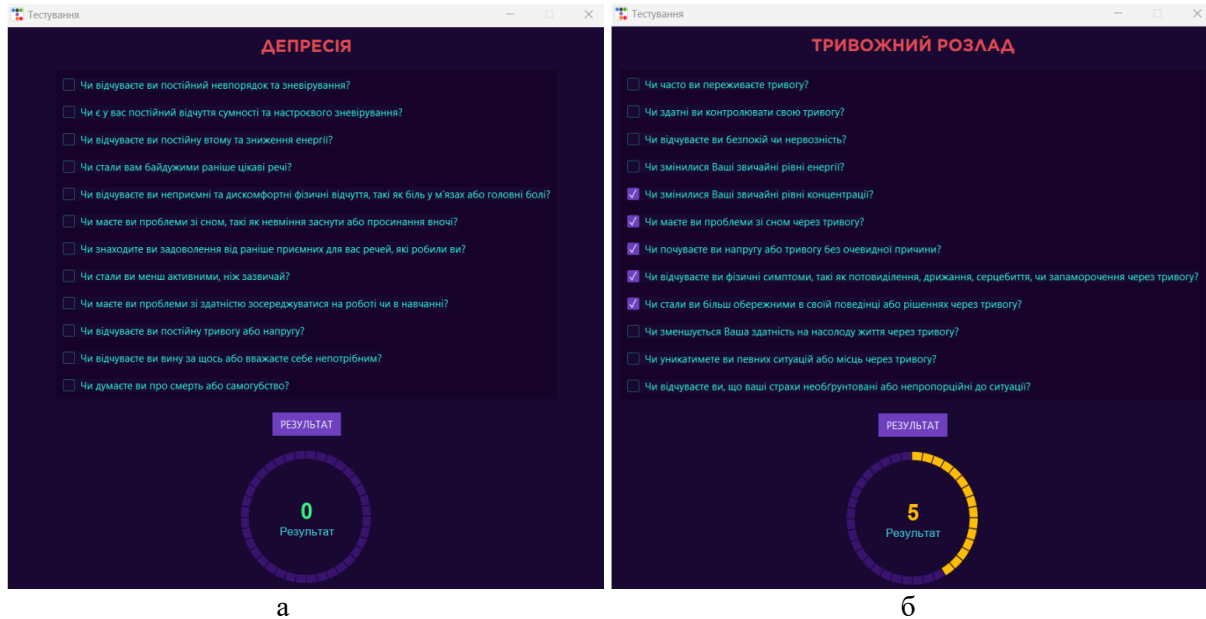


Рис. 7 – Результати тестування на наявність депресії (а) та тривожного розладу (б)

Висновки

Таким чином, розроблено програмне забезпечення для моніторингу психологічного здоров'я на основі методів когнітивно-поведінкової терапії. Додаток реалізовано з використанням бібліотеки для побудови графічних інтерфейсів Tkinter. Функціональні можливості додатку передбачають проходження тестувань для виявлення депресії, САР, ОКР, ПТСР, тривожного та когнітивного розладу, тестування на самооцінку та загального тестування, а також використання таблиці СМЕР та нотатника. Прикладення розроблено на мові Python з використанням об'єктно-орієнтованого підходу. Реалізовано алгоритми оптимальної генерації кнопок та генерації опитування з використанням фреймів.

Перелік використаних джерел:

1. Про схвалення Концепції розвитку охорони психічного здоров'я в Україні на період до 2030 року: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2017 р. № 1018-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1018-2017-%D1%80#n8>.
2. Бойко О.М., Кабаченко Н.В. Соціальна робота у сфері психологічного здоров'я в Україні / О.М. Бойко. *Науковий Вісник Ужгородського університету. Серія: Педагогіка, соціальна робота*. 2020. №2 (47). С. 23-27. DOI: <https://doi.org/10.24144/2524-0609.2020.47.23-27>.
3. Чорна В.В. Детермінація психічного здоров'я населення в Україні та країнах ЄС. *Environment & Health*. 2020. № 2. С. 47-53. DOI: <https://doi.org/10.32402/dovkil2020.02.047>.
4. Motruk D. Стартував українсько-швейцарський проект «Психічне здоров'я для України». *Ліки України*. 2020. № 5(241). С. 47-48. DOI: [https://doi.org/10.37987/1997-9894.2020.5\(241\).214043](https://doi.org/10.37987/1997-9894.2020.5(241).214043).
5. Mental Trek. Посібник для фасилітування інтерактивної освітньої виставки. Методичні рекомендації щодо використання інтерактивного освітнього інструменту для навчання молоді правилам поведінки, яка допоможе їм дбати про власне психічне благополуччя. Київ, ГО «Альянс за громадянські права», 2022. 113 с. URL: https://www.mh4u.in.ua/wp-content/uploads/2022/06/posibnyk-2022-final.pdf?fbclid=IwAR1ZOgnCfWxhq_n-oB-hppjNjf1rJT5rn1s96rMhlfJxDUp6Mxk-fOfdkyFQ.
6. Травматичні події: психологічна підтримка та самопоміа. Довідник для фахівців і фахівчинь допоміжних професій соціальної сфери, які працюють з внутрішньо переміщеними особами та постраждалим населенням. Рада Європи, 2022. URL: <https://rm.coe.int/traumatic-events-ukr-/1680a765d4>.

7. Sazanova L.S. Modern technologies and the future of mental health treatment. *Психічне здоров'я особистості у кризовому суспільстві*: матеріали VII Всеукр. наук.-практ. конф. Львів, 2022. С. 315-317. URL: <https://dspace.univd.edu.ua/items/2302b0d4-da07-4ee6-ace6-0af2e22df22d>.
8. Apps for mental health: an evaluation of behavior change strategies and recommendations for future development / F.H. Alqahtani, G. Alkhalifah, O. Oyeboode, R. Orji. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2019. Vol. 2. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.3389/frai.2019.00030>.
9. Self-guided cognitive behavioral therapy apps for depression: systematic assessment of features, functionality, and congruence with evidence / L. Martinengo, A.C. Stona, K. Griva, P. Dazzan, C.M. Pariante, F. Wangenheim, J. Car. *Journal of Medical Internet Research*. 2020. Vol. 23(7). Article e27619. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.2196/27619>.
10. To chat or bot to chat: Ethical issues with using chatbots in mental health / S. Coghlan, K. Leins, S. Sheldrick, M. Cheong, P. Gooding, S. D'Alfonso. *Digital Health*. 2023. Vol. 9(2). Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1177/20552076231183542>.
11. Koulouri T., Macredie R.D., Olakitan D. Chatbots to Support Young Adults' Mental Health: An Exploratory Study of Acceptability. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*. 2022. Vol. 12(2). Article 11. Pp. 1-39. DOI: <https://doi.org/10.1145/3485874>.
12. Сочко М., Салата Н. Цифрове забезпечення соціально-психологічної допомоги вразливим категоріям населення. *Social Work and Education*. 2020. Vol. 9, № 4. С. 478-486. DOI: <https://doi.org/10.25128/2520-6230.22.4.3>.
13. Validation of online psychometric instruments for common mental health disorders: a systematic review / W. Ballegooijen, H. Riper, P. Cuijpers, P. Oppen, J.H Smit. *BMC Psychiatry*. 2016. Vol. 16. Article 45. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12888-016-0735-7>.

References:

1. Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 27.12.2017 No. 1018-p. *On the approval of the Concept of Mental Health Care Development in Ukraine for the period until 2030*. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1018-2017-%D1%80#n8> (accessed 10 November 2022). (Ukr.)
2. Boiko O.M. Kabachenko N.V. Social work in mental health in Ukraine: current challenges. *Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: Pedagogy, social work*, 2022, no. 4(47), pp. 23-27. doi: <https://doi.org/10.24144/2524-0609.2020.47.23-27>. (Ukr.)
3. Chorna V.V. Determination of mental health in the population of Ukraine and EU Countries. *Environment & Health*, 2020, no. 2, pp. 47-53. doi: <https://doi.org/10.32402/dovkil2020.02.047>.
4. Motruk D. The Ukrainian-Swiss project «Mental Health for Ukraine» was launched. *Medicines of Ukraine*, 2020, no. 5(241), pp. 47-48. doi: [https://doi.org/10.37987/1997-9894.2020.5\(241\).214043](https://doi.org/10.37987/1997-9894.2020.5(241).214043). (Ukr.)
5. Mental Trek. *A guide to facilitating an interactive educational exhibition. Methodological recommendations for the use of an interactive educational tool for teaching young people the rules of behavior that will help them take care of their own mental well-being*. Kyiv, Al'yans za hromadyans'ki prava Publ., 2022. 113 p. Available at: https://www.mh4u.in.ua/wp-content/uploads/2022/06/posibnyk-2022-final.pdf?fbclid=IwAR1ZOgnCfWxhq_n-oB-hppjNJf1rJT5rn1s96rMhlFJxDUp6Mxk-fOfdkyFQ (accessed 10 January 2023). (Ukr.)
6. *Traumatic events: psychological support and self-help. Handbook for specialists and specialists in auxiliary professions of the social sphere who work with internally displaced persons and the affected population*. Council of Europe, 2022. Available at: <https://rm.coe.int/traumatic-events-ukr-/1680a765d4> (accessed 10 February 2023). (Ukr.)
7. Sazanova L.S. Modern technologies and the future of mental health treatment. *Proceedings of Ukr. Sci.-Techn. Conf. «Mental health of the individual in a crisis society»*. Lviv, 2022, pp. 315-317. Available at: <https://dspace.univd.edu.ua/items/2302b0d4-da07-4ee6-ace6-0af2e22df22d> (accessed 25 January 2023).
8. Alqahtani F.H., Alkhalifah G., Oyeboode O., Orji R. Apps for mental health: an evaluation of behavior change strategies and recommendations for future development. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 2019, vol. 2, pp. 1-11. doi: <https://doi.org/10.3389/frai.2019.00030>.
9. Martinengo L., Martinengo L., Stona A.C., Griva K., Dazzan P., Pariante C.M., Wangenheim F., Car J. Self-guided cognitive behavioral therapy apps for depression: systematic assessment of

- features, functionality, and congruence with evidence. *Journal of Medical Internet Research*, 2020, vol.23(7), article e27619, pp. 1-17. doi: <https://doi.org/10.2196/27619>.
10. Coghlan S., Coghlan S., Leins K., Sheldrick S., Cheong M., Gooding P., D'Alfonso S. To chat or bot to chat: Ethical issues with using chatbots in mental health. *Digital Health*, 2023, vol. 9(2), pp. 1-11. doi: <https://doi.org/10.1177/20552076231183542>.
 11. Koulouri T., Macredie R.D., Olakitan D. Chatbots to Support Young Adults' Mental Health: An Exploratory Study of Acceptability. *ACM Transactions on Interactive Intelligent Systems*, 2022, vol. 12(2), article 11, pp. 1-39. <https://doi.org/10.1145/3485874>.
 12. Skochko M., Salata N. Digital provision of social and psychological assistance to vulnerable categories of the population. *Social Work and Education*, 2022, vol. 9, no. 2, pp. 478-486. doi: <https://doi.org/10.25128/2520-6230.22.4.3>. (Ukr.)
 13. Ballegooijen W., Riper H., Cuijpers P., Oppen P. Smit J.H. Validation of online psychometric instruments for common mental health disorders: a systematic review. *BMC Psychiatry*, 2016, vol. 16(45), pp. 1-12. doi: <https://doi.org/10.1186/s12888-016-0735-7>.

Рецензент: О.І. Проніна
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 28.02.2023
Стаття прийнята 14.04.2023

УДК 004.9:658.818

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288123

© Марченко І.Ф.¹, Балалаєва О.Ю.², Сергієнко А.В.³, Таразанов М.О.⁴

РОЗРОБКА ВЕБОРІЄНТОВАНОГО ДОДАТКУ ДЛЯ ОРГАНІЗАЦІЇ РОБОТИ СТАНЦІЇ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ

У статті наведено матеріал стосовно оптимізації бізнес-процесів та автоматизації документообігу станцій технічного обслуговування легкових автомобілів з використанням веборієнтованих додатків. Проведено порівняльний аналіз найбільш розповсюджених CRM-систем за такими критеріями, як функціонал, вартість програми, технічна підтримка, інтеграції з іншим програмним забезпеченням, а також особливості впровадження на підприємстві. Виявлено, що адаптація CRM-систем до умов конкретного суб'єкта підприємницької діяльності потребує значних фінансових витрат, що не є доцільним для представників малого бізнесу. Найбільш обґрунтованим рішенням для автоматизації роботи станцій технічного обслуговування є розробка власних вебсайтів з урахуванням особливостей бізнес-процесів кожного підприємства. Розроблено вебдодаток, який дозволяє оптимізувати такі процеси, як ведення облікового запису клієнта та діагностичної карти автомобіля, розподіл та обробка заявок на технічне обслуговування, а також формування архіву заявок та рейтингу працівників на основі відгуків клієнтів. Для розробки використовували мову програмування PHP, бібліотек PHPWord для створення текстових документів та фреймворк з відкритим кодом Bootstrap, базу даних MariaDB та вебінтерфейс

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4566-3866, irsa665@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1461-4399, balalaevaeu@gmail.com

³ канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1328-2572, sergienko_a_v@pstu.edu

⁴ магістр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, tarazanov_m_o@pstu.edu

для її адміністрування *phpMyAdmin*. Додаток створено у програмному середовищі *PhpStorm* від компанії *JetBrains*. Впровадження розробленого програмного забезпечення дозволить покращити процеси роботи з клієнтами та підвищити якість послуг.

Ключові слова: станція технічного обслуговування, вебсайт, вебдодаток, PHP, Bootstrap, PHPWord.

I. Marchenko, O. Balalaieva, A. Serhiienko, M. Tarazanov. Development of a web-based application for organizing the operation of a car service station. *The article provides material on the optimization of business processes and document flow automation of car service stations using web-based applications. This will allow to quickly and accurately diagnose malfunctions, plan and control the work of mechanics, provide quality service and increase customer satisfaction. A comparative analysis of the most common CRM systems was carried out according to such criteria as functionality, cost of the program, technical support, integration with other software, as well as features of implementation at the enterprise. It was found that the adaptation of CRM systems to the conditions of a specific business entity requires significant financial costs, which is not appropriate for small business representatives. The most reasonable solution for automating the operation of maintenance stations is the development of their own websites, taking into account the specifics of the business processes of each enterprise. A web application has been developed that allows you to optimize such processes as maintaining a customer account and car diagnostic card, distributing and processing requests for maintenance, as well as creating an archive of requests and rating employees based on customer feedback. The PHP programming language, the PHPWord library for creating text documents and the Bootstrap framework, the MariaDB database and the web interface for its administration, phpMyAdmin, were used for development. The application was created in the PhpStorm software environment from the JetBrains company. The implementation of the developed software will improve the processes of working with customers and increase the quality of services provided by the technical service station.*

Key words: service station, website, web application, PHP, Bootstrap, PHPWord.

Постановка проблеми. Станом на початок 2023 року кількість легкових автомобілів в Україні за приблизними підрахунками складала 9 мільйонів. Тенденція швидкого зростання кількості автотранспорту підтверджується тим, що за перші 6 місяців поточного року українці витратили понад 1 мільярд євро на придбання легкового автотранспорту. При цьому слід зазначити, що середній вік легкового автомобіля в нашій країні становить 22,7 роки, тобто автопарк України є найстарішим в Європі. Інститут досліджень авторинку наводить дані про 20 тисяч звернень за технічним обслуговуванням у крупних містах країни за один місяць. Вищенаведені дані підтверджують високий попит на послуги станцій технічного обслуговування (СТО) [1, 2], що обумовлює потребу в ефективній системі організації їх роботи, яка б дозволяла швидко та точно діагностувати несправності, планувати та контролювати роботу механіків, забезпечувати якісний сервіс та збільшувати задоволеність клієнтів.

Технічне обслуговування (ТО) автомобілів являє собою комплекс робіт, які проводять з метою підтримання технічної справності транспортного засобу та його безпеки. До таких робіт входять заміна мастила та фільтрів, перевірка стану гальмівної системи, системи охолодження, стану шин та інших вузлів автомобіля. ТО є важливим елементом підтримання надійності та безпеки автомобіля, а також підвищення терміну його експлуатації.

Основними вимогами клієнта при зверненні до СТО є надання йому якісних та професійних послуг з діагностики та ремонту його автомобіля в терміни та за вартість, яку він погодив зі станцією. Важливим аспектом при виборі СТО є можливість отримання клієнтом повної та зрозумілої інформації про стан автомобіля та запропонований план ремонту.

Актуальною проблемою в роботі багатьох СТО, які належать до сфери малого бізнесу, є відсутність автоматизованої системи обліку та контролю за технічним обслуговуванням автомобілів, що призводить до затримок в обслуговуванні та зниженні якості наданих послуг.

Метою статті є розробка програмного продукту для організації роботи СТО легкових автомобілів з метою оптимізації бізнес-процесів та підвищення якості обслуговування клієнтів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Однією з головних вимог ефективної роботи сучасного підприємства, у тому числі й станцій технічного обслуговування, є оптимізація бізнес-процесів та автоматизація документообігу з використанням інформаційних технологій, що дозволить покращити рівень обслуговування клієнтів [3]. На сьогоднішній час управління сервісними потоками є прерогативою в логістиці роботи СТО, при цьому особлива увага приділяється встановленню довгострокових відносин з замовниками (клієнтами) за рахунок впровадження CRM-систем (Customer Relationship Management) [4-5]. Серед переваг впровадження таких програмних продуктів можна виділити автоматизацію процесів збору та зберігання даних про клієнтів, бухгалтерського обліку, аналітики та прогнозування тощо. CRM-системи відрізняються між собою за такими критеріями, як основний функціонал, простота та зручність, вартість програми, її обслуговування та оновлення, технічна підтримка, можливість інтеграції з іншим програмним забезпеченням, а також особливості її впровадження на конкретному СТО.

Авторами [4] проведено оцінювання на основі інтегрального показника для визначення оптимального програмного забезпечення для автоматизації роботи конкретного СТО серед таких CRM, як WORKFLOW SYSTEM, STOCRM, WIRECRM. Крім суттєвих переваг, у дослідженні виділені й такі ризики, як відсутність очікуваного результату та складності при навчанні персоналу роботі з таким програмним забезпеченням.

Авторами [5] проведено порівняльний аналіз таких CRM-систем, як SaleDrive, ServiceCRM, «Парус» із використанням методу експертних оцінок, при цьому за співвідношенням «ціна / загальна оцінка порівняльної характеристики» зроблено висновок щодо доцільності впровадження системи роботи з клієнтами SalesDrive. В якості основних функціональних вимог до CRM-систем виділяють можливість ведення бази даних клієнтів, зручне планування роботи технічних працівників, аналіз ефективності каналів зв'язку з клієнтами, відстеження статистики звернень та формування звітності.

Авторами [6] наведено характеристики таких популярних CRM-систем в Україні, як Sales Creatio, KeyCRM, Microsoft Dynamics 365, KeepinCRM, SalesDrive, OneBox, NetHunt CRM, CleverBox CRM, Perfectum, Onlyoffice, при цьому представлені ІТ-продукти не розраховані на конкретну галузь промисловості, тому потребують адаптації під потреби конкретного підприємства.

Порівнюючи CRM-системи в реалізації десктопних програм та онлайн-додатків, можна виділити як переваги, так і недоліки кожного варіанту. У першому випадку програмний продукт належить підприємству, витрати на його придбання одноразові, а дані зберігають на сервері покупця. У другому випадку замовник сплачує регулярні внески за онлайн-доступ до сервісу, а дані зберігаються на сервері розробника [5, 6]. При використанні онлайн-CRM компанія має ширші можливості налаштування програми під особливості бізнес-процесів у порівнянні з десктоп-CRM.

Аналіз представлених CRM-систем [3-6] показав, що для адаптації таких програмних продуктів (як десктоп-додатків, так і онлайн-сервісів) до роботи конкретного підприємства необхідно залучення досвідчених програмістів. При цьому бізнес-процеси СТО значно відрізняються від бізнес-процесів торгівельних компаній, тому використання «класичних» CRM-систем буде потребувати значних фінансових витрат для переналаштування. Якщо для великих компаній такий підхід може бути обґрунтованим, то для підприємств малого та середнього бізнесу це не є оптимальним рішенням.

Переважна більшість СТО відноситься до сфери малого бізнесу. При цьому слід зауважити, що за даними УНІАН на сьогоднішній день 70% представників малого та середнього бізнесу для надання та просування власних товарів та послуг використовують цифрові канали продажів, з них соціальні мережі – 40 %, власні сайти – 33%. Найчастіше такі підприємства розробляють вебсайти власними силами з використанням конструкторів сайтів, але такий підхід дозволяє отримати шаблонні рішення з обмеженим дизайном та функціоналом, не враховуючи бізнес-процесів конкретного підприємства. Конкурентна перевага невеликих СТО, в основному, базується на якості обслуговування, тому індивідуальний підхід при розробці програмного забезпечення може значно підвищити його конкурентоспроможність [7].

Таким чином, розробка вебдодатку для організації роботи СТО з урахування особливостей бізнес-процесів підприємства для покращення якості надання послуг клієнтам є актуальною задачею.

Виклад основного матеріалу. У даній статті представлено розроблене програмне забезпечення для організації роботи станції технічного обслуговування автомобілів. Продукт реалізовано у форматі вебсайту. При розробці було використано мову програмування PHP, бібліотеку PHPWord для створення текстових документів та фреймворк з відкритим кодом Bootstrap. В якості бази даних (БД) використовувалась MariaDB, а для її адміністрування – вебінтерфейс phpMyAdmin. Додаток розроблено у програмному середовищі PhpStorm. В якості системи контролю версій обрано GitHub. Схема взаємодії програмних модулів приведена на рис. 1.

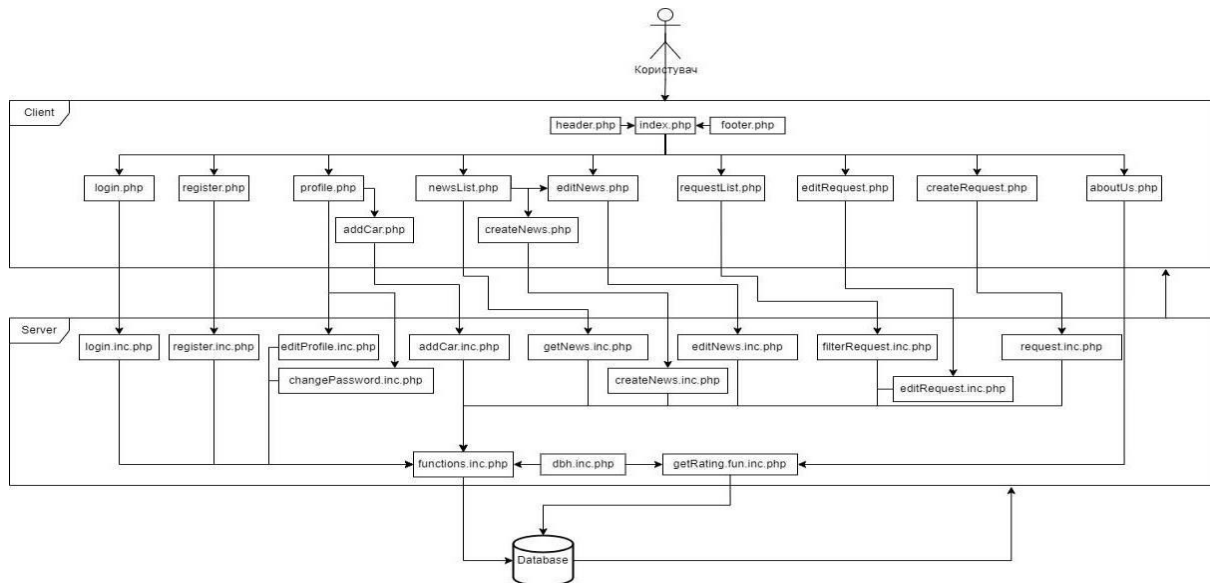


Рис. 1 – Схема взаємодії програмних модулів

Під час використання вебдодатку, користувач взаємодіє з веббраузером, який виступає у ролі Client. На стороні клієнта виводяться сторінки та форми для передачі даних. Ці дані посилаються на Server, де вони обробляються та за допомогою яких формуються SQL-запити до бази даних. Також на сервері обробляються дані, що були отримані з бази даних. Потім вони передаються веббраузеру користувача для подальшого розміщення.

Схема архітектури системи наведена на рис. 2а. Користувач взаємодіє з веббраузером, який виступає у ролі клієнта. Користувач безпосередньо взаємодіє з наступними модулями:

- модуль реєстрації та авторизації;
- модуль роботи з профілем користувача;
- модуль створення та редагування заявок;
- модуль виведення загальної інформації про станції.

Ці модулі здебільшого містять форми для збору даних, які далі пересилаються на сервер, де обробляються за рахунок таких модулів, як модуль обробки даних, модуль роботи з БД та модуль створення дос-фалів. Сервер постійно взаємодіє з БД та передає клієнту оброблену інформацію для відображення.

Діаграма компонентів представлена на рис. 2б. Головний компонент містить файли header та footer, бо вони відображаються на кожній сторінці, а також файл index, котрий є точкою входу до системи. Компонент виведення інформації містить усі сторінки, що відображаються користувачу та містять форми для введення інформації. Компонент бізнес-логіки містить функції для обробки інформації, що була отримана від користувача. Компонент для роботи з базою даних містить інформацію для зв'язку з БД. Діаграма розгортання представлена на рис. 2в.

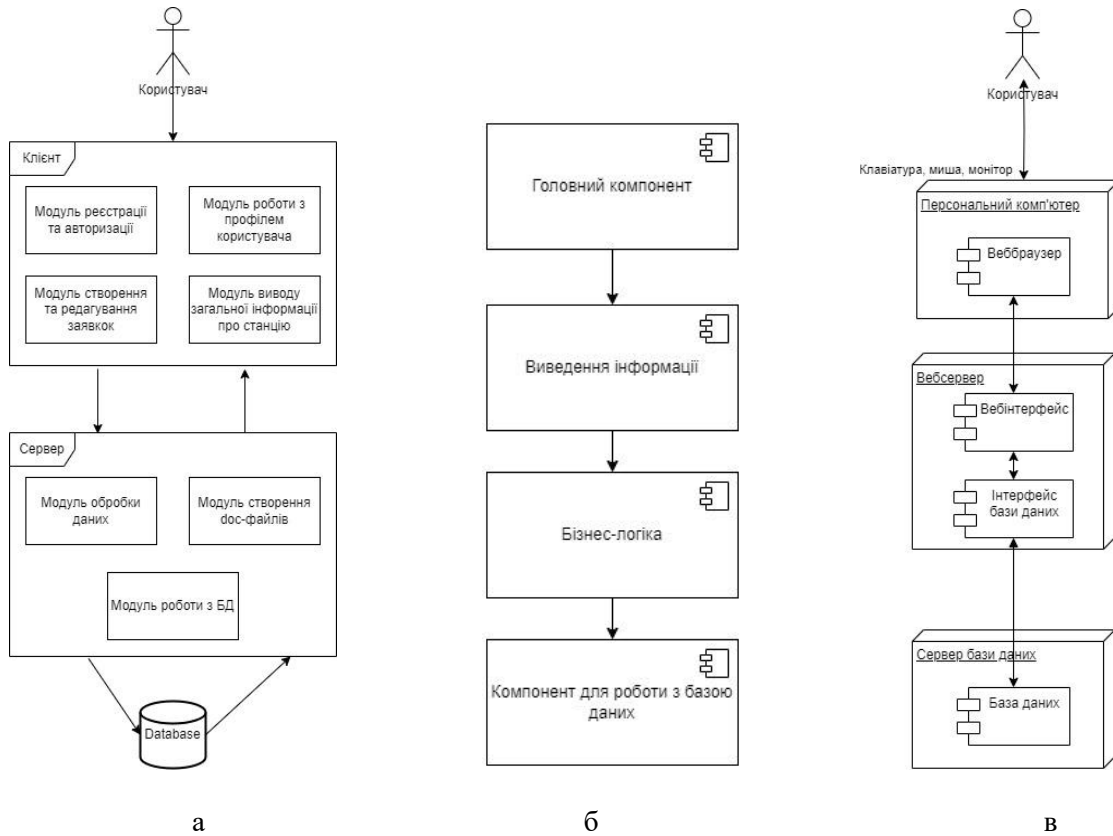


Рис. 2 – Схема архітектури системи (а), діаграма компонентів (б), діаграма розгорнення (в)

Основним призначенням розробленого програмного продукту є організація роботи з клієнтами СТО та оптимізація процесу розподілу заявок на ТО між працівниками станції. Крім того, на сайті представлена сторінка з новинами сервісу та сторінка з інформацією про працівників станції. Головну сторінку сайту приведено на рис. 3.

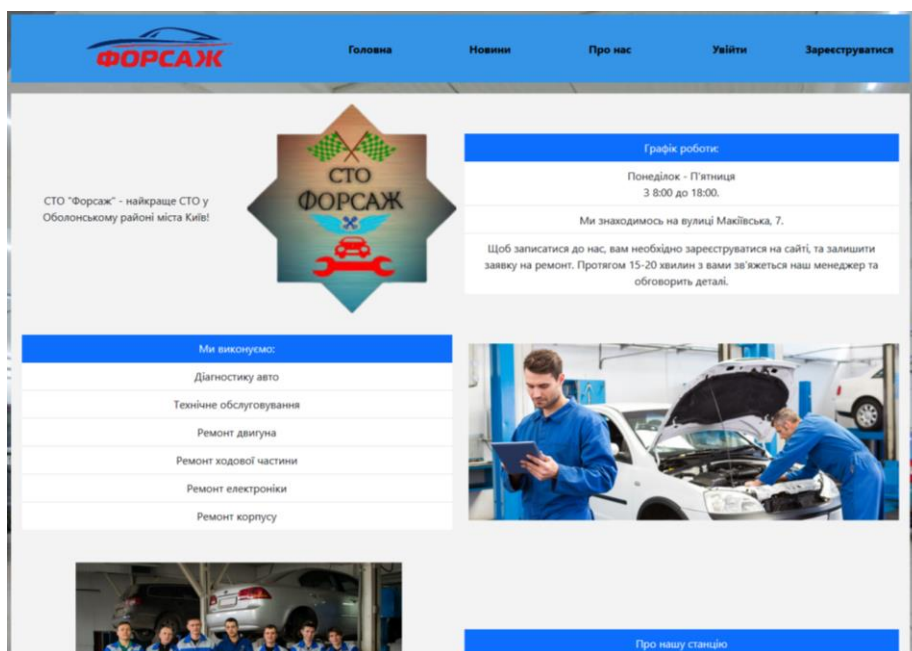


Рис. 3 – Головна сторінка додатку

Розглянемо процес роботи клієнта з додатком, що проілюстровано на рис. 4.

а

Інформація про користувача

Логін

Пароль

Повторіть пароль

ПІБ

Email

Номер телефону

Інформація про автомобіль

Бренд авто

Модель авто

Номер авто

VIN-код

Рік випуску авто

Об'єм двигуна

Коробка передач

Ручна Автоматична

Зареєструватися

в

ПІБ: test user

Номер телефону: 222222228

Email: test@user.com

Номер автомобіля: aa5597gg

Бренд автомобіля: test user auto

Модель автомобіля: test user model

VIN-код: 12345678945612345

Рік випуску авто: 2002

Об'єм двигуна: 3

Коробка передач: manual

Дата створення заявки: 2023-04-26 17:41:16

Тип заявки: diagnostics

Додаткові дані від клієнта:
test user

Статус заявки: complete

Перелік виконаних робіт та використаних запчастин:
test work

Оцінка користувача: 5

б

Авто:

test user auto test user model

Тип обслуговування:

Діагностика

Опишіть вашу проблему

Створити заявку

г

Не оброблені заявки | Оброблені заявки | Активні заявки | Архів

ПІБ: test user

Тип заявки: diagnostics

Дата створення заявки: 2023-04-28 17:56:00

Номер автомобіля: aa5597gg

Бренд автомобіля: test user auto

Модель автомобіля: test user model

Статус заявки: processing

Назначений час: 2023-05-01 05:05:00

Робоче місце: Підйомник 1

Тривалість: 3

Назад | Вперед

Рис. 4 – Форма реєстрації користувача та автомобіля (а), форма подачі заявки (б), форма для перегляду детальної інформації про заявку (в), форма для відстеження статусу заявки (г)

- Крок 1. Реєстрація або авторизація клієнта в системі (рис. 4а).
- Крок 2. Створення заявки на технічне обслуговування (рис. 4б).
- Крок 3. Відстеження статусу заявки: «необроблені», «оброблені», «активні», «архів» (рис. 4г), обговорення деталей з менеджером.
- Крок 4. Ознайомлення з переліком виконаних робіт та використаних запчастин у заявці зі статусом «архів» (рис. 4в), оплата згідно з прайсом.
- Крок 5. Виставлення оцінки за ТО на сайті (за бажанням клієнта).

Функціональні можливості розробленого програмного прикладання передбачають:

- створення та ведення облікового запису клієнта та його авто;
- створення, обробку та розподіл заявок на ТО;
- ведення «діагностичної карти автомобіля», архів заявок;
- формування рейтингу працівників на основі відгуків клієнтів;
- ведення сторінки з новинами СТО.

На сайті СТО пропонується обрати наступні варіанти з переліку послуг:

- діагностика автомобіля;
- технічне обслуговування;
- ремонт двигуна;
- ремонт ходової частини;
- ремонт електроніки;
- ремонт корпусу.

Процес роботи менеджера з додатком передбачає використання наступних опцій:

- перегляд усіх заявок за статусом (необроблені, оброблені, активні, архів), а також їх фільтрація за клієнтом або автомобілем (рис. 5);
- завантаження розкладу для певного робочого місця із зазначенням призначених заявок, щоб знайти вільний час для іншого клієнта;
- перегляд детальної інформації про необроблену заявку, призначення консультації з майстром (за необхідністю), встановлення зв'язку з клієнтом для уточнення інформації та призначення часу прийому та внесення відповідних даних в заявку (рис. 6а);
- генерація файлу заявки та її друк (рис. 6б) та передача її майстру при приїзді клієнта безпосередньо до СТО для ТО;
- перевірка роботи майстра, повідомлення клієнта про завершення ТО, підтвердження оплати наданих послуг і закриття заявки (рис. 6в).

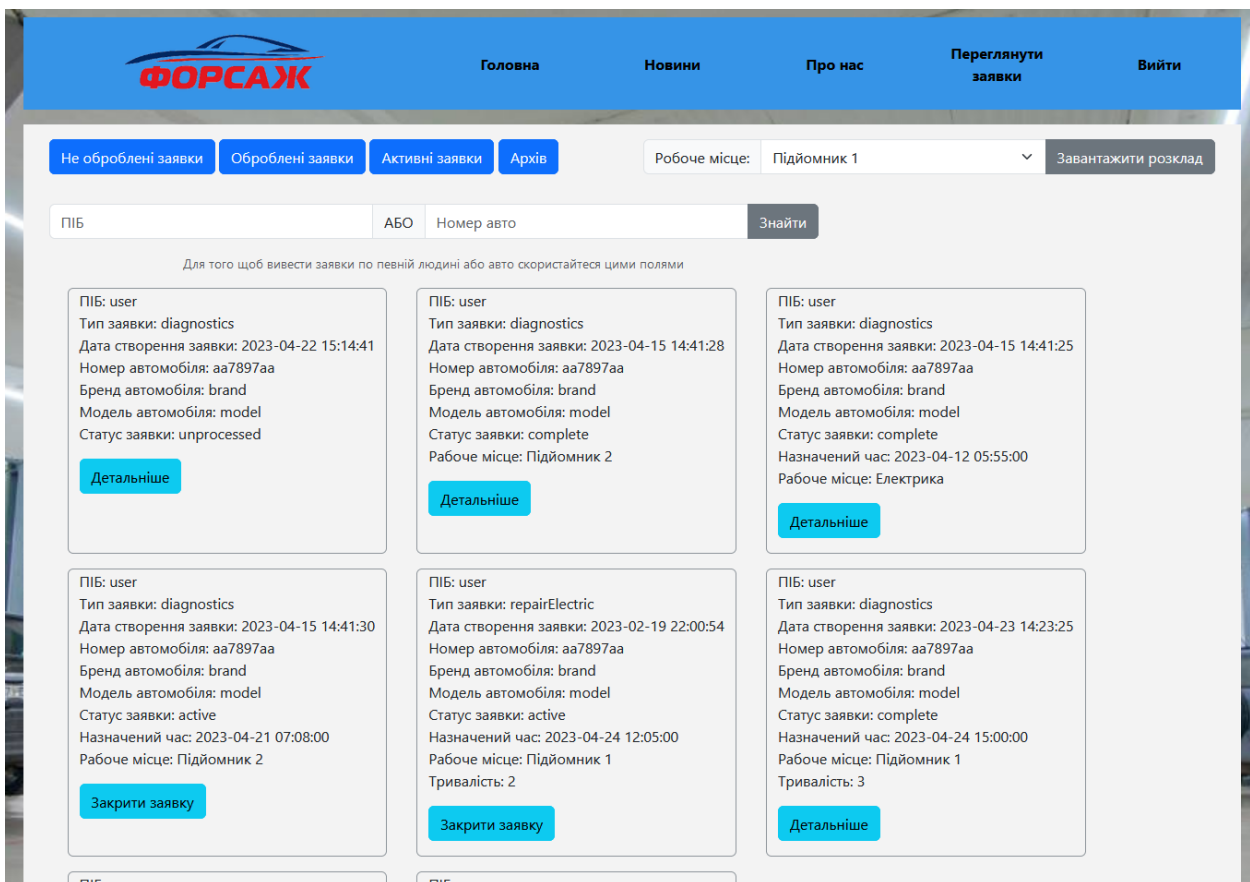


Рис. 5 – Форма для перегляд заявок менеджером

а

Назначений час:
05/01/2023, 05:05 AM

Робоче місце:
Підйомник 1

Тривалість робіт:
3

Коментар менеджера:

Внести зміни до заявки

Роздрукувати

Видалити заявку

б

ІПБ клієнта: test user
Номер телефону: 2222222228
Email: test@user.com
Номер авто: aa5597gg
Бренд авто: test user auto
Модель авто: test user model
VIN-код: 12345678945612345
Рік випуску авто: 2002
Об'єм двигуна: 3 Л
Коробка передач: manual
Дата створення заявки: 2023-04-26 17:41:16
Тип заявки: diagnostics
Коментар клієнта: test user
Назначений час: 2023-04-28T09:00
Тривалість: 1
Робоче місце: lift2
Коментар майстра: test manager

в

Тривалість робіт: 2

Коментар менеджера:
lift 111

Перелік виконаних робіт та використаних запчастин:

Заявка виконана

Видалити заявку

Рис. 6 – Форма для внесення змін до заявки після її обробки (а), зміст заявки (б), форма для закриття заявки (в)

Менеджеру не потрібно чекати закриття однієї заявки для того щоб приступити до іншої, тобто він може обробляти одразу декілька заявок. Усі закриті заявки доступні для перегляду в архіві.

Висновки

Таким чином, розроблено вебдодаток для автоматизації роботи станції технічного обслуговування легкових автомобілів. Програмний продукт реалізовано з використанням мови програмування PHP та фреймворку з відкритим кодом Bootstrap. У запропонованому додатку реалізовано наступні функції:

- реєстрація клієнтів станції технічного обслуговування;
- формування та друк заявок на технічне обслуговування;
- облік заявок на технічне обслуговування;
- ведення сторінки з новинами сервісу;
- можливість переглядати розклад окремих працівників станції;
- створення системи розмежування прав доступу між ролями користувачів.

Впровадження розробленого програмного забезпечення дозволить покращити процеси роботи з клієнтами та підвищити якість послуг, що надаються станцією технічного обслуговування.

Перелік використаних джерел:

1. Хаврук В.О. Загальна характеристика факторів, що впливають на функціонування станцій технічного обслуговування автомобілів. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. № 2(19). С. 203-213. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.919>.
2. Павлюк В.І., Дембицький В.М. Аналіз розподілу об'єму робіт дорожніх станцій технічного обслуговування. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. 2022. № 2(19). С. 155-160. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.914>.
3. Станкевич М.Д., Шибко О.М. Автоматизація управління сучасною станцією технічного обслуговування автомобілів на базі інформаційних технологій. *Актуальні питання та перспективи проведення наукових досліджень*: матеріали Міжнародної студ. конф. Вінниця. 2020. Т. 2. С. 24-25. DOI: <https://doi.org/10.36074/06.11.2020.v2.03>.
4. Кобилох О., Гірна О. Сучасні підходи до логістичного обслуговування клієнтів на основі використання CRM-системи. *Академічні візії*. 2022. Вип. 10-11. С. 3-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7025204>.
5. Сніжко Л.Л., Ахвердієва Е.Е. Впровадження CRM-системи в роботу підприємств транспорту як спосіб поліпшення рівня обслуговування споживачів. *Приазовський економічний вісник*. 2018. Вип. 6(11). С. 291-295. URL: http://pev.kpu.zp.ua/journals/2018/6_11_uk/54.pdf.

6. Краузе О., Піняк І., Шпилик С. CRM як джерело інформації для розробки маркетингових проєктів та стратегічного управління конкурентоспроможністю. *Галицький економічний вісник*. 2022. № 4(77). С. 94-102. DOI: https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2022.04.094.
7. Городецький М. Аналітичне оцінювання управління конкурентоспроможністю автосервісних підприємств України. *Інститут бухгалтерського обліку, контроль та аналіз в умовах глобалізації*. 2019. Вип. 3-4. С. 54-67. DOI: <https://doi.org/10.35774/ibo2019.03.054>.

References:

1. Khavru V. General characteristics of factors affecting the functioning of car service stations. *Advances in mechanical engineering and transport*, 2022, № 2(19), pp. 203-213. doi: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.919>. (Ukr.)
2. Pavliuk V., Dembitskyi V. Analysis of distribution of the volume of works road service stations. *Advances in mechanical engineering and transport*, 2022, № 2(19), pp. 155-160. doi: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.914>. (Ukr.)
3. Stankevich M.D., Shibko O.M. Automation of management of a modern car service station based on information technologies. *Current issues and prospects for conducting scientific research: Conference proceedings of the Youth Science League*. Vinnitsa, 2020, vol. 2, pp. 24-25. doi: <https://doi.org/10.36074/06.11.2020.v2.03>. (Ukr.)
4. Kobylukh O., Girna O. Modern approaches to logistics customer service based on the use of the CRM system. *Academic Visions*, 2022, vol. 10-11, pp. 3-12. doi: <http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7025204>. (Ukr.)
5. Snizhko L.L., Akhverdiieva E.E. Implementation of the CRM-system in the work of transport enterprises as a way for improving the consumer service level. *Pryazovskyi economic herald*, 2018, vol. 6(11), pp. 291-295. Available at: http://pev.kpu.zp.ua/journals/2018/6_11_uk/54.pdf (accessed 30 March 2023) (Ukr.)
6. Krause O., Pinyak I. and Shpylyk S. CRM as a source of information for the development of marketing projects and strategic management of competitiveness. *Galician economic journal*, vol. 77, no 4, pp. 94-102. doi: https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2022.04.094. (Ukr.)
7. Horodetskyi M. Analytical assessment of management of competitiveness of autoservice enterprises of Ukraine. *The institute of accounting, control and analysis in the globalization circumstances*, 2019, vol. 3-4, pp. 54-67. doi: <https://doi.org/10.35774/ibo2019.03.054>. (Ukr.)

Рецензент: О.І. Проніна
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 18.02.2023
Стаття прийнята 23.03.2023

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.86.065

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288124

© Карпенко Т.М.¹, Музика І.М.², Шишкін В.В.³**ПРО СИЛОВИЙ РОЗРАХУНОК
ЗАХВАТНИХ МЕХАНІЗМІВ І ЗАТИСКАЧІВ
ЗА ДОПОМОГОЮ «ЗОЛОТОГО» ПРАВИЛА МЕХАНІКИ**

При проектуванні та реконструкції захватних пристроїв чи затискачів актуальним є питання щодо геометричних параметрів об'єкту дослідження, які забезпечать необхідну величину коефіцієнта силової передачі. Зазвичай, при виконанні розрахунків таких важільно-стрижневих механізмів, які складаються з декількох ланок, розглядають рівновагу кожної ланки та розв'язують системи алгебраїчних рівнянь, що є трудомістким процесом. В цій роботі коефіцієнт силової передачі, незалежно від розглядуваної схеми, визначається з одного рівняння, так званого «золотого» правила механіки: «для рівноваги механічної системи необхідно і достатньо, щоб сума можливих потужностей активних сил дорівнювала нулеві». Щоб отримати залежності між швидкостями проміжних шарнірів для ланок, що виконують плоский рух, застосовується «теорема про проекції векторів швидкостей точок на пряму, яка з'єднує ці точки». Розглянуто поширені схеми захватних пристроїв промислових роботів та затискачів, які застосовуються в технологічних процесах металообробки та зварювання. Проектувальники мають можливість застосувати запропоновану методіку і після виконання чисельного аналізу отриманих формул для визначення коефіцієнта силової передачі конкретного прикладу вибрати найоптимальніше поєднання розмірів механізму та кутів між його стрижнями. Це забезпечить необхідні для експлуатації механізму значення тягової сили чи тиску в пневмоциліндрі, що суттєво зекономить виробничі ресурси. Алгоритм, запропонований в роботі, може бути застосований для інших плоских механізмів.

Ключові слова: захватні пристрої, затискачі, тягова сила, сила затиску, коефіцієнт силової передачі, можлива потужність сили, раціональне проектування.

T.M. Karpenko, I.M. Muzyka, V.V. Shishkin. On the force calculation of capture mechanisms and clamps using the «golden» rule of mechanics. When designing and reconstructing gripping devices or clamps, the issue of the geometric parameters of the research object that will ensure the required value of the power transmission coefficient is relevant. Usually, when performing calculations of such lever-rod mechanisms, which consist of several links, the balance of each link is considered and systems of algebraic equations are solved, which is a time-consuming process. In this paper, the power transmission coefficient, regardless of the scheme under consideration, is determined from one equation, the so-called «golden» rule of mechanics: «for the balance of a mechanical system, it is necessary and sufficient that the sum of the possible powers of active forces equals zero». In order to obtain the dependences between the speeds of the intermediate hinges for the links performing a planar movement, the "theorem on the projections of the

¹ канд. фіз.-мат. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0003-4042-0301, karpenko_t_n@pstu.edu

² ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, muzyka_i_n@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь, ORCID: 0000-0001-5943-2180, shishkin_v_v@pstu.edu

velocity vectors of the points onto the line connecting these points" is applied. Common schemes of gripping devices of industrial robots and clamps, which are used in technological processes of metalworking and welding, are considered. Designers have the opportunity to apply the proposed method and, after performing numerous analyzes of the obtained formulas to determine the power transmission coefficient of a specific example, choose the most optimal combination of the dimensions of the mechanism and the angles between its rods. This will ensure the values of traction force or pressure in the pneumatic cylinder necessary for the operation of the mechanism, which will significantly save production resources. The algorithm proposed in the work can be applied to other flat mechanisms.

Key words: gripping devices, clamps, traction force, clamping force, power transmission coefficient, possible force power, rational design.

Постановка проблеми. У машинобудуванні, металообробному, зварювальному та інших виробництвах широко застосовуються механічні захвати промислових роботів і затискачі, які призначені для захоплення, утримання та позиціонування матеріальних об'єктів: предметів виробництва; виробів, що зварюються; інструменту та інше. При роботі цих механізмів велике значення мають величини сил для утримання або затиску предметів. Ці сили при проектуванні механізмів вважаються заданими. Раціональне проектування таких механізмів передбачає вибір як принципової схеми, так і геометричних параметрів, при яких ці сили, у порівнянні з зусиллями приводу, досягаються найменш витратним способом, як правило, зі значним силовим вирашем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Детальному розгляду принципу роботи захватних механізмів та пристроїв, обґрунтуванню вибору принципової схеми та параметрів цих механізмів, їх силовому розрахунку, а також рекомендаціям щодо їх застосування присвячено ряд джерел [1-3] та ін.

Основи конструювання, розрахунки затискачів та силових приводів до них розглянуті у роботах [4-6].

Актуальним при розрахунку механічних затискачів і захватних пристроїв є питання про величину коефіцієнта силової передачі, тобто відношення тягової сили приводу до сили, яка створюється у захватному механізмі або до сили затиску.

Загальноприйнятим методом отримання цього коефіцієнта є силовий аналіз з розглядом рівноваги окремих ланок механізму. При аналітичному підході це призводить до необхідності складання та розв'язування багатьох рівнянь статички, кількість і вид яких залежить від виду системи сил, що діють на ланки [5, 7-9].

Мета статті. Для деяких конструкцій важільно-стрижневих механізмів виконати силовий розрахунок, шляхом застосування «золотого» правила механіки – рівняння принципу можливих переміщень аналітичної механіки [10-11] (принципу Лагранжа), де за об'єкт вивчення взято весь плоский механізм. Узагальнюючи розрахунки, запропонувати алгоритм методики визначення коефіцієнта силової передачі з меншою витратою часу на обчислення і виконати чисельний аналіз формул з метою вибору оптимального поєднання параметрів об'єкту вивчення.

Виклад основного матеріалу.

Захватні механізми і затискачі, які розглядаються в роботі, структурно складаються з:

- силового вузла (приводу);
- передавального важільно-стрижневого механізму, здатного передавати та змінювати тягову силу \bar{P} , створювану приводом;
- пристрою захвату або затиску, в якому створюється сила \bar{F} .

Основною характеристикою означених вище передавальних механізмів є коефіцієнт силової передачі $k = \frac{P}{F}$, для визначення якого пропонується використовувати принцип можливих переміщень, вважаючи в'язі ідеальними: *Для рівноваги механізму необхідно і достатньо, щоб сума можливих робіт активних сил, прикладених до нього, дорівнювала нулю.*

Враховуючи, що можливі переміщення точок прикладання активних сил прямо пропорційні можливим швидкостям цих точок, маємо «золоте» правило механіки: $\sum_{k=1}^n \bar{F}_k^{(a)} \cdot \bar{V}_k = 0$, де

\bar{V}_k – можлива швидкість точки прикладення сили $\bar{F}_k^{(a)}$, n – кількість активних сил.

Якщо позначити точкою A точку прикладення тягової сили \bar{P} , а точкою D – точку прикладення сили затиску чи захвату, \bar{F} , нехтуючи силами тяжіння ланок, отримаємо рівняння, що відображає «золоте» правило механіки для механізмів, які вивчаються:

$$\bar{P} \cdot \bar{V}_A + \bar{F}' \cdot \bar{V}_D = 0, \quad (1)$$

де $\bar{F}' = -\bar{F}$ – сила, з якою об'єкт, що утримується, діє на передавальний механізм.

Для практичної реалізації рівняння (1) пропонується наступний алгоритм.

1. Зобразити кінематичну схему механізму з прикладеними до нього силами \bar{P} та \bar{F}' . Задати можливу швидкість, наприклад, \bar{V}_A , показати вектори швидкостей точок, які необхідні для встановлення зв'язку між швидкостями точок A і D .

2. Встановити залежності між величинами швидкостей точок, використовуючи знання розділу «Кінематика»:

- а) якщо точки належать важелю, що обертається навколо нерухомої осі, то швидкості точок прямо пропорційні відстаням від цих точок до осі;
- б) якщо точки належать стрижню, що здійснює плоский рух, тоді проекції векторів швидкостей точок на пряму, яка проходить через ці точки, рівні між собою.

3. Підставивши у формулу (1) залежності між швидкостями \bar{V}_A і \bar{V}_D , що отримані в п. 2 алгоритму, визначити шуканий коефіцієнт силової передачі..

Розрахунок захватних пристроїв промислових роботів (далі – ЗП ПР).

Вимоги до ЗП ПР, що проєктуються, наступні:

- надійність захвату та утримання виробу або технологічного оснащення;
- широкий діапазон можливостей пристрою, тобто можливість захвату різних об'єктів, маси, форми і розміри яких відповідають умовам технічного завдання на проєктування.

Для ілюстрації залежності коефіцієнту силової передачі від схеми захватного пристрою і його геометричних параметрів розглянемо кілька прикладів.

Умови прикладів 1-4.

На рис.1, 2 і 3 зображені кінематичні схеми пристроїв, розташованих у горизонтальній, а на рис. 4 – у вертикальній площині. Виріб, вагою \bar{G} , утримується губками D . Вузол захвату з виробом може рухатись з вертикальним прискоренням ω , спрямованим вниз. Властивості контактних поверхонь губок і виробу враховуються коефіцієнтом тертя ковзання f .

Необхідно: Отримати формулу для визначення сили P та коефіцієнт силової передачі k .

Розв'язання.

Маємо формулу для обчислення сили захвату \bar{F} :

$$F = \frac{m \cdot (g + \omega)}{2 \cdot f} \cdot \lambda, \quad (2)$$

де m – маса виробу;

g – прискорення вільного падіння;

λ – коефіцієнт безпеки.

Розглядаємо рівновагу механізму під дією сил: $\bar{F}' = -\bar{F}$ і тягової сили \bar{P} . Застосувавши формулу (1), отримаємо:

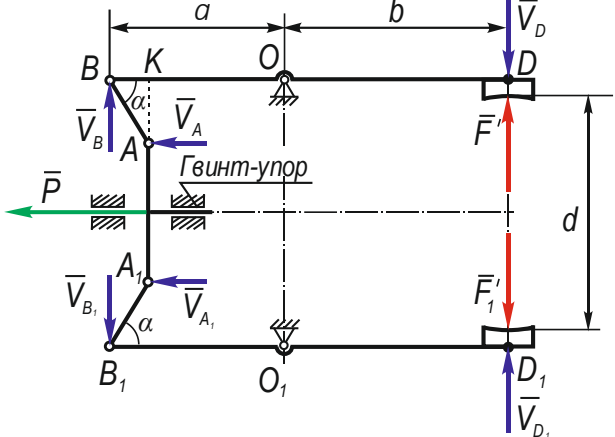
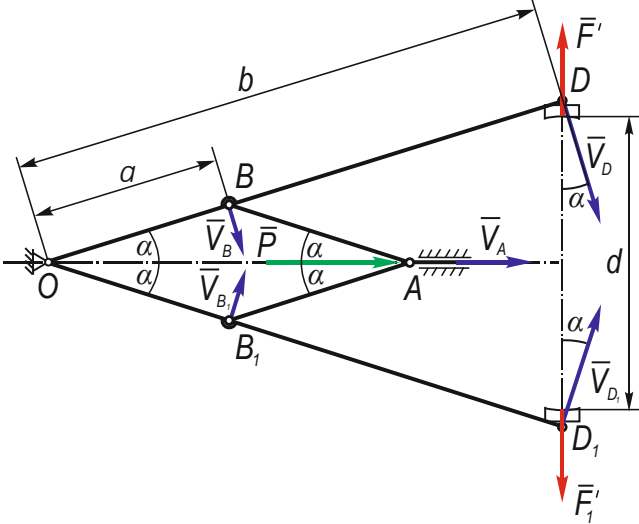
- для схеми рис. 1 - $P \cdot V_A - 2 \cdot F' \cdot V_D = 0$
 для схем рис. 2, 3 і 4 - $P \cdot V_A - 2 \cdot F' \cdot V_D \cdot \cos \alpha = 0$

Для всіх схем має місце формула $V_D = V_B \cdot \frac{b}{a}$. Залежності між швидкостями точок А і В

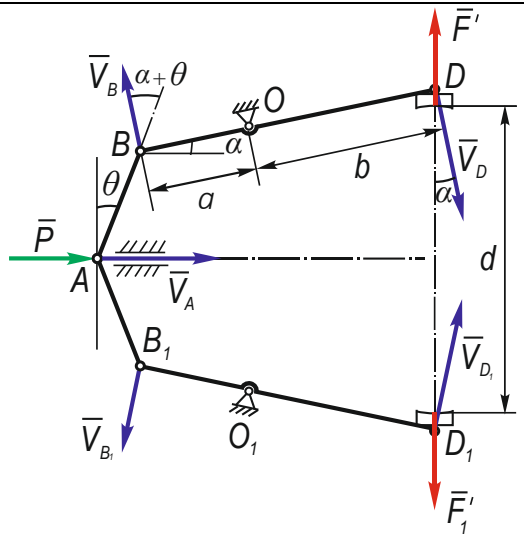
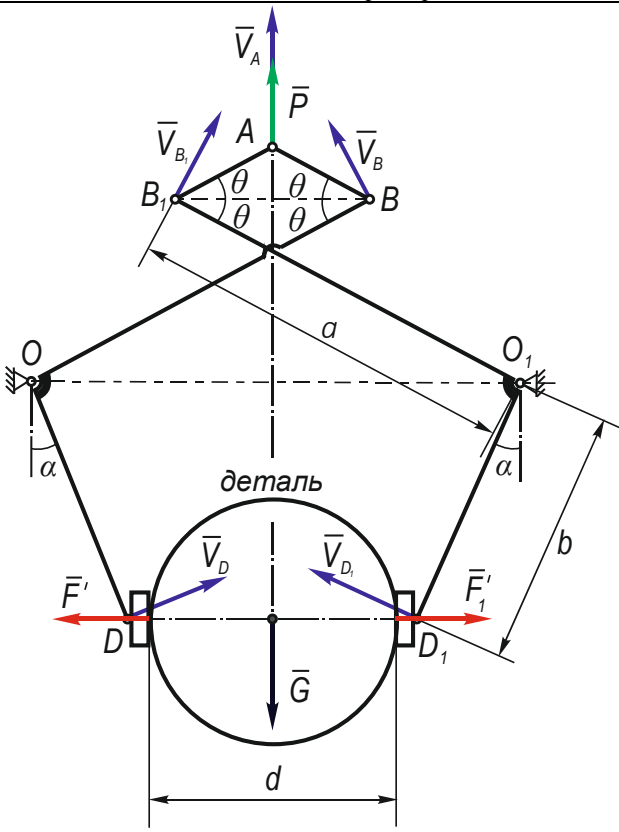
отримаємо, скориставшись теоремою про рівність проєкцій векторів швидкостей цих точок на пряму АВ. Кінематичні схеми захватних механізмів, залежності між швидкостями V_A , V_B і V_D , отримані формули для обчислення сили P і коефіцієнта силової передачі k , помістимо в Таблицю 1.

Таблиця 1

Кінематичні схеми захватних механізмів та формули для обчислення P і k

№	Кінематична схема ЗП	Залежності між швидкостями V_A , V_B і V_D	Формули для обчислення P и k
1	 <p style="text-align: center;">Рис. 1 – Схема пристрою</p>	$V_B = V_D \cdot \frac{a}{b}$ $V_B = V_A \cdot \text{ctg } \alpha$ $V_A = V_D \cdot \frac{a}{b} \cdot \text{tg } \alpha$	$P = F' \cdot \frac{2b}{a} \cdot \text{ctg } \alpha$ $k = \frac{2b}{a} \cdot \text{ctg } \alpha$
2	 <p style="text-align: center;">Рис. 2 – Схема пристрою</p>	$V_B = V_D \cdot \frac{a}{b}$ $V_B = V_A \cdot \frac{1}{2 \sin \alpha}$ $V_A = V_D \cdot \frac{2a}{b} \cdot \text{tg } \alpha$	$P = F' \cdot \frac{b}{a} \cdot \text{ctg } \alpha$ $k = \frac{b}{a} \cdot \text{ctg } \alpha$

Продовження таблиці 1

№	Кінематична схема ЗП	Залежності між швидкостями V_A, V_B і V_D	Формули для обчислення P і k
3	 <p>Рис. 3 – Схема пристрою</p>	$V_B = V_D \cdot \frac{a}{b}$ $V_B = V_A \cdot \frac{\sin \theta}{\cos(\alpha + \theta)}$ $V_A = V_D \cdot \frac{a \cdot \cos(\alpha + \theta)}{b \cdot \sin \theta}$	$P = F' \cdot \frac{2b}{a} \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \sin \theta}{\cos(\alpha + \theta)}$ $k = \frac{2b}{a} \cdot \frac{\cos \alpha \cdot \sin \theta}{\cos(\alpha + \theta)}$
4	 <p>Рис. 4 – Схема пристрою</p>	$V_B = V_D \cdot \frac{a}{b}$ $V_B = V_A \cdot \frac{1}{2 \cos \theta}$ $V_A = V_D \cdot \frac{2a}{b} \cdot \cos \theta$	$P = F' \cdot \frac{b \cdot \cos \alpha}{a \cdot \cos \theta}$ $k = \frac{b \cdot \cos \alpha}{a \cdot \cos \theta}$

Якщо проаналізувати формули для обчислення коефіцієнтів силової передачі ЗП ПР, наведених у таблиці 1, можна зробити висновки:

- 1) коефіцієнт k є прямо пропорційним відношенню розмірів $\frac{b}{a}$;

2) коефіцієнт k залежить від кутів. Тому в схемах рис. 1 і рис. 2 k тим менше, чим більше значення кута α . У схемі рис. 4 k тим менше, чим кут α більший за кут θ і не залежить від кутів, якщо $\alpha = \theta = 45^\circ$;

3) для чисельного аналізу формули k схеми рис. 3 з метою вибору раціонального поєднання кутів введемо параметр z , що залежить від кутів: $z = \frac{\cos \alpha \cdot \sin \theta}{\cos(\alpha + \theta)}$. Результати аналізу (рис. 5 і рис. 6) такі: коефіцієнт z (отже і k) зменшується, якщо кут α зростає, а θ меншає і навпаки. При цьому виконано умова $\alpha + \theta = 80^\circ$.

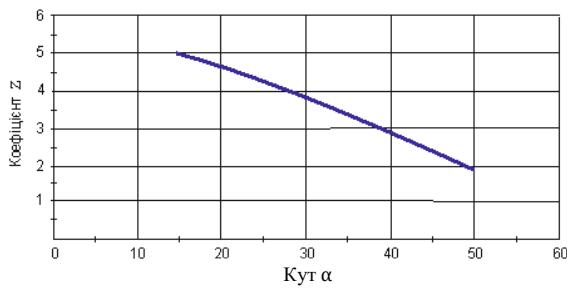


Рис. 5 – Залежність коефіцієнту z від кута α , за умови $\theta^\circ = 80^\circ - \alpha^\circ$

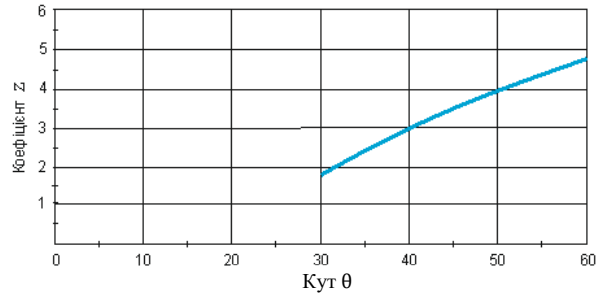


Рис. 6 – Залежність коефіцієнту z від кута θ , за умови $\alpha^\circ = 80^\circ - \theta^\circ$

Розрахунок затискаючих пристроїв.

У зварювальному виробництві більшість важливо-стрижневих затискаючих пристроїв мають силовий привід – пневматичний та гідравлічний циліндр. Застосовуючи запропоновану методику, можна встановити залежність між силою P на штоку циліндра і зусиллям F закріплення виробу, що зварюється, а також підібрати тиск і діаметр циліндра, які забезпечать необхідний коефіцієнт передачі сили.

Розглянемо приклади.

Приклад 5.

Визначити зусилля F затискання виробу у точці D одноважільного затискувача (рис. 7), якщо відомий тиск p у циліндрі діаметром d . Встановити, чому дорівнює коефіцієнт силової передачі.

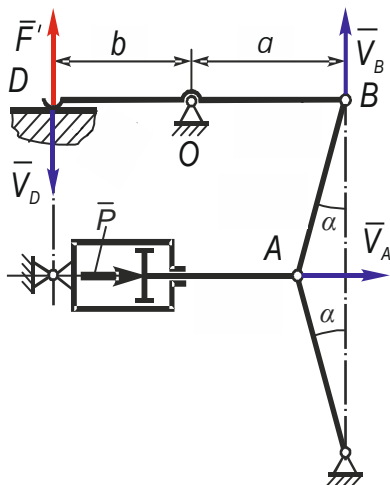


Рис. 7 – Схема одноважільного затискувача

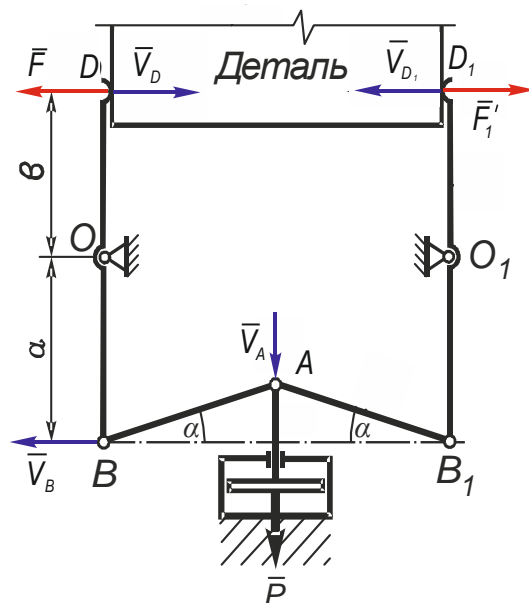


Рис. 8 – Схема двоважільного затискувача

Розглянувши рівновагу пристрою під дією сил P і F' маємо: $P \cdot V_A - F' \cdot V_D = 0$.

Оскільки $V_D = V_B \cdot \frac{b}{a}$, $V_B = V_A \cdot \text{tg } \alpha$, отримаємо $F' = \frac{a}{b} \cdot \frac{P \cdot \pi d^2}{4}$ – сила тим більше, що менше кут α . Коефіцієнт силової передачі дорівнює $k = \frac{P}{F} = \frac{b}{a} \cdot \text{tg } \alpha$. Він тим менше, що менше кут α і відношення довжин $\frac{b}{a}$.

Приклад 6

Визначити величину мінімальної приводної сили P_{\min} в приладі для монтажу і зварювання поздовжніх швів. Кінематична схема пристрою зображена на рис. 8. Вага виробу дорівнює G , коефіцієнт тертя у місцях контакту виробу із затискачем дорівнює f .

Розглянувши рівновагу приладу під дією сил P_{\min} і $2F'$ маємо, згідно з формулою (1):

$$P_{\min} \cdot V_A - 2F' \cdot V_D = 0,$$

де $F' = \frac{G}{2f}$, $V_D = V_A \cdot \frac{b}{a} \cdot \text{tg } \alpha$.

Тому $P_{\min} = \frac{G}{f} \cdot \frac{b}{a} \cdot \text{tg } \alpha$ – сила тим менша, що менше кут α і відношення довжин $\frac{b}{a}$.

Приклад 7.

Для затискача (рис. 9), що застосовується у зварювальному виробництві, визначити:

- коефіцієнт силової передачі;
- яким має бути тиск у циліндрі приводу, діаметр якого дорівнює d .

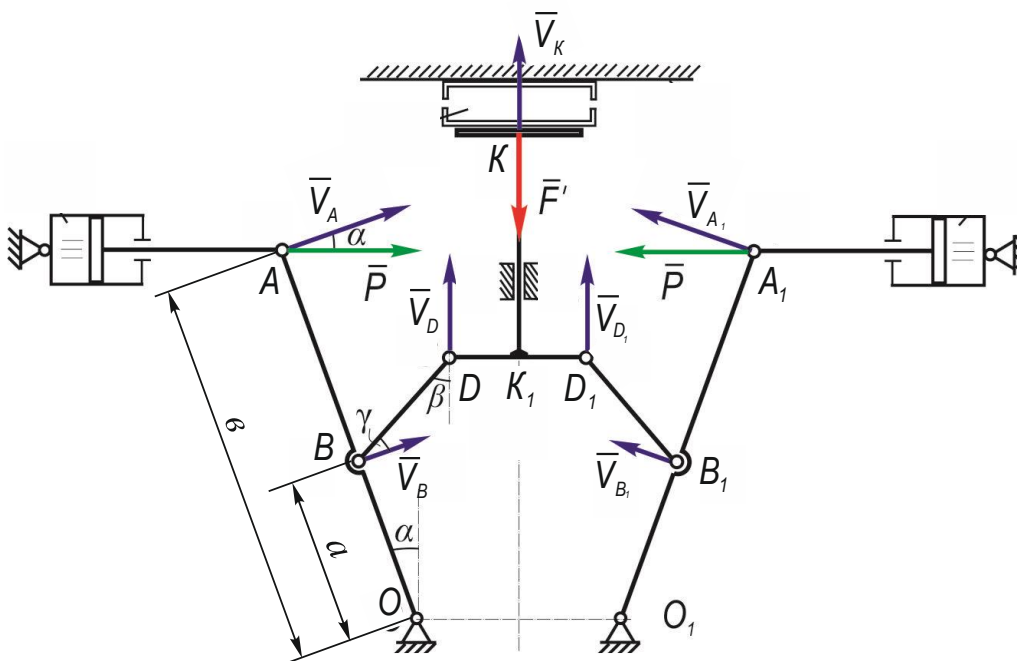


Рис. 9 – Схема затискувача пакету в машині для зварювання профілів

Відповідно до формули (1), маємо $2P \cdot V_A \cdot \cos \alpha - F' \cdot V_K = 0$, де $V_A = V_B \frac{b}{a}$, $V_B \cdot \sin(\alpha + \beta) = V_D \cdot \cos \beta$, $V_D = V_K$. Тому $P = k \cdot F$, де коефіцієнт силової передачі $k = \frac{a \cdot \sin(\alpha + \beta)}{2b \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta}$.

Оскільки $P = \frac{p \cdot \pi d^2}{4}$, маємо $p = \frac{4}{\pi d^2} \cdot k \cdot F'$.

З метою практичного використання результатів силового розрахунку затискувача (рис. 9) виконано чисельний аналіз задачі при різних поєднаннях геометричних параметрів механізму. Залежності коефіцієнта силової передачі від кутів свідчать про наступне:

- значення кутів α і β взаємозамінні, якщо $\alpha + \beta < 90^\circ$;
- коефіцієнт k при фіксованому α збільшується при зростанні кута β (рис. 10-11);
- коефіцієнт k при фіксованому β збільшується при зростанні кута α (рис. 12);
- для будь-яких значень α та β коефіцієнт k прямо пропорційний відношенню $\frac{a}{b}$.

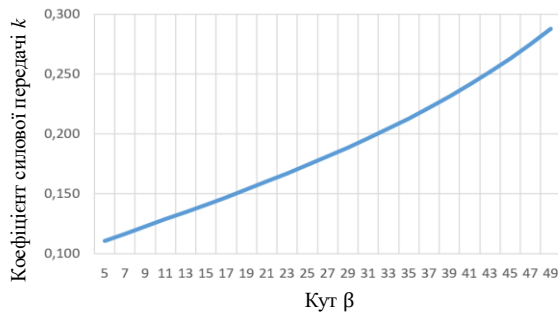


Рис. 10 – Залежність k від кута β при фіксованому $\alpha = 30^\circ$

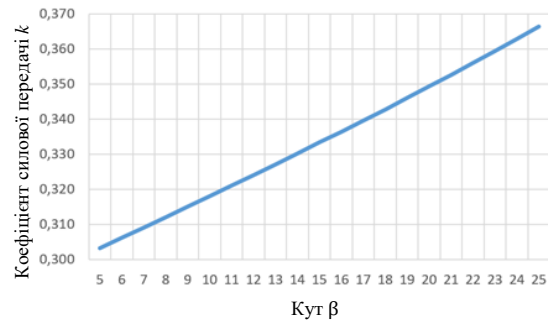


Рис. 11 – Залежність k від кута β при фіксованому $\alpha = 60^\circ$

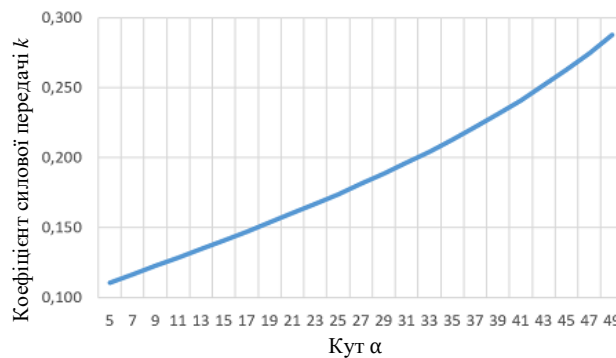


Рис. 12 – Залежність k від кута α при фіксованому $\beta = 30^\circ$

Для визначення величини тиску в циліндрі p затискувача введемо коефіцієнт $\delta = \frac{4}{\pi d^2}$, який показує залежність тиску p від діаметра приводного циліндра. Тоді тиск у циліндрі є прямо пропорційним: силі затиску F , коефіцієнтові δ та коефіцієнтові силової передачі k , який залежить від геометричних параметрів приладу. Маємо формулу

$$p = \delta \cdot k \cdot F.$$

Примітка.

У всіх вище виконаних розрахунках приймалось допущення про те, що внутрішні в'язі – ідеальні. Щоб врахувати тертя в шарнірах, потрібно у формулу сили P ввести коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,9...0,95$. Маємо уточнене значення сили P : $P_{\text{уточ}} = \frac{P}{\eta}$.

Висновки

1. Застосування «золотого» правила механіки дозволяє за допомогою одного рівняння отримати коефіцієнти силової передачі важільно-стрижневих захватних пристроїв та затискачів.

2. Запропонована та реалізована методика виконання силового розрахунку дозволить конструктору зекономити час для отримання коефіцієнта силової передачі та, шляхом варіювання геометричними параметрами механізму, створювати широко діапазонні механізми з необхідними та раціональними параметрами захватних пристроїв та затискачів.

Перелік використаних джерел:

1. Робототехніка. Підручник / В.І. Костюк, Г.О. Спину, Л.С. Ямпольський, М.М. Ткач. Київ: Вища школа, 1994. 447 с.
2. Проць Я.І. Захоплювальні пристрої промислових роботів. Навчальний посібник. Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. Пулюя, 2008. 232 с.
3. Промышленная робототехника / под ред. Я.С. Ямпольского. Київ, Техніка, 1984. 243 с.
4. Спину Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение. Київ: Вища школа, 1991. 331 с.
5. Павленко І.І. Промислові роботи: основи розрахунку та проектування. Кіровоград: КНТУ, 2007. 420 с.
6. Павленко І.І., Годунко М.О., Кіріченко І.Д. Загальна методика розрахунку та проектування конструкцій захватних пристроїв промислових роботів. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2013. Вип. 26. С. 67-70.
7. Павленко І.І., Годунко М.О. Особливості визначення діапазону утримування деталей захватними пристроями промислових роботів. *Вісник КНУ імені Михайла Остроградського*. 2011. Вип. 2 / 2011 (67), частина 1. С. 62-64.
8. Карпенко Т.Н. Силовой расчет зажимных приспособлений и захватных устройств. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Теоретическая механика». Мариуполь: ГВУЗ «ПГТУ», 2015. 44 с.
9. Ковалева Н.В., Наталюткина И.А. Силовой расчет и механизмы станочных приспособлений. Учебное пособие по дисциплине «Технологическая оснастка». Дружковка, 2007. 59 с.
10. Павловський М.А. Теоретична механіка. Навчальний посібник. Київ: Техніка, 2002. 511 с.
11. Теоретична механіка: навчальний посібник / П.К. Штанько та ін.; за ред. П.К.Штанька. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2021. 464 с.

References:

1. Kostiuk V.I., Spinu G.O., Iampol'skii L.S., Tkach M.M. *Robotics. Textbook*. Kyiv, Vishcha shkola Publ., 1994. 447 p. (Ukr.)
2. Prots' Ya.I. *Grabbing devices of industrial robots. Tutorial*. Ternopil', Ternopil'skii derzhavnii tekhnichnii universitet im. Puliuia Publ., 2008. 232 p. (Ukr.)
3. Iampol'skii Ia.S. *Industrial robotics*. Kyiv, Tekhnika Publ., 1984. 243 p. (Rus.)
4. Spinu G.A. *Industrial robots. Design and Application*. Kyiv, Vishcha shkola Publ., 1991. 331 p. (Rus.)
5. Pavlenko I.I. *Industrial robots: basics of calculation and design*. Kirovohrad, KNTU Publ., 2007. 420 p. (Ukr.)
6. Pavlenko I.I., Godunko M.O., Kirichenko I.D. The general method of calculating and designing structures of gripping devices of industrial robots. *Machinery in agricultural production, industrial engineering, automation*, 2013, vol. 26, pp. 67-70. (Ukr.)

7. Pavlenko I.I., Godunko M.O. Peculiarities of determining the range of holding parts by gripping devices of industrial robots. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 2011, vol. 2 / 2011 (67), iss 1, pp. 62-64. (Ukr.)
8. Karpenko T.N. *Force calculation of clamping devices and gripping devices. Guidelines for performing practical work in the discipline «Theoretical Mechanics»*. Mariupol, SHEE «PSTU» Publ., 2015. 44 p. (Rus.)
9. Kovaleva N.V., Nataliutkina I.A. *Power calculation and mechanisms of machine tools. Textbook for the discipline «Technological equipment»*. Druzhkovka, 2007. 59 p. (Rus.)
10. Pavlovs'kii M.A. *Theoretical mechanics. Study guide*. Kyiv, Tekhnika Publ., 2002. 511 p. (Rus.)
11. Shtan'ko P.K., Shevchenko V.G., Omel'chenko O.C., Dziuba L.F., Pasika V.R., Poliakov O.M. *Theoretical mechanics: a study guide*. Zaporizhzhia, NU «Zaporiz'ka politekhnika» Publ., 2021. 464 p. (Ukr.)

Рецензент: А.О. Іщенко
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 13.02.2023

Стаття прийнята 28.03.2023

133 ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.891

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288125

© Іщенко А.О.¹, Рассохін Д.О.², Носовська О.В.³

ВІДНОВЛЕННЯ ПРОКАТНОГО ОБЛАДНАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

В останні роки широке застосування в різних галузях промисловості при ремонті обладнання знаходять полімерні матеріали, що є різними клейовими сполуками на основі епоксидних смол, поліефірів, поліуретанів, поліакрилів та ін., збагачені дрібнодисперсними металевими та іншими наповнювачами. Ці композиційні ремонтні матеріали мають хороші адгезійні властивості при покритті металевих поверхонь, що в поєднанні з їхньою досить високою міцністю і здатністю без усадки переходити за короткий проміжок часу від пластичного стану до твердого, забезпечує широку сферу застосування при вирішенні ремонтних проблем. Розроблена технологія відновлення проектних розмірів станин з використанням композитних матеріалів, що виключає необхідність у наплавленні і фрезеруванні. В результаті численних промислових випробувань встановлено, що композитні матеріали дозволяють вирішити низку серйозних ремонтних проблем у прокатному виробництві, зокрема, на важконавантажених листових станах та блюмінгах при відновленні зношених контактних поверхонь цього обладнання. У ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (м. Маріуполь, Україна) було розроблено оригінальну технологію застосування композитних матеріалів, яка дозволила на одному з металургійних комбінатів здійснити унікальну ремонтну операцію зі встановлення нової кліті блюмінгу на старі плитовини, що мали зношування в окремих точках до 7 мм. Ці композиційні ремонтні матеріали мають хороші адгезійні властивості при покритті металевих поверхонь, що в поєднанні з їхньою досить високою міцністю і здатністю без усадки переходити за короткий проміжок часу від пластичного стану до твердого, забезпечує широку сферу застосування при вирішенні ремонтних проблем. Крім того, мають місце uszkodження окремих видів машин, які або неможливо виправити традиційними методами, або їх відновлення вимагає великих матеріальних і тимчасових витрат.

Ключові слова: композит, відновлення, ремонт, матеріал, знос, технологія.

A.O. Ishchenko, D.O. Rassokhin, O.V. Nosovska. Restoration of rolled equipment using composite materials. In recent years, polymer materials with various adhesive compounds based on epoxy resins, polyesters, polyurethanes, polyacrylics, and others enriched with fine-dispersed metallic and other fillers have found wide application in various industrial sectors for equipment repair. These composite repair materials have excellent adhesive properties when applied to metal surfaces, and when combined with their high strength and the ability to transition from a plastic to a solid state without shrinkage in a short period of time, they provide a broad range of applications in solving repair problems. A technology for restoring the original dimensions of equipment parts using composite materials has been developed, eliminating the need for welding and milling. Numerous

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6189-7830, ishchenko50@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-3479-9485, rassokhin_d_a@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1313-4767, nosovska_o_v@pstu.edu

industrial tests have shown that composite materials allow solving a range of serious repair problems in rolling production, particularly on heavily loaded sheet rolling stands and blooming mills when restoring worn contact surfaces of this equipment. An original technology for the application of composite materials was developed at the Pryazovskyi State Technical University (Mariupol, Ukraine), which allowed for a unique repair operation at one of the metallurgical plants, involving the installation of a new blooming mill housing onto old worn plates with wear of up to 7 mm at certain points. These composite repair materials have excellent adhesion properties when applied to metal surfaces, which, in combination with their high strength and the ability to transition from a plastic to a solid state without shrinkage in a short period of time, provide a wide range of applications in solving repair problems. Additionally, there are cases of damage to certain types of machinery that are either impossible to repair using traditional methods or require significant material and time investments for restoration.

Keywords: composite, restoration, repair, material, wear, technology.

Постановка проблеми. В останні роки широке застосування в різних галузях промисловості при ремонті обладнання знаходять полімерні матеріали, що є різними клейовими сполуками на основі епоксидних смол, поліефірів, поліуретанів, поліакрилів та ін., збагачені дрібнодисперсними металевими та іншими наповнювачами [1-3]. Ці композиційні ремонтні матеріали мають хороші адгезійні властивості при покритті металевих поверхонь, що в поєднанні з їхньою досить високою міцністю і здатністю без усадки переходити за короткий проміжок часу від пластичного стану до твердого, забезпечує широку сферу застосування при вирішенні ремонтних проблем. Насправді мають місце uszkodження окремих видів машин, які або неможливо виправити традиційними методами, або їх відновлення вимагає великих матеріальних і тимчасових витрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На перший погляд застосування композитних матеріалів у металургійній промисловості і, насамперед, на прокатних цехах металургійних заводів, де машини зазнають великих динамічних навантажень, здається справою безнадійною. Проте спеціальними експериментами, успішними промисловими випробуваннями було доведено, що за допомогою композитних матеріалів можна не тільки відновити, а й збільшити термін служби вузлів і машин, у зрівнянні з традиційними видами ремонтів. Цей напрямок робіт став розвитком ідей, викладених В. Бастіаном у своїй статті [1].

Метою дослідження є розробка технології відновлення зношеного обладнання. Найбільша ефективність застосування композитних матеріалів досягається при захисті опорних поверхонь важконавантажених машин, які зношуються при дії ударних навантажень у поєднанні з корозійними процесами через потрапляння на них води.

Виклад основного матеріалу. До деталей такої групи зносу, насамперед, слід віднести плитовини, на які встановлюють лапи станин прокатних станів. Зазвичай плитовини із зношеними поверхнями прийнято зривати з фундаменту та відновлювати в механічних цехах або замінювати новими. Це трудомісткий процес, який вимагає великих витрат часу, і, насамперед, полягає у наступному встановленню відновлених плит у проектне положення, заливці бетону, тощо. У ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (м. Маріуполь, Україна) було розроблено оригінальну технологію застосування композитних матеріалів, яка дозволила на одному з металургійних комбінатів здійснити унікальну ремонтну операцію зі встановлення нової кліті блюмінгу на старі плитовини, що мали зношування в окремих точках до 7 мм [2]. Протягом двох діб за допомогою металополімерних матеріалів було відновлено поверхню опорного майданчика плит і виконано захист їх від подальшого зношування. При виконанні цієї роботи застосовувався композитний матеріал «мультиметал – сталь 1018» фірми «Діамант металопластик ГМВН» (Німеччина), який має підвищений модуль пружності, що досягає 14000 МПа, і з успіхом використовується німецькими та угорськими спеціалістами при монтажі нових і відновлених споруд. Виконувалася ця операція відновлення плитовин таким чином (рис. 1).

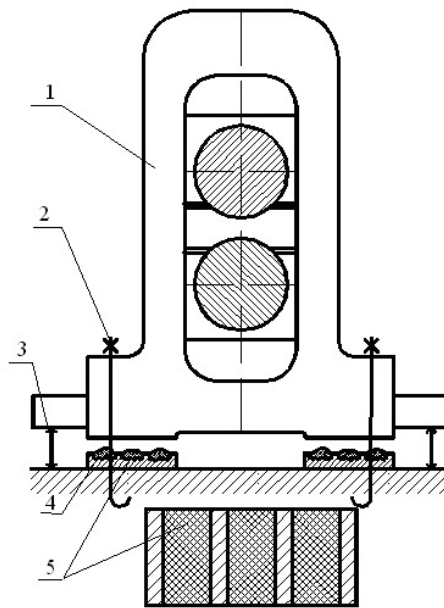


Рис. 1 – Схема монтажу кліті блюмінгу на плитовини: 1 – кліть, 2 – болти кріплення кліті до фундаменту, 3 – гідродомкрати, 4 – металополімер, 5 – плитовини

Технічна характеристика

Межа міцності при стисканні, МПа	160
Межа міцності при розтягуванні, МПа	76
Межа міцності при зсуві, МПа	89
Межа міцності при згинанні, МПа	22
Модуль пружності, МПа	$14 \cdot 10^3$
Термостійкість, °С (довгостроково)	- 40 ÷ + 90
Час використання, хв.	45
Час затвердіння при +5 °С, год.	72
Час затвердіння при +20 °С, год.	24

Після зачистки зношеної поверхні плит наплавляли на них контрольні смужки, які оброблялися ручними шліфувальними машинками. На цих смужках кліть була попередньо виставлена, потім вона була піднята гідродомкратами і на зношену поверхню плит нанесений з надлишком металополімерний матеріал, який був спланований площиною лап станини після її опускання на контрольні смужки і затяжки за допомогою болтів. Таким чином було досягнуто ідеального контакту площини лап станини з плитовинами, при якому питомі навантаження в будь-якій точці контактної поверхні були мінімізовані.

Під час експлуатації цієї кліті була відсутня необхідність у підтяжці болтів її кріплення, що свідчить насамперед про ідеальну установку станини кліті на площину плитовин та, крім того, про захист композитним матеріалом поверхні плитовин від впливу води та, відповідно, від корозії.

Ще одна ремонтна проблема була вирішена на товстолистових прокатних станах – це відновлення проектних розмірів отворів великогабаритних станин. Знімні захисні планки, що закріплюються на станинах з метою їх захисту від зносу, не виконують повністю своїх функцій, оскільки опорна площа станини піддається корозії через попадання охолоджувальної води в зазор між цими планками і станиною.

Традиційний вихід із положення – це фрезерування отвору спеціальними переносними верстатами. Однак після 2-3 таких фрезеровок міцність станини, внаслідок зменшення перерізу її несучих стійок, не може дозволити подальшого застосування цієї технології. А шлях наплавлення і подальшого фрезерування не дозволений фірмами-виробниками прокатних станів, хоча

такий підхід, внаслідок безвихідного положення, все ж таки використовується на металургійних заводах.

Розроблена технологія відновлення проектних розмірів прорізів станин з використанням композитних матеріалів, що виключає необхідність у наплавленні і фрезеруванні, полягає в тому, що металополімерний матеріал 3 розміщують між планкою 2 і станиною 1 (рис. 2), дозволяючи безперешкодно виставляти планку за допомогою геодезичних інструментів. При цьому використовуються планки спеціальної конструкції, а монтаж їх у проектне положення має свої специфічні особливості, враховуючи їх вертикальне розташування та наявність зазору між ними та станиною. Головний результат такої технології відновлення – це триєдиний позитивний ефект, що забезпечує довговічність отриманої сполуки. По-перше, завдяки пластичності металополімерного матеріалу ще до початку полімеризації (тобто при його нанесенні) досягається ідеальний контакт взаємодії поверхонь, як показано на рис. 2.

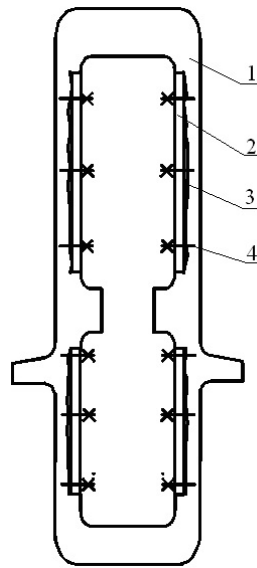


Рис. 2 – Схема відновлення проектних розмірів вікна станини прокатної кліти стану 3000: 1 – станина; 2 – захисна планка; 3 – мультиметал-сталь 1018; 4 – болти кріплення

В іншому випадку взаємодія захисної планки зі станиною відбувалася б лише частиною контактуючих поверхонь, тобто по її елементах, що виступають. Цей фактор дозволяє помітно знизити питомі навантаження на поверхню станини та рівномірно розподілити горизонтальні сили прокатки по всій площині контакту. Другий позитивний момент полягає в тому, що зазор між планкою та станиною герметизується металополімерним матеріалом, виключаючи потрапляння в нього води та зупиняючи процес корозійного зношування станини. І, нарешті, третій полягає в тому, що металополімерний матеріал демпфує ударні навантаження без власного руйнування і тим самим продовжує термін роботи з'єднання, що розглядається. Таким чином, поверхня станини фактично виявляється законсервованою, і, в ході подальшої експлуатації, зношування її припиняється. Слід зазначити, що така операція повинна виконуватися ще на новій кліті, щоб унеможливити саму ймовірність первинного зносу цих великогабаритних і важконавантажених конструкцій.

Експлуатація відновлених клітей на різних прокатних станах показала, що композитний матеріал на нереверсивних чистових клітях відпрацював 6 років і був замінений тільки через зношування поверхні захисних планок прокатних валків, що контактують з подушками. Тяжкіші умови роботи на реверсивних чотиривалкових товстолистових станах вимагають заміни композитного матеріалу в зоні роботи опорних валків через 3 роки, а в зоні контакту з робочими валками не служать більше 1 року. Проведені нашим університетом дослідження навантажень на цих клітях у процесі прокатки [3] підтвердили те, що композитний матеріал під захисними

планками в зоні контакту з робочими валками на таких важконавантажених станах працює на межі своїх міцносних можливостей.

Подібна технологія була використана при відновленні зовнішніх проектних розмірів подушок прокатних валків, також оснащених захисними планками, під які наносився композитний матеріал (рис. 3). Термін служби відновлених у такий спосіб подушок зріс у 2-2,2 рази.



Рис. 3 – Відновлення проектних розмірів подушок робочих валків товстолистового стану

Накопичений досвід може бути використаний у монтажі інших великогабаритних конструкцій, враховуючи досвід німецьких фахівців при монтажі мостових споруд. Зупинимося на особливостях конструкцій мостів, а точніше на ділянці, де поверхня ферми моста з'єднується з його опорою. У цьому місці площина металевої опори або плити на опорі повинна ідеально стикатися з такою самою за розміром плитою на фермі моста (рис. 4). Подібне стикування відбувається при використанні потужної вантажопідйомної техніки, а умови досягнення ідеального контакту залишаються далеко не ідеальними: утворене з'єднання опори з фермою мосту (так само, як і описане вище з'єднання планки зі станиною прокатного стану) піддається корозійним процесам при недостатньо герметичному і неповному контакті металевої плити по площині. Погіршують умови експлуатації такого з'єднання також вібраційні навантаження, що виникають під час експлуатації мосту.

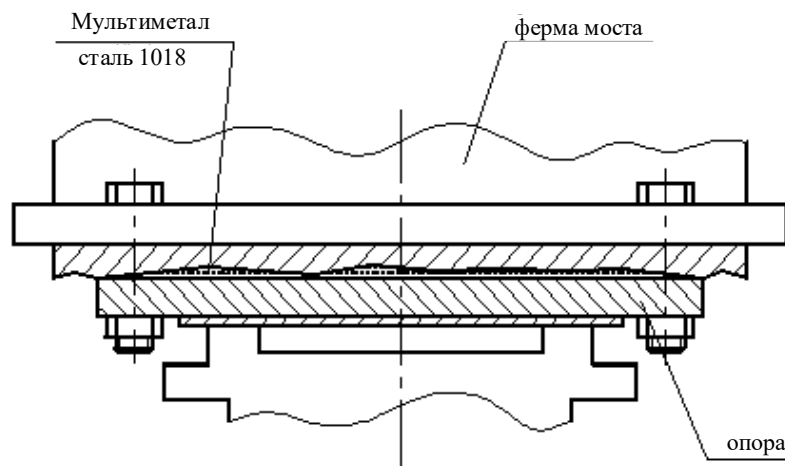


Рис. 4 – Схема монтажу ферми моста на опорі із використанням металополімерного композитного матеріалу

Таким чином, маємо завдання виконати стикування великогабаритних конструкцій. Це завдання вирішено шляхом використання металополімерного композитного матеріалу для створення ідеального контакту опорних поверхонь, герметизації з'єднання та демпфування вібраційних навантажень.

Особливістю застосування описаної технології при проведенні ремонту на відкритій місцевості є те, що при температурах нижче $+10^{\circ}\text{C}$ процес полімеризації металополімерних матеріалів уповільнюється, а при низьких температурах зовсім зупиняється. Однак необхідність у цілорічному застосуванні композитних матеріалів на відкритому повітрі (у тому числі і при низьких температурах) потребує додаткового вивчення процесу полімеризації їх при знижених температурах та пошуку шляхів вирішення цієї проблеми. Слід зазначити, що це питання актуальне і при відновленні станин прокатних станів, оскільки їх ремонт плануються, як правило, на осінній період.

Вивчення проблеми низьких температур у лабораторних умовах з використанням гідравлічного пресу та спеціально виготовлених зразків з металополімерних матеріалів дозволило визначити залежності швидкості полімеризації від температури. Аналіз цих залежностей показує, що нижче температури $+5^{\circ}\text{C}$ вже необхідно застосовувати спеціальні заходи, що прискорюють процес полімеризації, а в діапазоні температур від $+5$ до $+15^{\circ}\text{C}$ робоче навантаження на отримане з'єднання можна прикладати лише після певного часу, що дозволяє композитному матеріалу набрати необхідну міцність.

У разі роботи при знижених температурах для прискорення процесу полімеризації в прокатних цехах металургійних заводів застосовуються тепловентилятори з можливою локалізацією зони, що нагрівається. На відкритій місцевості німецькі фахівці рекомендують застосовувати спеціальні нагрівальні пристрої у вигляді дрютяної спіралі, укладеної в полімерний матеріал та підключеної до джерела живлення.

При цьому немає необхідності нагрівати всю поверхню, що заповнюється металополімерним композитом. Достатньо, як показано на рис. 5, підігріти її центральну зону.

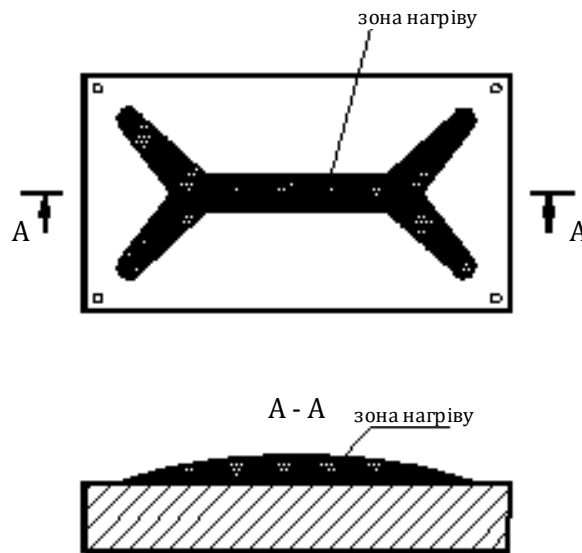


Рис. 5 – Схема попереднього розміщення металополімерного композиту на плиті із зазначенням зони його нагріву

Отже, використовуючи різні технічні прийоми, що прискорюють процес полімеризації, можна застосовувати металополімерні матеріали у будь-яку пору року та в будь-яких умовах.

Висновки

В результаті численних промислових випробувань встановлено, що композитні матеріали дозволяють вирішити низку серйозних ремонтних проблем у прокатному виробництві, зокрема, на важконавантажених листових станах та блюмінгах при відновленні зношених контактних поверхонь цього обладнання.

Перелік використаних джерел:

1. Bastian W. Erfahrungen mit zwei komponenta Reparaturwerkstoffen в Stahl und Walzwerken. *Stahl und Eisen*. 1987. № 20. Sz. 45-48.
2. Іщенко А.О., Підплетний В.І. Ремонт прокатного обладнання металополімерних матеріалів. *Прокатне виробництво*. 2000. № 6. С. 25-27.
3. Іщенко А.О. Нові технології відновлення напрямних металообробних верстатів. *Обладнання та інструмент для професіоналів*. 2003. № 2. С. 26-27.
4. Іщенко А.О., Молнар Л. Монтаж великогабаритних конструкцій з використанням металополімерів. *Обладнання та інструмент для професіоналів*. 2004. № 4. С. 24-26.
5. Словник-довідник зі зварювання та склеювання пластмас / за ред. Б. Є. Патона. Київ, Наукова думка, 1988. 159 с.
6. Technology. Boost mill life with expy grout. *Canadian Mining Journal*. 1979. Vol. 100, № 3. Pp. 25.
7. Айхгорн Ф., Шміц Б.Х. Поведінка клейових сполук при старінні та тривалому навантаженні в атмосферних умовах. *Чорні метали*. 1986. № 21. С. 34-36.
8. Вегнер Г. Нові полімерні матеріали – тенденції фундаментальних досліджень. *Чорні метали*. 1986. № 25. С. 3-6.
9. Іщенко А.О., Артюх Г.В. Випробування нових клеїв для з'єднання еластомерів з металами. *Захист металургійних машин від поломок*. 1997. Вип. 2. С. 159-166.

References:

1. Wolfgang Bastian: Erfahrungen mit zwei komponent Reparaturwerkstoffen in Stahl und Walzwerken. *Stahl und Eisen*, 1987, № 20, pp. 45-48. (Germ.)
2. Ishchenko A.A., Pidpletny V.I. Repair of rolling stock of metal-polymer materials. *Rolling production*, 2000, № 6, pp. 25-27. (Ukr.)
3. Ishchenko A.A. New technologies for restoring guides for metalworking machines. *Equipment and tools for professionals*, 2003, № 2, pp.26-27. (Ukr.)
4. Ishchenko A.A., Molnar L. Installation of large-sized structures using metal polymers. *Equipment and tools for professionals*, 2004, № 4, pp. 24-26. (Ukr.)
5. Paton B.E. *Dictionary-reference on welding and gluing of plastics*. Kyiv, Naukova Dumka Publ., 1988. 159 p. (Ukr.)
6. Technology. Boost mill life with expy grout. *Canadian Mining Journal*, 1979, Vol. 100, № 3, pp. 25.
7. Eichhorn F., Schmitz B.Kh. Behavior of adhesive joints during aging and long-term loading under atmospheric conditions. *Ferrous metals*, 1986, № 21, pp. 34-36. (Ukr.)
8. Wegner G. New polymeric materials - trends in fundamental research. *Ferrous metals*, 1986, № 25, pp. 3-6. (Ukr.)
9. Ishchenko A.O., Artyukh G.V. Testing of new adhesives for joining elastomers with metals. *Protection of metallurgical machines from breakdowns*, iss. 2, pp. 159-166. (Ukr.)

Рецензент: С.В. Білодієнко
д-р техн. наук, проф., УДУНТ

Стаття надійшла 03.02.2023
Стаття прийнята 10.04.2023

**ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕХАНІЗАЦІЇ
ПОРТОВИХ ПЕРЕВАНТАЖУВАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ**

Розглянуто питання модернізації схем механізації вантажопотоків при оптимізації логістичних витрат з метою збільшення пропускної спроможності порту. Досліджено процес перевантаження вантажів з використанням різних підйомно-транспортних машин, представлено схеми комплексної механізації портів терміналів. Проаналізовано основні схеми комплексної механізації у порту на прикладі транспортування штучного вантажу – слябу. Провідною ланкою цих схем є порталний кран, для якого розроблено динамічну 3D модель, що дозволяє формувати сценарій виконання транспортної операції з використанням систем симуляції. За допомогою симулятора можна оцінити показники працездатності, надійності крана. Наведено результати розрахунків характеристик складу, його місткості та схеми розміщення слябів. Для побудови алгоритму логістики операцій з транспортування вантажів визначено вхідні дані (структура вантажообігу, енерговитрати, витрати на логістику), об'єкти (підйомно-транспортне обладнання, судна, залізничний транспорт) та вихідну інформацію у вигляді звіту з результатами моделювання. У роботі запропоновано алгоритм імітаційної моделі портів перевантажувального комплексу, що дозволяє візуалізувати технологічний процес перевантажувальних операцій та проводити оптимізацію параметрів за заданими критеріями якості.

Ключові слова: транспортний термінал, порталний кран, автотранспортувач, склад, залізничний транспорт, імітаційна модель, схема механізації.

V.V. Suglobov, K.V. Tkachuk. Improving the mechanism of port handling complexes. The issue of modernization of cargo flow mechanization schemes, while optimizing logistics costs with the aim of increasing port capacity, was considered. The process of cargo transshipment using various lifting and transport machines is studied, the schemes of complex mechanization of port terminals are presented. The main schemes of complex mechanization in the port are analyzed on the example of transportation of artificial cargo - slab. The leading link of these schemes is the gantry crane, for which a dynamic 3D model has been developed, which allows you to create a scenario of the transport operation using simulation systems. With the help of the simulator, it is possible to evaluate indicators of performance and reliability of the crane. The results of the calculations of the characteristics of the warehouse, its capacity and the layout of the slabs are given. To build a logistics algorithm for cargo transportation operations, input data (structure of freight traffic, energy costs, logistics costs), objects (lifting and transport equipment, ships, railway transport) and output information in the form of a report with simulation results are determined. The paper proposes an algorithm for the simulation model of the port transshipment complex, which allows you to visualize the technological process of transshipment operations and optimize the parameters according to the specified quality criteria. The materials of the article can be useful to specialists of the mechanization services of sea and river ports, as well as used in the educational process as tasks for laboratory, practical and course work.

Key words: transport terminal, gantry crane, truck loader, warehouse, railway transport, dynamic model, simulation model, mechanization scheme.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-1743-0894, suglobov.v.v@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-0309-1644, ev13tk@gmail.com

Постановка проблеми. Від рівня оснащення та розвитку інфраструктури морських та річкових портів залежить конкурентоспроможність транспортного терміналу, де основними засобами механізації є порталні крани, що виконують завантаження та розвантаження суден типу Handymax, Panamax. Вводити додаткові вантажопотоки дозволяє використання мобільних перевантажувальних машин, а саме – фронтальних автотранспортувачів, що мають високу маневреність і мобільність. Так, в умовах сучасних транспортно-економічних зв'язків необхідно впроваджувати нові схеми механізації вантажопотоків, при цьому скорочуючи витрати на логістику з метою збільшення пропускної спроможності порту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [1, 2] розглядаються проблеми портової діяльності та можливості проведення різних портових реформ, але не враховуються витрати на логістику вантажопотоків. Дослідниками визначено функції сучасних портів як ключового елемента ланцюжка логістики з доставки вантажів, проте не запропоновано систему організаційної взаємодії суб'єктів вантажно-розвантажувальних комплексів. Наведено рекомендації з перевантаження технологічних модулів, великогабаритних та особливо важких вантажів, але не відображено ефективність запропонованих способів та їх впливу на пропускну спроможність порту. Розвиток матеріально-технічної бази підприємств морського транспорту досліджувався в роботах О.О. Андрієнка, М.І. Котлубей, І.О. Лапкіної, В.С. Ловейкіна, В.А. Міхеєва, В.М. Пустового та ін. На сьогоднішній день відсутні розробки моделей взаємодії автотранспорту, залізничного транспорту та портового терміналу з метою оптимізації складських площ та скорочення витрат на логістику. Тому підвищення якості, надійності перевезень, мінімізація часу доставки вантажу, збільшення пропускної спроможності порту за рахунок вдосконалення управління портовими перевантажувальними комплексами є актуальним завданням.

Мета статті – удосконалення схем механізації транспортно-логістичної системи порту, що дозволить скоординувати вантажопотоки та підвищити ефективність спільної роботи підйомно-транспортних машин.

Виклад основного матеріалу. Завдання збільшення пропускної спроможності порту вимагає модернізації перевантажувальних комплексів. У зв'язку з цим необхідно коригувати та оптимізувати схеми механізації вантажно-розвантажувальних, транспортних та складських операцій з урахуванням загальних витрат порту на логістику. Схема комплексної механізації включає підйомні машини, вантажозахоплювальні пристрої, рухомий склад, вантажоутворюючий пункт (склад).

Розглянемо основну схему комплексної механізації в порту з прикладу транспортування штучного вантажу – сляба. Для слябів, що відвантажуються на судно, транспортування здійснюється за схемою: залізнична платформа – автотранспортувач – склад – тягач – автотранспортувач – залізнична платформа – порталний кран (рис. 1). Провідною ланкою цієї схеми є порталний кран, який має універсальність та технологічну функціональність. Ці машини характеризуються великою вантажопідйомністю, збільшеним вильотом стріли, обробкою будь-яких трюмів суховантажних суден та здатністю перевантажувати будь-який тип вантажу. Внутрішній контур порту забезпечує переміщення рухомого складу, що скорочує витрати на логістику, експлуатаційні та перевантажувальні операції.

Відомо, що порталний кран має найбільший час циклу робочих операцій з усіх транспортних машин. Тому слід звернути увагу на забезпечення безпечної експлуатації порталних кранів, збереження працездатності та технічних характеристик машин. Формуючи сценарій роботи крана з використанням систем симуляції Workcell Simulator, Dyn-Soft RobSim, з'являється можливість оцінити необхідні показники. У зв'язку з цим, авторами [3] побудовано динамічну 3D модель порталного крана (рис. 2), для якої вхідними даними приймалися показники перевантажувальної операції (вантажопідйомність крана, швидкість підйому вантажу, швидкість переміщення крана, висота підйому, виліт стріли, точність кранового позиціонування).

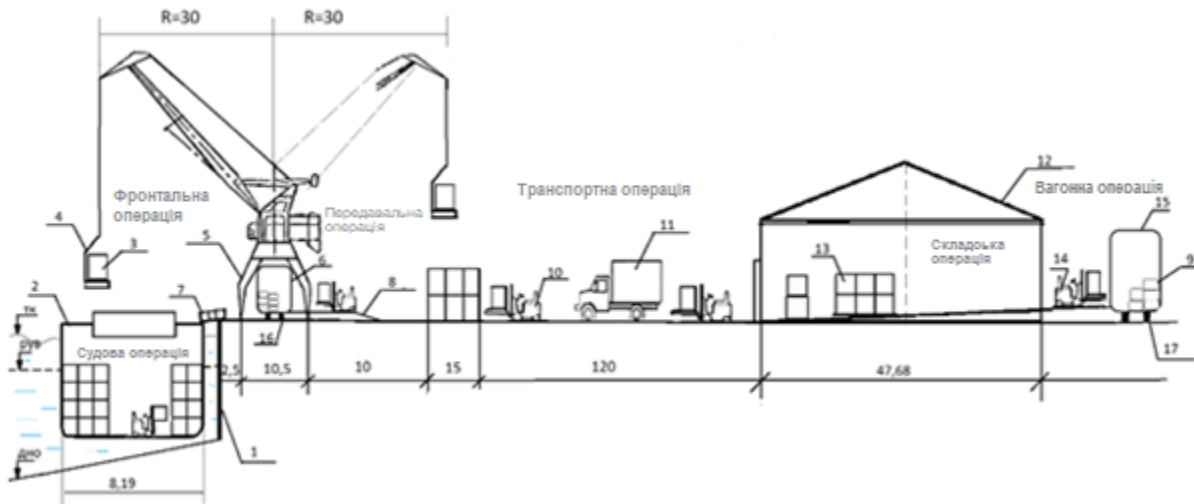


Рис. 1 – Схема комплексної механізації перевантаження вантажів з використанням автонавантажувачів: 1 – причал, 2 – трюм, 3 – вантаж, 4 – вантажне захоплювальне обладнання, 5 – порталний кран, 6 – передавальна операція, 7 – береговий плавзасіб, 8 – вантажна операція, 9 – вагонна операція, 10 – автонавантажувач, 11 – автотранспорт, 12 – склад, 13 – складська операція, 14 – розвантажувальна операція, 15 – залізничний транспорт

У цій схемі управління вантажопотоком важливу роль відіграє фронтальний автонавантажувач, експлуатація якого проходить в умовах технологічних ліній морських портів, і ряд режимів навантаження (залізничні переїзди; нерівності шляху пересування як на причалі, так і в трюмі судна; поодинокі перешкоди, що зустрічаються, та ін.), які призводять до зниження їхньої довговічності. Авторами запропонована динамічна 3D модель фронтального автонавантажувача, що дозволяє оцінити його довговічність та причини випадкових відмов у роботі [4].

Аналіз запропонованої схеми механізації показав, що навантажувачі вимагають використання великих розмірів корисної площі складу для маневрових робіт, проїздів. В результаті продовжується шлях транспортування вантажу до складу. Ці операції зменшують продуктивність портового перевантажувального комплексу.



Рис. 2 – Динамічна 3D модель порталного крана

Наступний варіант схеми комплексної механізації (рис. 3) характеризується наявністю мостового крана та приводного роликівого конвеєра як допоміжне обладнання [4]. Перевагою схеми, що проектується, є збільшення кількості майданчиків під розміщення вантажу без зміни габаритів складу. Це дозволяє збільшити пропускну здатність порту, скоротити час циклу, однак, з'являються обмеження за характеристиками вантажу, що переміщується, які диктуються експлуатаційними показниками конвеєра.

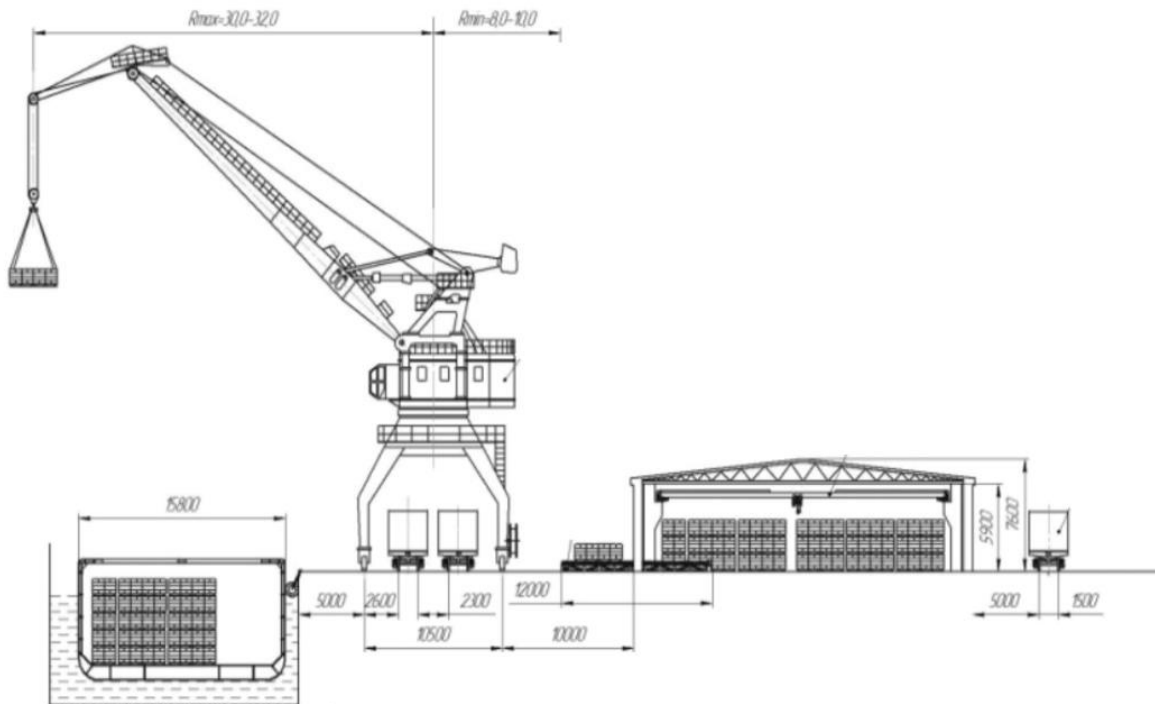


Рис. 3 – Схема комплексної механізації перевантаження вантажів з використанням мостового крана та роликівого конвеєра

Для оцінки схем механізації портового перевантажувального комплексу розраховано місткість складу та сплановано розміщення на ньому слябів. Вихідними даними визначення основних параметрів складів є вантажопотоки і режим роботи складів.

При транспортуванні слябів з використанням автотранспорту встановлено, що при вантажопотоці 1120 т/добу місткість складу для великовагових довгомірних вантажів повинна становити 2340 т. Враховуючи максимальний виліт стріли портального крана, що дорівнює 34 м, радіус розвороту автотранспорту та необхідну відстань від крана, максимальна довжина складу може досягати 22 м. Для уточненого значення виконано розрахунок для знаходження геометричних параметрів складу, в результаті яких площа складу становила 1020 м², ширина складу прийнята 16 м, а довжина – 63,75 м. Такий результат не задовольняє можливостям портального крана, тому необхідно розташовувати сляби в 3 яруси (рис. 4), між якими будуть розміщені дерев'яні підкладки, тоді параметри складу будуть такими: площа – 340 м², ширина – 16 м, довжина – 21,3 м.

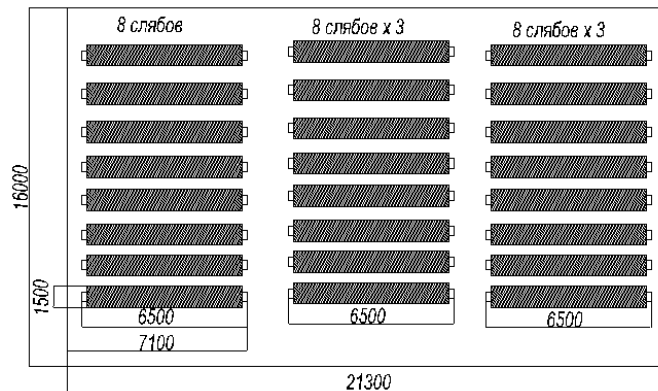


Рис. 4 – Розміщення слябів на складі у схемі транспортування з використанням авто-навантажувачів

При транспортуванні слябів з використанням мостового магнітного крана, проліт якого становить 34,5 м, максимальна довжина складу може досягати 15 м з урахуванням радіусу розвороту автотранспорту, ширини дороги під авто, ширину залізничних колій. Відповідно до розрахунку геометричних параметрів складу, розташовувати сляби потрібно в 4 яруси (рис. 5), при цьому параметри складу будуть такими: площа – 255,6 м², ширина – 17 м, довжина – 15 м.

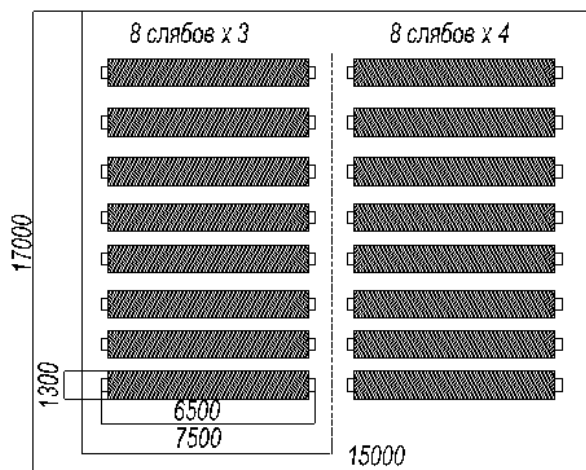


Рис. 5 – Розміщення слябів на складі у схемі транспортування з використанням мостового крана

Виходячи з представлених схем, кількості операцій, що їх складають, розрахунку складу, обрано найбільш оптимальну схему – перевантаження з використанням мостового крана з підвіскою з двох електромагнітних захоплень.

Для оптимізації портових вантажопотоків відповідно до обраної схеми необхідно розробити імітаційну модель всіх пов'язаних з нею транспортних процесів. Зважаючи на велику кількість операцій, транспортні процеси описуються аналітичним, ймовірнісним і імітаційним методами, які враховують різні умови роботи, циклічний характер роботи, безліч критеріїв якості для транспорту.

Для побудови алгоритму логістики операцій з транспортування вантажів визначено вхідні дані (структура вантажообігу, енерговитрати, витрати на логістику), об'єкти (підйомно-транспортне обладнання, судна, залізничний транспорт) та вихідну інформацію у вигляді звіту з результатами моделювання. На основі розробленого алгоритму побудовано імітаційну модель, що відображує технологічний процес портового комплексу (рис. 6).

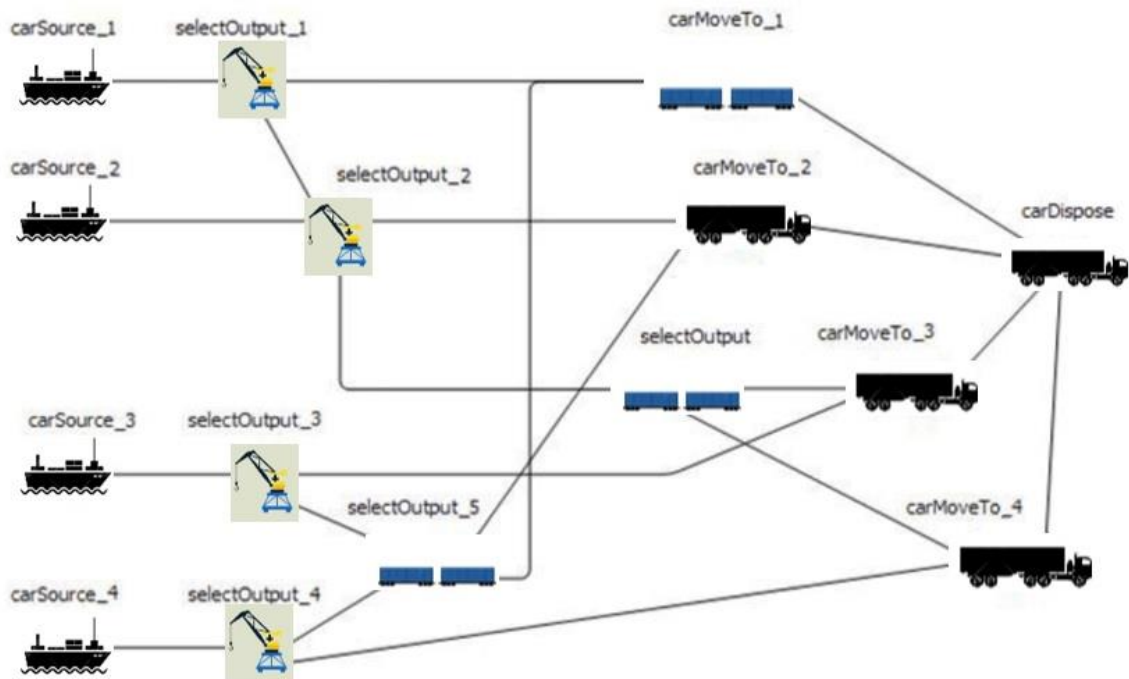


Рис. 6 – Імітаційна модель портового перевантажувального комплексу

Імітаційна модель дозволяє візуалізувати технологічний процес перевантажувальних операцій та проводити оптимізацію параметрів за заданими критеріями якості

Висновки

Проаналізовано основні схеми комплексної механізації у порту на прикладі транспортування штучного вантажу – слябу. Провідною ланкою цих схем є порталний кран, тому авторами розроблено динамічну 3D модель крана, яка формує сценарій роботи транспортної операції з використанням систем симуляції. За допомогою симулятора можна оцінити показники працездатності, надійності крана.

Представлені результати розрахунків місткості складу, його геометричних характеристик із зазначенням схем розміщення вантажу на майданчику. Розроблено алгоритм логістики операцій з транспортування вантажів, на основі якого побудовано імітаційну модель портового перевантажувального комплексу.

Матеріали статті можуть бути корисними фахівцям служби механізації морських та річкових портів, а також використані в навчальному процесі як завдання до лабораторних, практичних та курсових робіт.

Перелік використаних джерел:

1. Примачёв Н.Т., Вовк О.Ю. Эффективность функциональной деятельности предприятий морского транспорта. Одесса: ИПРИЭЭИ, 2011. 1247 с.
2. Haralambides H.E., Ma S., Veenstra A.W. World wide experiences of Port Reform. In book: Transforming the Port and Transportation Business. Acco Publishing, Leuven, 1997. Pp. 1-27.
3. Ткачук К.В., Суглобов В.В. Впровадження комп'ютерного імітаційного моделювання в експериментальні дослідження порталних кранів. *Підйомно-транспортна техніка*. 2020. Вип. № 2(63). С. 107-114. DOI: <https://doi.org/10.15276/pidtt.2.63.2020.09>.
4. Суглобов В.В., Лаврик В.П., Нефедов И.А. Разработка динамической модели автопогрузчика. *Підйомно-транспортна техніка*. 2006. № 3. С. 32-41.

References:

1. Primachev N.T., Vovk O.Iu. *Efficiency of functional activities of maritime transport enterprises*. Odessa, IPRiEEI Publ., 2011. 1247 p. (Rus.)
2. Haralambides H.E., Ma S., Veenstra A.W. World wide experiences of Port Reform. *In book: Transforming the Port and Transportation Business*. Acco Publ., 1997, pp. 1-27.
3. Tkachuk K.V., Suglobov V.V. Provided computer simulated modeling in experimental additional portal cranes. *Hoisting and conveying equipment*, 2020, № 2(63), pp. 107-114. doi: <https://doi.org/10.15276/pidtt.2.63.2020.09>. (Ukr.)
4. Suglobov V.V., Lavrik V.P., Nefedov I.A. Development of a dynamic model of a forklift. *Hoisting and conveying equipment*, 2006, № 3, pp. 32-41. (Rus.)

Рецензент: А.О. Іщенко
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 03.02.2022

Стаття прийнята 10.04.2022

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.184:666.762

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288166

© Стоянов О.М.¹, Нізяєв К.Г.², Малій Х.В.³, Кухар В.В.⁴**ЗАСТОСУВАННЯ ВОГНЕТРИВКИХ МАТЕРІАЛІВ
ДЛЯ СТАЛЕРОЗЛИВНОГО КОВША**

Виконано аналіз умов служби вогнетривів та різні варіанти комбінованого футерування сталерозливних ковшів, які експлуатуються в сталеплавильних цехах з відділеннями позапічної обробки сталі, а також визначено основні тенденції її розвитку. Розглянуті технологічні умови експлуатації сталерозливних ковшів з основною футеровкою, а також визначено причини недостатньої стійкості вогнетривів. Показано, що світова практика характеризується використанням та інтенсивним удосконаленням основної футеровки сталерозливних ковшів за рахунок використання нових матеріалів з підвищеними вогнетривкими та експлуатаційними характеристиками.

Ключові слова: футерування, вогнетрив, сталерозливний ківш, позапічна обробка сталі, нові матеріали, експлуатаційні характеристики.

O.M. Stoianov, K.H. Nizyaev, Kh.V. Malii, V.V. Kukhar. Application of refractory materials for steel ladles. The article analyzes the service life of refractories and various options for combined lining of steel ladles used in steelmaking shops with out-of-furnace steel processing departments, and identifies the main trends in its development. The use of various types of lining is analyzed based on the experience of Japan, Germany, Austria, and France. The technological conditions of operation of steel ladles with the main lining are considered. Under operating conditions, the lining areas near the slag belt and the place where the jet hits the bottom of the ladle are subject to the greatest destruction, so it is advisable to install high-quality refractories in these areas. In addition, the reasons for the insufficient stability of refractories are identified, including decarburization, corrosion, ladle slag formed during out-of-furnace metal processing, the use of synthetic additives to slag, high thermal conductivity of refractory materials during operation, and others. Ways to increase the service life of steel ladles are identified. It is shown that the world practice is characterized by the use and intensive improvement of the main lining of steel ladles through the use of new materials with increased refractory and operational characteristics. The experience of refractory improvement by Shinagawa Refractories, TYK Corp, Plibrico, Nippon Steel, Krosaki Harima, and IPSCO Steel, including practical testing at production, is presented. It is established that the high cost of consumables and increased requirements for manufacturing technology hinder the massive introduction of the developed technologies at metallurgical enterprises.

Key words: lining, refractory, steel ladle, post-bake treatment of steel, new materials, operational characteristics.

¹ канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-7136-7403, alexander.stoyanov@mipolytech.education

² д-р техн. наук, професор ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-9260-0964, konstantin.nizyaev@mipolytech.education

³ канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-9046-4268, kristina.maliy@mipolytech.education

⁴ д-р техн. наук, професор ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com

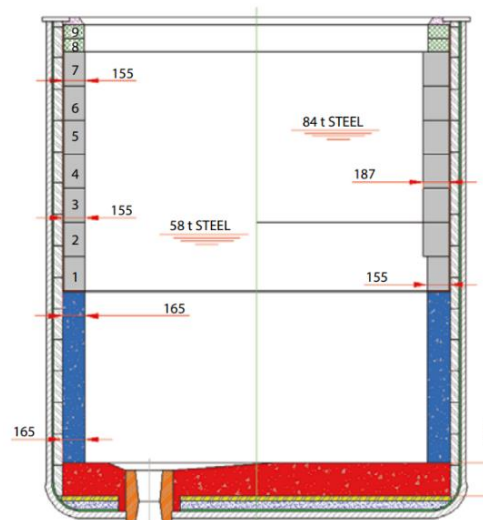
Постановка проблеми. Стрімкий розвиток на металургійних підприємствах позапічної обробки та пов'язане з цим перенесення частини операцій з плавильного агрегату до сталерозливного ковша призвело до того, що ківш став одним з основних технологічних агрегатів. Внаслідок цього суттєво збільшилася тривалість перебування рідкого металу та шлаку в ковші, у зв'язку з чим зросло теплове навантаження на футерування ковша та збільшився його знос. Це послужило імпульсом для інтенсифікації досліджень створення нових вогнетривких матеріалів і використанням диференційної футерування з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Постановка завдання. Визначення основних тенденцій розвитку в напрямку способів футерування сталерозливних ковшів і аналіз умов експлуатації вогнетривких матеріалів при позапічній обробці металу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із лідерів з виробництва високоякісних матеріалів для футеровок сталеплавильних агрегатів традиційно вважається Японія [1], а також деякі європейські країни, такі як Німеччина, Австрія, Франція [2-5]. Успіхи Японії пов'язані, перш за все, з розробкою монолітних футеровок для сталковшів (рис. 1). У Європі, зокрема в Україні, продовжують домінувати футерування з формованих вогнетривів, хоча надалі не виключена можливість переходу на монолітні футерування через їх більш високу ефективність [6].



а



б

Рис. 1 – Сталерозливний ківш з монолітною футерівкою (а) [7] і комбінованою футерівкою (б) [8]

Застосування комбінованого футерування (рис. 2) викликано різними умовами служби вогнетривів у певних ділянках ковша. Як відомо [7], найбільшому руйнуванню піддаються ділянки футерування в районі шлакового поясу та місці удару струменя по дну ковша, тому доцільно на цих ділянках встановлювати високоякісні вогнетриви, здатні протистояти як хімічній, так і фізичній корозії [9]. Як правило, шлаковий пояс ковша виконується з периклазовуглецевих вогнетривів, а стіни ковша – з високоміцних матеріалів, що мають високу температуру деформації.

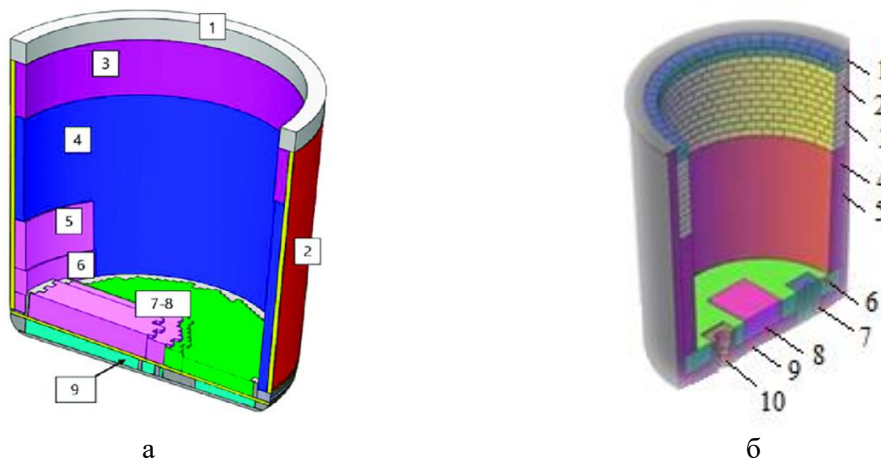


Рис. 2 – Варіанти диференційного (комбінованого) футерування ківша: (а) – за джерелом [10]: 1 – верхній шар бетону; 2 – боковий теплоізоляційний шар; 3 – шлаковий пояс; 4 – робочий шар; 5–6 – пристінна цегла; 7–8 – донний шар; 9 – нижній теплоізоляційний шар; (б) – за джерелом [11]: 1, 4, 6 – робочий шар; 2 – шлаковий пояс; 3, 5 – боковий теплоізоляційний шар; 7 – блок для подачі газів; 8 – «бійне» місце; 9 – нижній теплоізоляційний шар; 10 – гніздова цегла

Виклад основного матеріалу. На вітчизняних та закордонних металургійних комбінатах застосовують диференційне футерування сталерозливних ковшів, яке складається з периклазовуглецевих (шлаковий пояс) та алюмопериклазовуглецевих вогнетривів (стіни). Вогнетриви шлакового поясу виготовлені на основі плавленого периклазу чистотою не менше 98%, який має високу опірність як до первинних конвертерних, так і до вторинних ковшових шлаків. Ще однією з переваг даного типу вогнетривів є їх слабка змочуваність шлаком.

Руйнування футерівки в процесі роботи на початковому етапі пов'язане з зневуглицюванням. Подальшою стадією зношування є перехід корунду в шлак при його взаємодії з вапняною, залізистою та силікатною складовими шлакового розплаву [12].

Також застосовують і більш складну схему футерування, яка виглядає наступним чином: днище – алюмопериклазовуглецева (робочий шар у «бійній» частині) та периклазохромітова цегла (в іншій частині); стіни – високоглиноземна набивна маса (робочий шар); шлаковий пояс – периклазовуглецева цегла (робочий шар). Такий варіант футеровки забезпечує стійкість понад 50 наливів за умов повного циклу позапічної обробки сталі.

Можливе використання спечених периклазовуглецевих вогнетривів при футеруванні сталерозливного ковша. Для футерування ділянки шлакового поясу застосовується крупнокристалічний периклаз з вмістом MgO близько 98%. Для днища ковша застосовують вогнетриви алюмопериклазовуглецевого складу з використанням алюмомагнезійної шпінелі, що містить 28% MgO та 72% Al_2O_3 . Застосування цих видів вогнетривів дозволило досягти стійкості стін більше 110 плавок (при використанні гарячих ремонтів).

Деякі закордонні металургійні підприємства для кладки стін використовують формовані Al_2O_3 – MgO – C вогнетриви. Вибір таких вогнетривів базується на їхніх службових характеристиках за певних умов експлуатації. Перевага даному виду футеровки надається, в першу чергу, через нижчі витрати на матеріали та футерування.

Як відомо, на термін служби футерівки сталерозливних ковшів істотно впливає ковшовий шлак, що утворюється під час позапічної обробки металу [13]. Багато сучасних металургійних підприємств до етапу позапічної обробки здійснюють відсікання конвертерного шлаку з подальшою добавкою в ківш легкоплавких синтетичних матеріалів на основі CaO , CaF_2 і, в деяких випадках, Al_2O_3 в різних співвідношеннях. Такі синтетичні шлаки виявляють підвищену агресивність по відношенню до основної футеровки сталерозливних ковшів, тому при виборі складу шлакової суміші прагнуть так підібрати матеріали, щоб зберегти високу здатність рафінування шлаку і, в той же час, знизити його негативний вплив на знос вогнетриву. Наприклад, на деяких

вітчизняних підприємств при використанні на етапі позапічної обробки на установці ківш-піч, для наведення рафінувального шлаку вводять не менше 10 кг/т вапна, 1,5 кг/т плавикового шпату та алюмінію. При використанні шлаку, що містить 0,5-0,8% FeO; 0,1-0,5% MnO; 0,9-1,2% $\Sigma(\text{FeO}+\text{MnO})$, основністю не менше ніж 3,0 та попередньому розкисленні шлаку алюмінієвим дротом або катанкою з витратами близько 1,0 кг/т сталі, були покращені можливості з видалення сірки, а також вдалося значно поліпшити умови служби вогнетривкої футеровки.

На заводі «IPSCO Steel» (США) у конструкцію комбінованої футеровки сталерозливних ковшів були впроваджені глиноземомагнезіальнографітові ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-C}$) вогнетриви, які замінили доломітові вогнетриви, що традиційно використовуються при футеруванні днища та стін. На даному заводі для прискореної десульфурзації використовується рідкий шлак з заданими параметрами, які досягаються шляхом додавання вапна з невеликою кількістю плавикового шпату і оксиду магнію. Ковшевий шлак має наступний склад: CaO – 51%; SiO_2 – 4,5%; MgO – 9%; Al_2O_3 – 25%; Fe_2O_3 – 0,5%. При роботі зі шлаком такого складу стійкість доломітового футерування не перевищувала 40-45 плавов. При заміні доломітових вогнетривів на глиноземомагнезіальнографітові цей показник значно покращився і становив у середньому 100 плавов. Глиноземомагнезіальнографітові вогнетриви не тільки дозволили значно збільшити кампанію ковшів, так і знизити глибину проникнення металу до 5%, що було виявлено при перефутеруванні ковшу.

Одним з напрямків футерування сталерозливних ковшів є використання монолітних футеровок. Зокрема, майже на всіх підприємствах Японії сталюковші переведені на монолітне футерування.

Прогрес в галузі вогнетривів пов'язаний, перш за все, з розробкою та використанням низькоцементних вогнетривких бетонів [14-16], сфера застосування яких значно зросла в останні роки. Низькоцементні вогнетриви – високоміцні матеріали, що мають підвищену корозійну стійкість. Найбільшого поширення набули глиноземошпінельні вогнетриви, що містять до 20% шпінелі, 95% Al_2O_3 і 1,7% CaO, а також глиноземомагнезіальні, що містять 5,5% MgO і 1,36% CaO з добавкою 0,5% тонкодисперсного кремнезему. Корозійна стійкість глиноземошпінельного бетону підвищується зі збільшенням вмісту шпінелі [17, 18]. При зростанні вмісту шпінелі понад 30% знижується стійкість бетону до взаємодії зі шлаком. У глиноземошпінельних бетонах шпінель додають у вогнетривку суміш, у той час як у глиноземомагнезіальних вогнетривах шпінель утворюється в результаті взаємодії між вільними оксидами Al_2O_3 і MgO. Зміна вмісту оксиду магнію у бік збільшення сприяє підвищенню корозійностійких властивостей з одночасним зниженням здатності протистояти проникненню шлаку, що може призвести до розтріскування футеровки. Для цього необхідно чітко регулювати вміст оксиду MgO з урахуванням умов роботи вогнетривів. Останнім часом намітилася тенденція переходу від глиноземошпінельних до глиноземомагнезіальних бетонів, що пов'язано з більш високою стійкістю останніх до корозії та проникнення шлаку, а також нижчою вартістю.

Одним з нових матеріалів, що застосовуються при виробництві монолітних футеровок, є шпінельно-периклазовий бетон, створений японською фірмою «Shinagawa Refractories» [19, 20]. Цей матеріал має приблизно такі ж властивості, як глиноземомагнезіальний, але відрізняється тим, що здатний поєднувати як підвищену корозійну стійкість, так і протистояти проникненню шлаку завдяки наявності грубозернистої шпінелі.

Останнім часом викликає інтерес застосування в сталеплавильному виробництві матеріалів на основі алюмомагнезіальної шпінелі, які мають ряд переваг у порівнянні з магнезіальними та корундовими матеріалами з точки зору їх експлуатації.

Істотних успіхів у розробці та застосуванні бетонів для монолітного футерування сталерозливних ковшів, що містять шпінель, досягнуто фірмою «Plibrico» (Німеччина). Низькоцементний бетон, що містить 93% Al_2O_3 ; 4,8% MgO; 1,2% SiO_2 ; 0,5% CaO був застосований для футерування не тільки стін і днища, а й для шлакового поясу. З використанням проміжних ремонтів стійкість футерівки перевищила 500 плавов.

Шпінельні бетони з добавкою металевого волокна виявилися придатними і для монолітного футерування днища сталерозливних ковшів. При експлуатації у шлаковому поясі бетони, що містять шпінель, не мають достатньої стійкості до зносу. З метою підвищення стійкості футерування в районі шлакового поясу в Японії розроблені магнезіальноцирконові бетони, що містять 84-85% MgO, 6-8% ZrO_2 , що забезпечило підвищені корозійностійкі властивості.

В Австрії активно застосовують монолітне корундове футерування сталерозливних ковшів на основі табулярного глинозему високої якості [21, 22]. Стійкість стінок ковша перевищила 350 плавок при використанні ремонтів у вигляді підливу тієї ж маси. Після видалення формувальних шаблонів (при виготовленні нового футерування) просушка ковша здійснюється протягом 36-48 годин з наступним розігрівом перед початком експлуатації до 1100-1200°C.

Удосконалення магнезійношпінельних вогнетривів, призначених для футерування ковшів, здійснила японська фірма «ТҮК Сорг». В першу чергу було досліджено ефективність добавки до магнезійношпінельного матеріалу оксиду титану (TiO_2). Зі збільшенням добавки оксиду титану значно знижувалася пористість вогнетриву, і це стримувало проникнення в нього шлаку. При добавці 2% TiO_2 стійкість футерівки сталерозливного ковша зросла на 10%.

Випробування добавки оксиду хрому (Cr_2O_3) у кількості 2 і 3% також викликало зниження пористості. За результатами фізико-механічних досліджень та вивчення структурного розтріскування для промислових випробувань вибрали матеріал із добавкою 3% оксиду хрому (есколаїт). Порівняльний хімічний склад вогнетриву робочої поверхні показав, що добавка Cr_2O_3 стримує проникнення шлаку у футеровку. Вдосконалений варіант футеровки дає ефект підвищення стійкості на 25%.

Також однією з проблем під час експлуатації ковшів з основною футеровкою є висока теплопровідність вогнетривких матеріалів і, як наслідок, виникає необхідність знижувати тепловтрати при використанні таких видів вогнетривів. Завдання зниження втрат теплоти металом в сталерозливному ковші може вирішуватися за кількома напрямками: раціональна схема експлуатації сталерозливних ковшів, теплоізоляція дзеркала металу, використання футерованих кришок в період розливання сталі і запобігання втрат тепла через шар футеровки, прогрівання ковшу на спеціально обладнаних стендах під час очікування плавки.

Регулювання втрат тепла через стінку ковша шляхом підбору теплопровідності шарів футерування або збільшення її товщини обмежується місткістю ковша, а також його додатковими функціями [23].

З метою зниження втрат теплоти зазвичай зменшують товщину арматурного шару та додають шар теплоізоляційного матеріалу між арматурним шаром та металевим кожухом ковша. У Німеччині отримано позитивний результат при застосуванні теплоізоляції з волокнистих плит на неорганічній зв'язці теплопровідністю при 300 і 600°C – 0,08 і 0,16 Вт/(м·К) відповідно, при товщині плити 12 мм. Однак у процесі розширення футерування при її нагріванні (на стенді розігріву або під час її експлуатації), ці плити можуть стискатися і достатнє охолодження футеровки ковшу може призвести до утворення зазору між арматурним та теплоізоляційним шарами. Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є застосування міцних ізоляційних плит з об'ємною стабільністю, яка виключає деформацію під дією футеровки, що розширюється.

Виміри показали, що в останньому випадку при товщині футеровки 287,5 мм (175 мм периклазовуглецева цегла, 25 мм засипка, 75 мм високоглиноземна цегла – арматурний шар, 12,5 мм ізоляційна плита) втрати теплоти при використанні такої ізоляції виявилися на 20% меншими, ніж без неї.

З метою зменшення тепловтрат через шар вогнетриву фірмами «Nippon Steel» та «Krosaki Harima» проведені дослідження щодо зниження теплопровідності та підвищення термостійкості периклазовуглецевої цегли. Удосконалення здійснені шляхом зниження вмісту графіту з метою зменшення теплопровідності та шляхом нанесення на магнезійні зерна пекового покриття для покращення термостійкості. Пори, що утворилися в результаті цього, сприяли зниженню напруги, пригнічували зростання тріщин і покращували термостійкість.

Нові периклазовуглецеві вироби з 8% графіту були випробувані в промислових умовах з метою визначення їх впливу на падіння температури рідкої сталі в сталерозливному ковші [24, 25]. Величина зниження температури сталі в період між закінченням випуску металу з конвертера і початком розливу впала приблизно на 17°C при зменшенні вмісту графіту в вогнетривах від 12 до 8%, що супроводжувалось зниженням теплопровідності від 20 до 15 Вт/(м·К) при 550°C.

Зведені характеристики вогнетривів наведені в таблиці.

Таблиця

Зведені характеристики вогнетривів

Місце застосування	Назва матеріалу	Склад матеріалу	Стійкість (кількість плавок)	Примітка
1	2	3	4	5
дно ковша	алюмопериклазо–вуглецева цегла	70% Al ₂ O ₃ –MgO–10% C	понад 50	–
	периклазохромітова цегла	MgO від 60 мас.% включ., Cr ₂ O ₃ від 4 до 20 мас.% включ.		
стіни ковша	високоглиноземна набивна маса	Al ₂ O ₃		
ділянка шлакового поясу	периклазовуглецева цегла	MgO близько 98%	110	–
ділянка шлакового поясу	спечена периклазовуглецева цегла	крупнокристалічний периклаз з вмістом MgO близько 98%		
дно ковша	алюмопериклазо–вуглецевий вогнетрив	28% MgO та 72% Al ₂ O ₃		
стіни ковша	глиноземомагнезійно–графітові вогнетриви	Al ₂ O ₃ –MgO–C	100	нижчі витрати на матеріали та футерування
дно ковша	доломітові вогнетриви	MgO ₃ , CaCO ₃	40–45	Для шлаку з хімічним складом: CaO – 51%; SiO ₂ – 4,5%; MgO – 9%; Al ₂ O ₃ – 25%; Fe ₂ O ₃ – 0,5%.
стіни ковша				
монолітне футерування	глиноземошпінельні вогнетриви	до 20% шпінелі, 95% Al ₂ O ₃ і 1,7% CaO	–	Підвищена корозійна стійкість і зниження протистояння проникненню шлаку
	глиноземомагнезійні вогнетриви	5,5% MgO і 1,36% CaO з добавкою 0,5% тонкодисперсного кремнезему	–	
монолітне футерування	шпінельно–периклазовий бетон	28,2% MgO; 71,8% Al ₂ O ₃	–	Підвищена корозійна стійкість і протистояння проникненню шлаку
дно ковша	низькоцементний бетон	93% Al ₂ O ₃ ; 4,8% MgO; 1,2% SiO ₂ ; 0,5% CaO	500 плавок	–
ділянка шлакового поясу				
ділянка шлакового поясу	магнезійноцирконові бетони	84–85% MgO, 6–8% ZrO ₂	–	підвищені корозійні властивості
монолітне футерування	корундове футерування	Al ₂ O ₃	350 плавок	–

Продовження таблиці

1	2	3	4	5
монолітне футерування	магнезійношпінельні вогнетривки	MgAl ₂ O ₄ , додавання 2% TiO ₂	-	стійкість футерування зросла на 10%
монолітне футерування		MgAl ₂ O ₄ , додавання 2–3% Cr ₂ O ₃		зниження пористості, стійкість футерування зросла на 25%
монолітне футерування	периклазовуглецева цегла	MgO з 8% графіту	-	зниження теплопровідності та підвищення термостійкості

Висновки

Таким чином, світова практика характеризується використанням та інтенсивним удосконаленням основної футеровки сталерозливних ковшів. Переважним на найближче майбутнє стає низькоцементне футерування, що застосовується в Японії та ряді європейських країн. Але висока вартість витратних матеріалів та підвищені вимоги до технології виготовлення стримують її масове впровадження на металургійних підприємствах. Тому найбільш поширеним на сьогодні варіантом для вітчизняних підприємств є комбіноване футерування на основі формованих вогнетривких виробів, що містять оксиди магнію і алюмінію з добавками вуглецю.

Перелік використаних джерел:

- Kataoka S. Refractories for steelmaking in Japan; Seikoyo taikabutsu no genjo (Nippon ni okeru seikoyo taikabutsu no henshen). *Taikabutsu (Refractories)*. 1996. Vol. 48, iss. 1. Pp. 201-227.
- Akselrod L., Garten V. An alternative lining of steel ladles: technical and economic aspects. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2018. № 12. Pp. 72-80. DOI: <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-12-72-80>.
- Durmashkin A.L., Orlov V.A., Kortek' A.A. Development of designs of slide gates and a combination of refractories for them for steel teeming ladles and tundishes. *Refractories and Industrial Ceramics*. 1993. № 34. Pp. 291-297. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01293235>.
- Degradation mechanisms of magnesia-chromite refractories in vacuum-oxygen decarburisation ladles during production of tainless steel / P.T. Jones, B. Blanpain, P. Wollants, R. Ding, B. Halleman. *Ironmaking and Steelmaking*. 2000. Vol. 27, no. 3. Pp. 228-237. DOI: <https://doi.org/10.1179/030192300677525>.
- Boenzi F., Ordieres-Meré J., Iavagnilio R. Life Cycle Assessment Comparison of Two Refractory Brick Product Systems for Ladle Lining in Secondary Steelmaking. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Pp. 1295-1317. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11051295>.
- A method for steel ladle lining optimization applying thermomechanical modeling and taguchi approaches / A. Hou, S. Jin, H. Harmuth, D. Gruber. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*. 2018. No. 70. Pp. 2449-2456. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3063-1>.
- Koryt'ko N.G., Loginov P.G., Mar'in A.G. Monolithic Lining for Steel-Pouring Ladles. *Metallurgist*. 2005. Vol. 49. Pp. 91-93. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11015-005-0059-1>.
- Introduction of a Monolithic Working Lining of Steel Ladle / V. Garten, I. Galenko, O. Ziganshina, M. Dzhundiet, K. Strazhkov. *Interceram – International Ceramic Review*. 2019. Vol. 68(S1). Pp. 26-29. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42411-019-0043-6>.
- Технології підвищення якості сталі. Підручник / О.Г. Величко, О.М. Стоянов, Б.М. Бойченко, К.Г. Нізяєв. Дніпропетровськ: «Середняк Т.К.», 2016. 196 с.
- Multi-Objective Optimization Design of Ladle Refractory Lining Based on Genetic Algorithm / Y. Sun, P. Huang, Y. Cao, G. Jiang, Z. Yuan, D. Bai, X. Liu. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 2022. Vol.10. Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.900655>.
- Steel Ladle Refractories Damage Causes Procedure. URL: https://www.castablerefractory.com/industry_News/steel-ladle-refractorines-damage-causes.html (дата звернення 15.01.2023).

12. Damage of monolithic refractory linings in steel ladles during drying / N. Schmitt, Y. Berthaud, J. F. Hernandez, P. Meunier, J. Poirier. *British Ceramic Transactions*. 2004. Vol. 103, № 3. Pp. 121-133. DOI: <https://doi.org/10.1179/096797804225012873>.
13. Use of Neural Networks for Lifetime Analysis of Teeming Ladles / D. Jančar, M. Machů, M. Velička, P. Tvardek, L. Kocián, J. Vlček. *Materials*. 2022. Vol. 15. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15228234>.
14. Special refractory concrete for steel ladle equalization layer / N. Anglescu, D.N. Ungureanu, V. Bratu, F. Toma. *Scientific Bulletin of Valahia University. Materials & Mechanics*. 2019. Vol. 17, № 16. Pp. 13-17. DOI: <https://doi.org/10.2478/bsmm-2019-0002>.
15. Low-cement dosage refractory concrete with low thermal conductivity / L. Paunescu, E. Volceanov, B.-V. Paunescu, I.M. Surugiu. *Journal of Engineering Studies and Research*. 2022. Vol. 28, № 4. Pp. 98-106. DOI: <https://doi.org/10.29081/jesr.v28i4.001>.
16. Migal' V.P., Skurikhin V.V., Gershkovich S.I. High-alumina cembor cements for low-cement refractory concretes. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2012. Vol. 53. Pp. 4-8. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-012-9452-z>.
17. Effect of spinel content on slag attack resistance of high alumina refractory castables / L.A. Díaz, R. Torrecillas, A.H. de Aza, P. Pena. *Journal of the European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27, iss. 16. Pp. 4623-4631. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.04.007>.
18. Effect of magnesium aluminate spinel content of porous aggregates on cement clinker corrosion and adherence properties of lightweight periclase-spinel refractories / G. Wu, W. Yan, S. Schafföner, X. Lin, S. Ma, Y. Zhai, X. Liu, L. Xu. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 185. Pp. 102-109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.058>.
19. Manna S., Chakrabarti T. Comparative Studies on Synthesis and Characterization of Titania and Iron Oxide Doped Magnesia from Indian Salem Magnesite. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2016. Vol. 4, № 7. Pp. 67-76. DOI: <https://doi.org/10.4236/msce.2016.47010>.
20. Pacheco G., Gonçalves G.E., Lins V. Qualitative and Quantitative Coating Tests: A Comparison in Magnesia-Spinel Refractory Bricks. *Ceramics*. 2020. Vol. 3(1). Pp. 144-154. DOI: <https://doi.org/10.3390/ceramics3010014>.
21. Pivinskii Yu. E., Dyakin P. V. Research in the Field of Composite Materials Based on HCBS and Refractory Materials Based on the System Al₂O₃-SiO₂-SiC. Part 4. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2019. Vol. 60, iss. 2. Pp. 29-38. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11148-019-00325-x>.
22. Cement-Free Refractory Concretes. Part 12-2. Siliceous Composition HCBS and Ceramic Concretes / Yu.E. Pivinskii, E.M. Grishpun, A.M. Gorokhovskii, P.V. Dyakin. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2022. Vol. 62. Pp. 640-652. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-022-00655-3>.
23. Volkova O., Janke D. Influence of the Lining on the Thermal Behaviour of a Teeming Ladle. *Steel Research International*. 2005. Vol. 76(4). Pp. 313-319. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.200506014>.
24. Simonov K.V., Zagnoiko V.V., Burdina G.V. Influence of technological parameters on the properties and wear resistance of periclase-carbon refractories. *Refractories*. 1988. Vol. 29. Pp. 734-741. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01280348>.
25. Semchenko G.D., Povshuk V.V., Starolat E.E. Periclase-Carbon Refractory Properties with a Different Amount of Graphite in the Charge Using Liquid PFR and Graphite as Modifiers. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2016. Vol. 57. Pp. 273-278. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9967-9>.

References:

1. Kataoka S. Refractories for steelmaking in Japan; Seikoyo taikabutsu no genjo (Nippon ni okeru seikoyotaikabutsu no henshen). *Taikabutsu (Refractories)*, 1996, vol. 48, iss. 1, pp. 201-227.
2. Akselrod L., Garten V. An alternative lining of steel ladles: technical and economic aspects. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 2018, № 12, pp. 72-80. doi: <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2018-12-72-80>.
3. Durmashkin A.L., Orlov V.A., Kortek' A.A. Development of designs of slide gates and a combination of refractories for them for steel teeming ladles and tundishes. *Refractories and Industrial Ceramics*, 1993, № 34, pp. 291-297. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01293235>.

4. Jones P.T., Blanpain B., Wollants P., Ding R., Halletmans B. Degradation mechanisms of magnesia–chromite refractories in vacuum–oxygen decarburisation ladles during production of tainless steel. *Ironmaking and Steelmaking*, 2000, vol. 27, № 3, pp. 228-237. doi: <https://doi.org/10.1179/030192300677525>.
5. Boenzi F., Ordieres-Meré J., Iavagnilio R. Life Cycle Assessment Comparison of Two Refractory Brick Product Systems for Ladle Lining in Secondary Steelmaking. *Sustainability*, 2019, vol. 11, pp. 1295-1317. doi: <https://doi.org/10.3390/su11051295>
6. Hou A., Jin S., Harmuth H., Gruber D. A method for steel ladle lining optimization applying thermomechanical modeling and taguchi approaches. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 2018, № 70, pp. 2449-2456. doi: <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3063-1>.
7. Koryt'ko N.G., Loginov P.G., Mar'in A.G. Monolithic Lining for Steel-Pouring Ladles. *Metallurgist*, 2005, vol. 49, pp. 91-93. doi: <https://doi.org/10.1007/s11015-005-0059-1>.
8. Garten V., Galenko I., Ziganshina O., Dzhundiet M., Strazhkov K. Introduction of a Monolithic Working Lining of Steel Ladle. *Interceram – International Ceramic Review*, 2019, vol. 68(S1), pp. 26-29. doi: <https://doi.org/10.1007/s42411-019-0043-6>.
9. Velychko O.H., Stoianov O.M., Boichenko B.M., Niziaiev K.H. *Technologies for improving the quality of steel. Textbook*. Dnipropetrovsk, «T.K. Srednyak» Publ., 2016. 196 p. (Ukr.)
10. Sun Y., Huang P., Cao Y., Jiang G., Yuan Z., Bai D., Liu X. Multi-Objective Optimization Design of Ladle Refractory Lining Based on Genetic Algorithm. *Front. Bioeng. Biotechnol*, 2022, vol.10, pp. 1-18. doi: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.900655>.
11. Steel Ladle Refractories Damage Causes Procedure Available at: https://www.castablerefractory.com/industry_News/steel-ladle-refractorines-damage-causes.html (accessed 15 January 2023).
12. Schmitt N., Berthaud Y., Hernandez J. F., Meunier P., Poirier J. Damage of monolithic refractory linings in steel ladles during drying. *British Ceramic Transactions*, 2004, vol. 103, № 3, pp. 121-133. doi: <https://doi.org/10.1179/096797804225012873>.
13. Jančar D. Machů M. Velička M. Tvardek P. Kocián L. Vlček J. Use of Neural Networks for Lifetime Analysis of Teeming Ladles. *Materials*, 2022, vol. 15, pp. 1-15. doi: <https://doi.org/10.3390/ma15228234>.
14. Anglescu N., Ungureanu D.N., Bratu V., Toma F. Special refractory concrete for steel ladle equalization. *Scientific Bulletin of Valahia'University. Materials & Mechanics*, 2019, vol. 17, № 16, pp. 13-17. doi: <https://doi.org/10.2478/bsmm-2019-0002>.
15. Paunescu L., Volceanov E., Paunescu B.-V., Surugiu I.M. Low-cement dosage refractory concrete with low thermal conductivity. *Journal of Engineering Studies and Research*, 2022, vol. 28, № 4, pp. 98-106. doi: <https://doi.org/10.29081/jesr.v28i4.001>.
16. Migal' V.P., Skurikhin V.V., Gershkovich S.I. High–alumina cembor cements for low–cement refractory concretes. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2012, vol. 53, pp. 4-8. doi: <https://doi.org/10.1007/s11148-012-9452-z>.
17. Díaz L.A., Torrecillas R., Aza A.H., Pena P. Effect of spinel content on slag attack resistance of high alumina refractory castables. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, vol. 27, iss. 16, pp. 4623-4631. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2007.04.007>.
18. Wu G., Yan W., Schafföner S., Lin X., Ma S., Zhai Y., Liu X., Xu L. Effect of magnesium aluminate spinel content of porous aggregates on cement clinker corrosion and adherence properties of lightweight periclase-spinel refractories. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 185, pp. 102-109. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.058>.
19. Manna S., Chakrabarti T. Comparative Studies on Synthesis and Characterization of Titania and Iron Oxide Doped Magnesia from Indian Salem Magnesite. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 2016, vol. 4, № 7, pp. 67-76. doi: <https://doi.org/10.4236/msce.2016.47010>.
20. Pacheco G., Gonçalves G.E., Lins V. Qualitative and Quantitative Coating Tests: A Comparison in Magnesia-Spinel Refractory Bricks. *Ceramics*, 2020, vol. 3(1), pp. 144-154. doi: <https://doi.org/10.3390/ceramics3010014>.
21. Pivinskii Yu.E., Dyakin P.V. Research in the Field of Composite Materials Based on HCBS and Refractory Materials Based on the System Al₂O₃–SiO₂–SiC. Part 4. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2019, vol. 60, iss. 2, pp. 29-38. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s11148-019-00325-x>.

22. Pivinskii Y.E., Grishpun E.M., Gorokhovskii A.M. Cement-Free Refractory Concretes. Part 12–2. Siliceous Composition HCBS and Ceramic Concretes. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2022, vol. 62, pp. 640-652. doi: <https://doi.org/10.1007/s11148-022-00655-3>.
23. Volkova O., Janke D. Influence of the Lining on the Thermal Behaviour of a Teeming Ladle. *Steel Research International*, 2005, vol. 76(4), pp. 313-319. doi: <https://doi.org/10.1002/srin.200506014>.
24. Simonov K.V., Zagnoiko V.V., Burdina G.V. Influence of technological parameters on the properties and wear resistance of periclase-carbon refractories. *Refractories*, 1988, vol. 29, pp. 734-741. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01280348>
25. Semchenko G.D., Povshuk V.V., Starolat E.E. Periclase-Carbon Refractory Properties with a Different Amount of Graphite in the Charge Using Liquid PFR and Graphite as Modifiers. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2016, vol. 57, pp. 273-278. doi: <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9967-9>.

Рецензент: М.М. Бойко
канд. техн. наук, доц., УДУНТ

Стаття надійшла 20.02.2023
Стаття прийнята 23.03.2023

УДК 622.2:622.7

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288168

© Кривенко В.В.¹, Чупринов С.В.², Олійник Т.А.³, Харітонов В.М.⁴,
Скляр Л.В.⁵

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПРОБИ ЕФІОПСЬКОЇ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ АРАВІЙСЬКО-НУБІЙСЬКОГО ЩИТА. ЧАСТИНА 2. МІКРОСКОПІЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОБ РУДИ +40,0+5,0 мм

Уточнений мінеральний склад різновидів із матеріалу класів крупності 10-20 мм і 20-40 мм досліджуваної проби руди. Підготовлені прозорі та поліровані шліфи вищеназваних гранулометричних. Проведене мікроскопічне вивчення за допомогою мікроскопу прохідного та відбиваючого світла «Carl Zeiss Jena NU-2 Microscope». Виявлено, що основними рудними мінералами дослідженої руди є дисперсний гематит та гідрогематит, а їх кількість складає близько 54,0 % від загального обсягу. Показано, що другорядними рудними мінералами у досліджуваній сировині є гетит та гідрогетит. Виявлено, що основним нерудним мінералом в досліджуваній сировині є кварц, вміст якого становить у середньому 30 %. Показана наявність другорядного нерудного мінералу, який має глинисті властивості та представлений каолінітом.

Ключові слова: залізна руда, аравійсько-нубійський щит, мікроскопічний аналіз, мінералогія, вміст заліза.

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-7822-6358

² канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID ID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-0315-7308

⁴ канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-3358-479X

⁵ канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-2721-1436

V.V. Krivenko, E.V. Chuprinov, T.A. Oliynyk, T.A. Haritonov, L.V. Skliar. Study of technological properties of the sample ethiopian iron ore of the arabian-nubian shield. Part 2. Microscopic analysis of ore samples with a thickness of +40.0+5.0 mm. As a result of the research, the mineral composition of the mineralogical and petrological varieties of material of the 10-20 mm and 20-40 mm size classes of the studied ore sample was specified. Transparent and polished sections of the above-mentioned granulometric samples were prepared. Microscopic examination was carried out using a transmitted and reflected light microscope «Carl Zeiss Jena NU-2 Microscope». A description of the discovered minerals was completed. It was found that the main ore minerals of the studied ore are dispersed hematite and hydrohematite, and their amount is about 54.0% of the total volume. Microscopic analysis also revealed hydrohematite spherulites, including in the intergranular space in quartz aggregates. It is shown that secondary ore minerals in the studied raw materials are goethite and hydrogoethite. Microscopic analysis showed their content at the level of 4.0 %. The color of goethite and hydrogoethite, which are represented by iron hydroxides of yellow, brown, brown and black color and their form in the form of nodular aggregates, spherulites of crusts, and nest-like aggregates, is also determined. It was found that the main non-metallic mineral in the studied raw material is quartz, the content of which is on average 30 %. This mineral in the sample of the studied ore is characterized by a variety of morphological features and a wide range of grain sizes – from several micrometers to several centimeters. Microscopic examination of quartz showed that it is represented by xenomorphic grains with a complex nature of fusions with other minerals, rounded and acute-angled grains, chalcedony (agat) grains and thin-prismatic crystals. The presence of a secondary non-ore mineral, which has clay properties and is represented by kaolinite, is also shown. An additional study was carried out, in which chalcopyrite – an additional component of iron ore raw materials – was analyzed. The conducted microscopic studies made it possible to draw a conclusion about the mineral and petrological characteristics of the raw material. It is shown that the type of iron ore of the Arabian-Nubian shield is similar to ores of volcanic-sedimentary origin and brown iron ores.

Keywords: iron ore, Arabian-Nubian shield, ore mining, mineralogy, iron content.

Постановка проблеми. Реалізація науково-дослідного потенціалу українських спеціалістів у області гірничо-металургійного циклу, з прицілом на впровадження великих проектів саме в Україні, на сьогоднішній день є доволі складним завданням. Враховуючи це, здійснюється пошук партнерів для проведення робіт в інших країнах. Прикладом такої роботи є представлене дослідження. На сьогоднішній день гірничо-металургійна галузь в Ефіопії не є розвинутою на достатньому рівні, тому такі роботи можуть слугувати не тільки для реалізації потенціалу українських науковців, але і для побудови міцних економічних зв'язків між Україною та країнами Африки, що є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У першій частині представленої роботи [1] було проведено дослідження проби вулканогенно-осадової породи із Аравійсько-Нубійського щита. Було показано, що структура цієї породи була дрібнозерниста, оолітова, місцями роговикова, порфірова порфіроподібна, рідше псаммітова та псефітова. Текстура представленої породи руди у своїй основі порошкова, плямиста, місцями конгломератоподібна брекчієподібна, пустотна, вкраплена, мигдалекам'яна. Також було проведено дослідження мінерального складу породи, яке показало, що проба породи представлена, в основному, дисперсним гематитом (Fe_2O_3), гідрогематитом ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) та кварцем (SiO_2). Також є гетит (FeOOH), гідрогетит ($\text{FeOOH} \cdot n\text{H}_2\text{O}$), колініт ($\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_5](\text{OH})_4$) і кальцит ($\text{Ca}_2[\text{CO}_3]$). Відзначено одиничний вкрапленник халькопіриту (CuFeS_2). Аналітичний огляд [2-7] найбільш значимих робіт, присвячених генезису аравійсько-нубійського щита, дослідженням геолого-петрографічних вулканогенних хребтів та властивостям порід залізних руд Ефіопії, був представлений у першій статті [1] цього дослідження.

Мета статті – уточнити мінеральний склад мінеролого-петрологічних різновидів із матеріалу класу +40 мм і виконати електронно-мікроскопічний аналіз дослідженої проби.

Виклад основного матеріалу. Для уточнення мінерального складу мінеролого-петрологічних різновидів із матеріалу класів крупності 10-20 мм і 20-40 мм були виготовлені прозори та

поліровані шліфи. Мікроскопічне вивчення проводилося за допомогою мікроскопу прохідного та відбиваючого світла «Carl Zeiss Jena NU-2 Microscope». Результати мікроскопічного дослідження відносяться до проб 10-20 мм (рис. 1-4) та 20-40 мм (рис. 5-8) [1, табл. 4 і 3, відповідно].

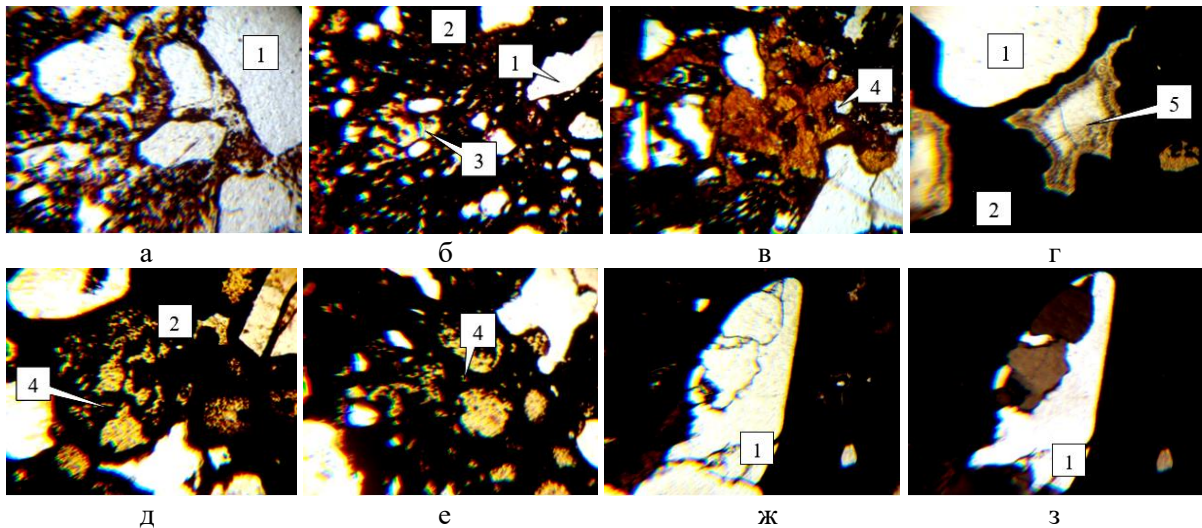


Рис. 1 – Мінерали мало-глинистого різновиду в прохідному світлі, $\times 90$: 1 – кварц; 2 – дисперсногематит-гідрогематитовий цемент; 3 – глинистий мінерал; 4 – гетит-гідрогетитові агрегати; 5 – халцедон (агат); а-в – проба 1_1 [1, табл. 4]; г-з - проба 1_2 [1, табл. 4]; а-ж – через призму Ніколя (паралельний зсув); з – через призму Ніколя (X – схрещені ніколі)

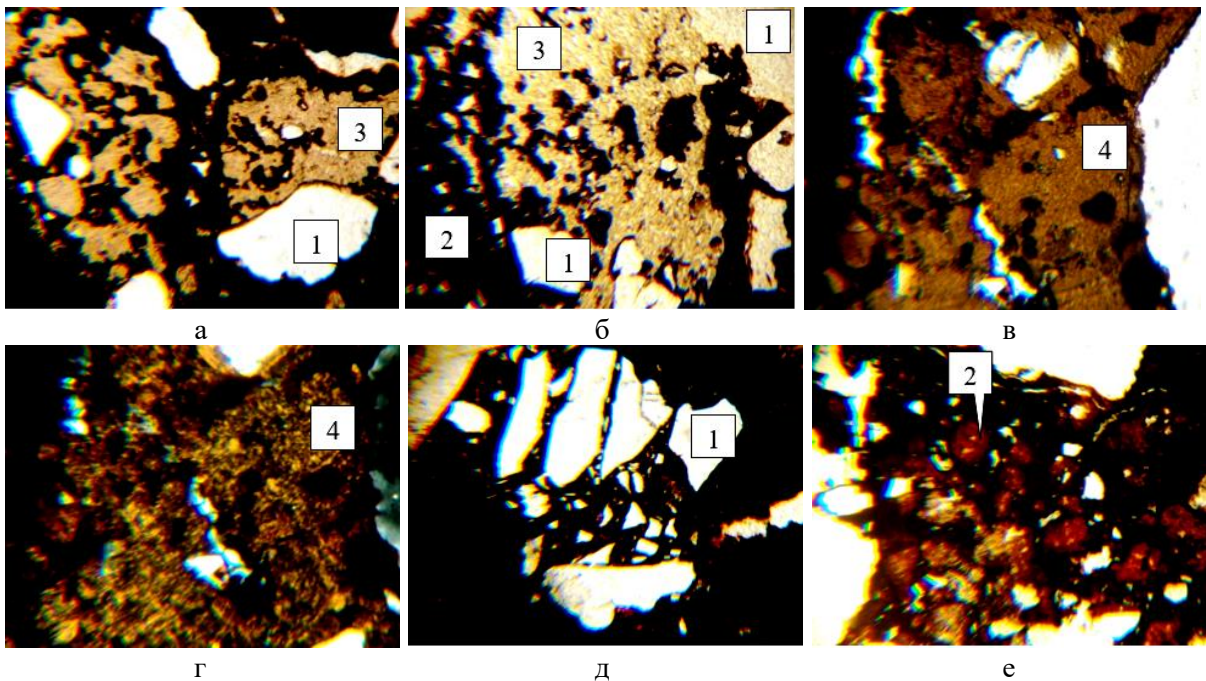


Рис. 2 – Мінерали середньо-глинистого різновиду в прохідному світлі, $\times 90$: 1 – кварц; 2 – дисперсногематит-гідрогематитовий цемент; 3 – глинистий мінерал; 4 – гетит-гідрогетитові агрегати; 5 – халцедон (агат); а-б – проба 2_1 [1, табл. 4]; в-г – проба 2_2 [1, табл. 4]; д-е – проба 2_3 [1, табл. 4]; а-в, д, е – через призму Ніколя (паралельний зсув); г – через призму Ніколя (X – схрещені ніколі)

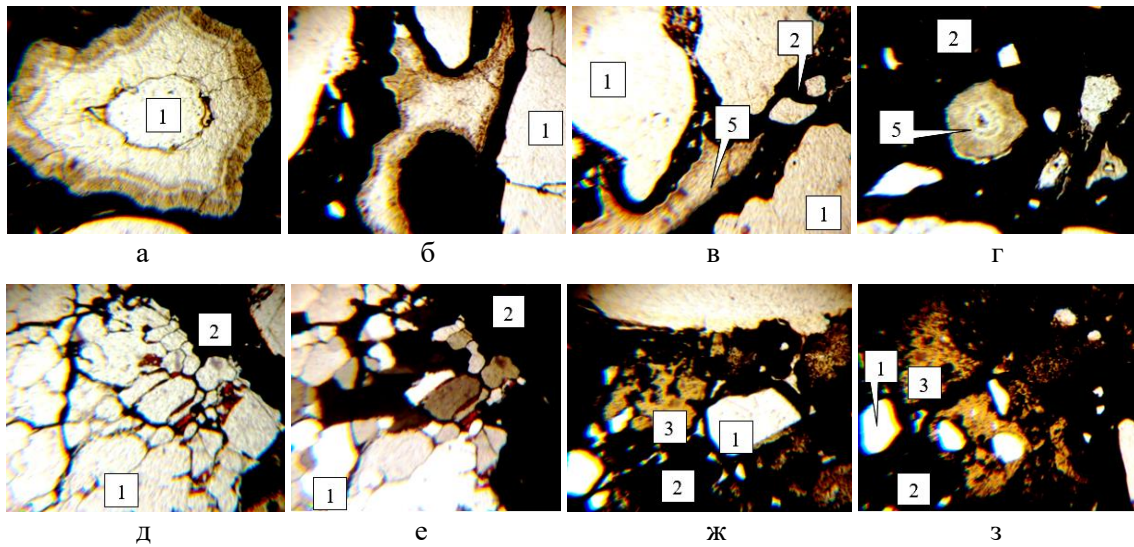


Рис. 3 – Мінерали убого-глинистого різновиду в прохідному світлі, $\times 90$: 1 – кварц; 2 – дисперсногематит-гідрогематитовий цемент; 3 – глинистий мінерал; 4 – гетит-гідрогетитові агрегати; 5 – халцедон (агат); а-г – проба 4_1 [1, табл. 4]; д-з – проба 4_2 [1, табл. 4]; а-д, ж, з – через призму Ніколя (паралельний зсув); е – через призму Ніколя (X – схрещені ніколі)

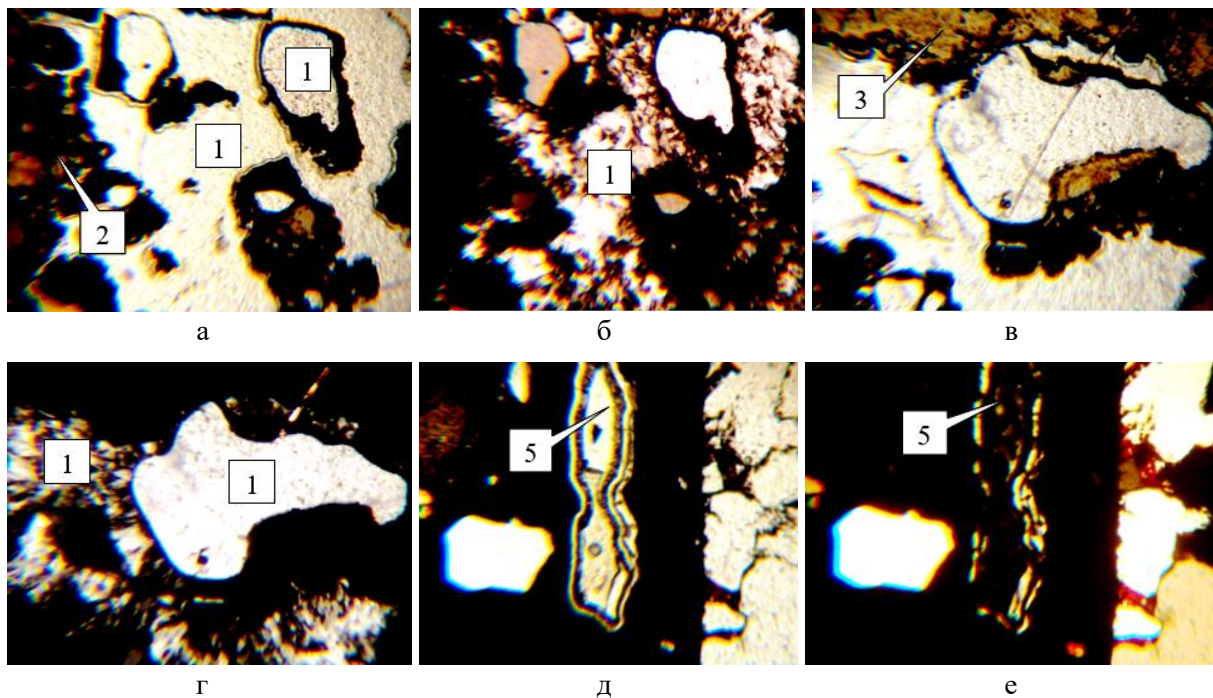


Рис. 4 – Мінерали убого-глинистого різновиду в прохідному світлі, $\times 90$: 1 – кварц; 2 – дисперсногематит-гідрогематитовий цемент; 3 – глинистий мінерал; 4 – гетит-гідрогетитові агрегати; 5 – халцедон (агат); проба 4_3 [1, табл. 4]; а-д, ж, з – через призму Ніколя (паралельний зсув); е – через призму Ніколя (X – схрещені ніколі)

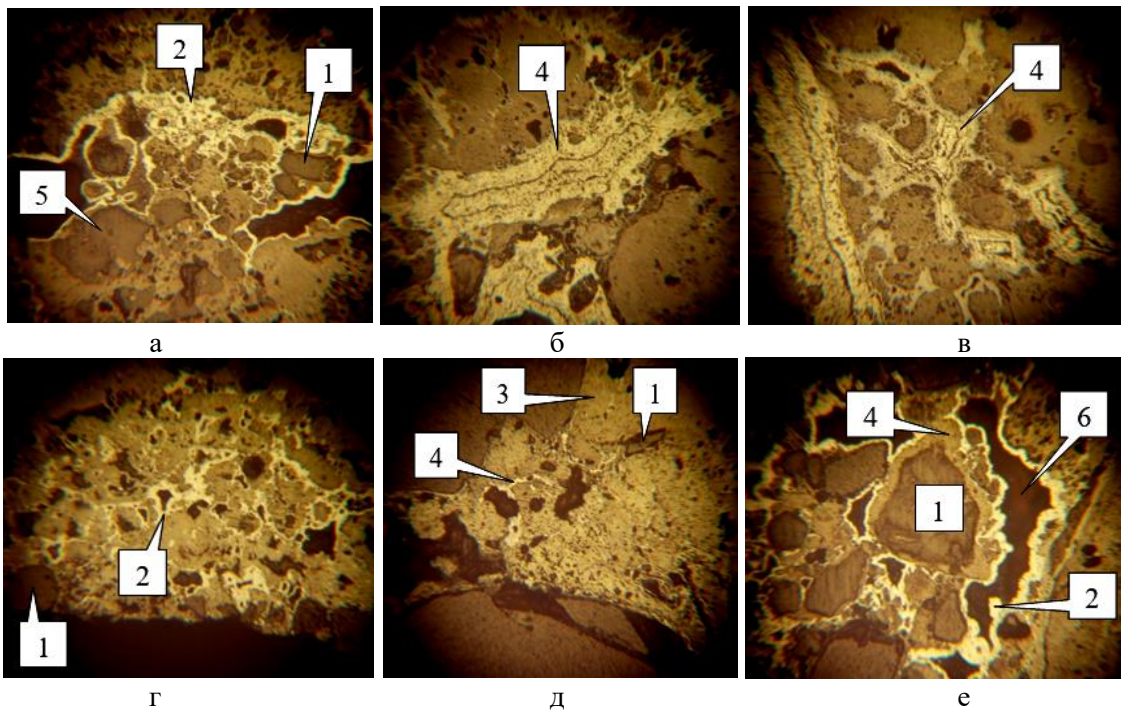


Рис. 5 – Мінерали мало-глинистого різновиду у відбитому світлі, $\times 60$, проба 1_1 [1, табл. 3]: 1 – кварц; 2 – дисперсногематит-гідрогематитовий цемент; 3 – глинистий мінерал; 4 – гетит-гідрогетитові агрегати; 5 – халцедон (агат); 6 – порожнини; а-д – через призму Ніколя (паралельний зсув); е – через призму Ніколя (X – схрещені ніколі)

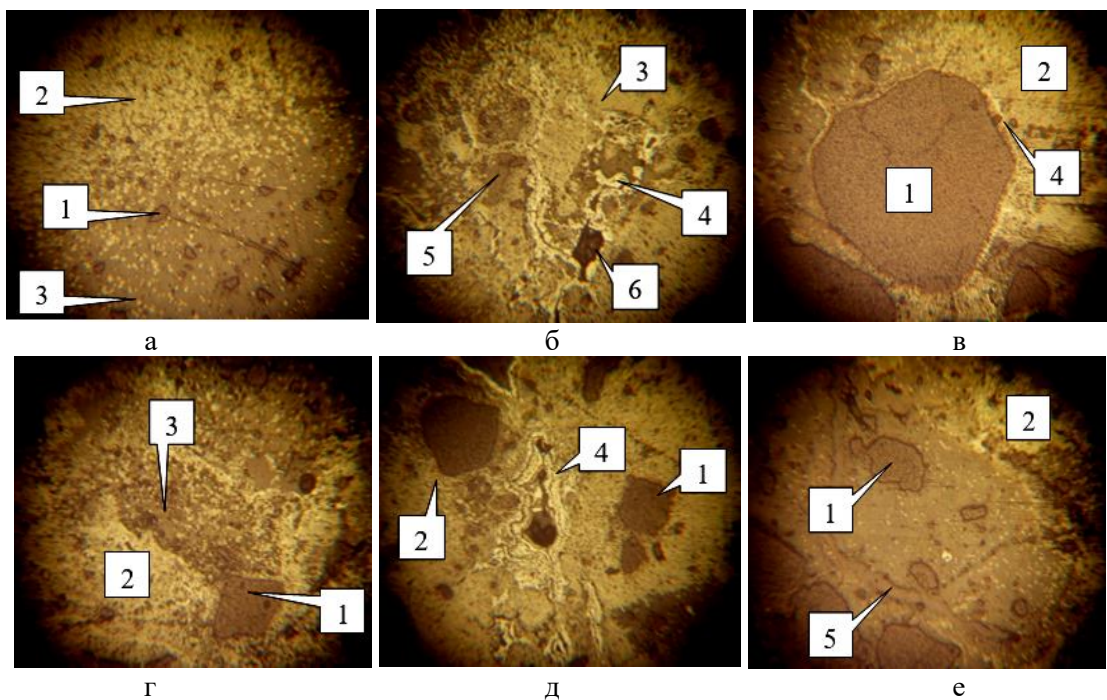


Рис. 6 – Мінерали мало-глинистого різновиду у відбитому світлі, $\times 60$, проба 2_1 [1, табл. 3]: 1 – кварц; 2 – дисперсногематит-гідрогематитовий цемент; 3 – глинистий мінерал; 4 – гетит-гідрогетитові агрегати; 5 – халцедон (агат); 6 – порожнини; а-д – через призму Ніколя (паралельний зсув); е – через призму Ніколя (X – схрещені ніколі)

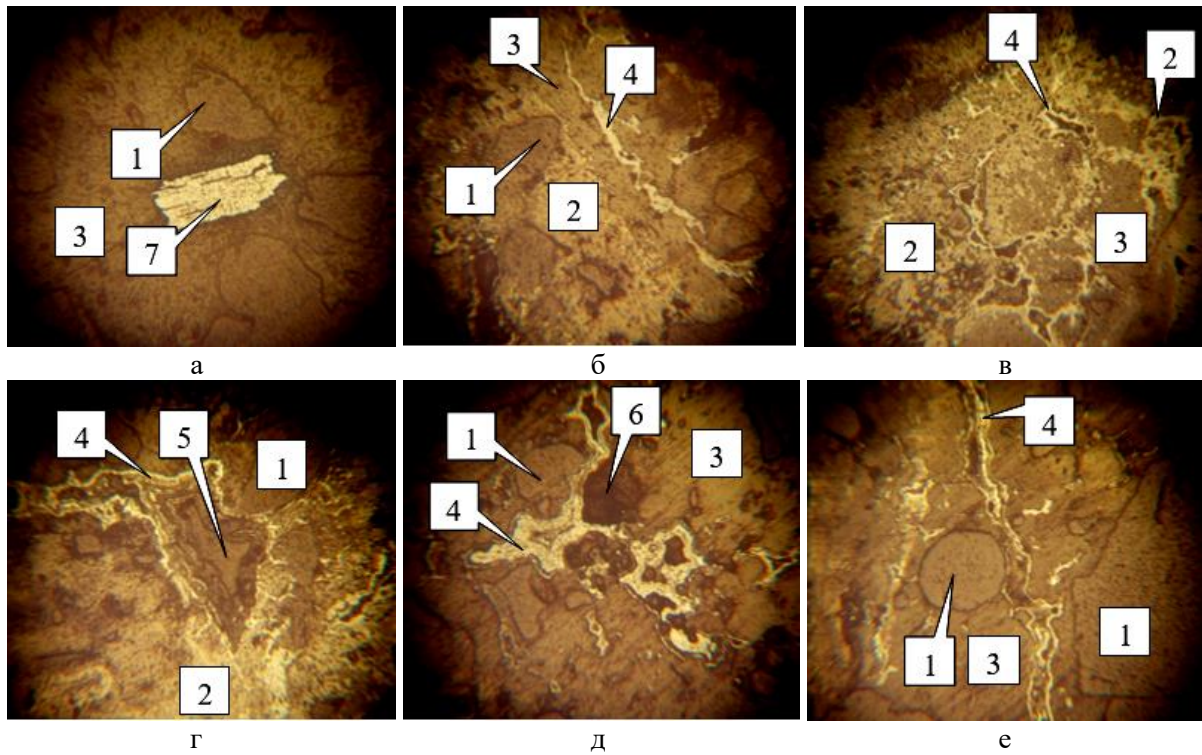


Рис. 7 – Мінерали убого-глинистого різновиду у відбитому світлі, $\times 60$: 1 – кварц; 2 – дисперсногематит-гідрогематитовий цемент; 3 – глинистий мінерал; 4 – гетит-гідрогетитові агрегати; 5 – халцедон (агат); 6 – порожнини; а-г – проба 3_1 [1, табл. 3]; д, е – проба 3_2 [1, табл. 3]

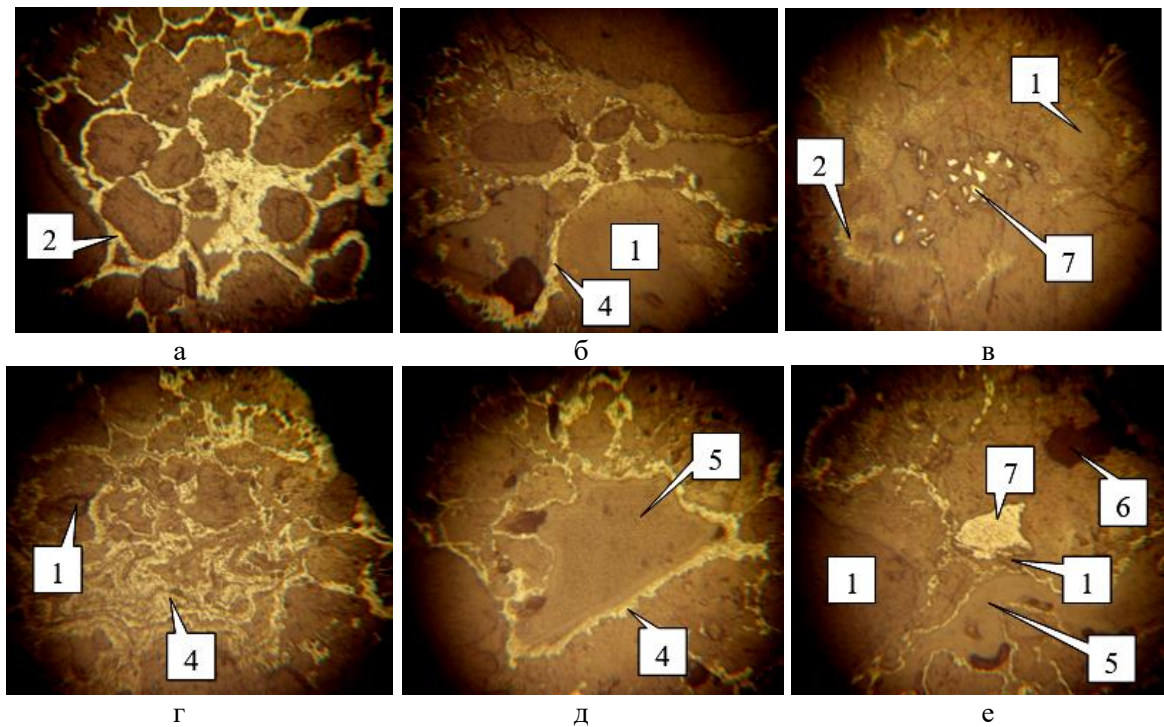


Рис. 8 – Мінерали убого-глинистого різновиду у відбитому світлі, $\times 60$: 1 – кварц; 2 – дисперсногематит-гідрогематитовий цемент; 3 – глинистий мінерал; 4 – гетит-гідрогетитові агрегати; 5 – халцедон (агат); 6 – порожнини; а-в – проба 4_2 [1, табл. 3]; г-е – проба 4_3 [1, табл. 3]

Проведення мікроскопічного аналізу дозволило також виконати опис виявлених мінералів. Основними рудними мінералами дослідженої руди є дисперсний гематит та гідрогематит. Їх кількість складає близько 54,0% від загального обсягу. Ці мінерали складають основну масу породи, що обумовлює її, переважно, червоний колір. Виступають цементом для індивідів та агрегатів інших мінералів (рис. 1-4). Розмір зерен дисперсного гематиту та гідрогематиту становить одиниці мікрометрів. Іноді трапляються сфероліти гідрогематиту (рис. 2, е). Також його індивіди займають міжзерновий простір в кварцових агрегатах (рис. 3, д). У матеріалі убого-глинистого різновиду зрідка відзначаються уламки гематиту (рис. 7, а, рис. 8, в), іноді у зростках з кварцом (рис. 8, е).

Другорядними рудними мінералами у досліджуваній сировині з вмістом близько 4,0 % є гетит та гідрогетит – гідроксиди заліза жовтого, коричневого, бурого та чорного кольору. Вони зустрічаються у вигляді натічних агрегатів, сферолітів скорінок, гніздоподібних агрегатів у гематит-гідрогематитовому цементі (рис. 1, д, е, рис. 2, в, г, рис. 7, д, е).

Основним нерудним мінералом в досліджуваній сировині є кварц (вміст близько 30 %). Він характеризується різноманітністю морфологічних особливостей та широким діапазоном розміру зерен – від кількох мікрометрів до кількох сантиметрів ([1, рис. 3, е]; рис. 1, а, ж та рис. 3, в).

Морфологічно кварц представлений:

- ксеноморфними зернами – зі складним характером зрощень з іншими мінералами, особливо із залізвмісним цементом (рис. 1, а, е; рис. 7, б);
- округлими зернами – така форма характерна для окатаних уламків (теригенна складова сировини – [1, рис. 3, е і рис. 4, е]; рис. 6, в) і для вакуолей (вулканогенна складова – рис. 1, д, ж; рис. 4, а; рис. 7, е);
- гострокутними зернами – теригенними уламками або пірокластами, які є продуктами викидів вулканів (рис. 2, д, рис. 5, а, д, е, рис. 6, г, е);
- халцедонові (агатові) жовна (рис. 3, а, г, рис. 4, д) і скоринки (рис. 1, г, рис. 3, б, в, рис. 5, а, рис. 6, е, рис. 7, г, рис. 8, д, е);
- тонко-призматичні кристали – продукти розкристалізації халцедонових скорінок (рис. 4, б, г).

Глинистий мінерал представлений, найімовірніше, каолінітом та є другорядним нерудним мінералом. Його вміст у досліджуваній сировині близько 9,0 %. Зустрічається у вигляді скорінок, примазок, іноді суцільних порошкових агрегатів білого, світло-сірого, світло-жовтого або світло-рожевого кольору [1, рис. 2-5], часто в проростаннях з дисперсногематит-гідрогематитовими агрегатами (рис. 2, а, б). У глинистому цементі зосереджені зерна кварцу (див. рис. 3, ж, з і рис. 7, д, е). Розмір індивідів глинистого мінералу не перевищує десяти мікрометрів.

Кальцит має у досліджуваному сировину різко підпорядковану роль. Його вміст не перевищує 2,0 %. Встановлений у кусковому матеріалі та полірованих препаратах по реакції з розведеною соляною кислотою та просторово присвячений дисперсногематит-гідрогематитовому цементу.

Додатковим компонентом вивченої залізорудної сировини є халькопірит (рис. 9), який був встановлений у вигляді одиничного вкраплення розміром до 3 мм в одному з уламків класу крупності +40,0 мм. Уламок представляє мало-глинистий різновид.

У таблиці наведено мінеральний склад матеріалу крупністю +40,0+5,0 мм.

Мінерало-петрологічна характеристика сировини свідчить про його близькість, або до руди вулканогенно-осадового походження за типом родовища Західний Каражал (Казахстан), або до бурозалізнякавих руд за типом зони окислення ультраосновних порід. Однак яскравою відмінною рисою досліджуваної сировини є помітно більша кількість кварцу, порівняно з відомими прикладами промислових типів родовищ заліза. Ймовірно, вихідна вулканогенно-осадова порода відповідала базальтам або андезито-базальтам, для яких характерні мигдалики, заповнені кварцом або його кришталеvim різновидом – халцедоном.

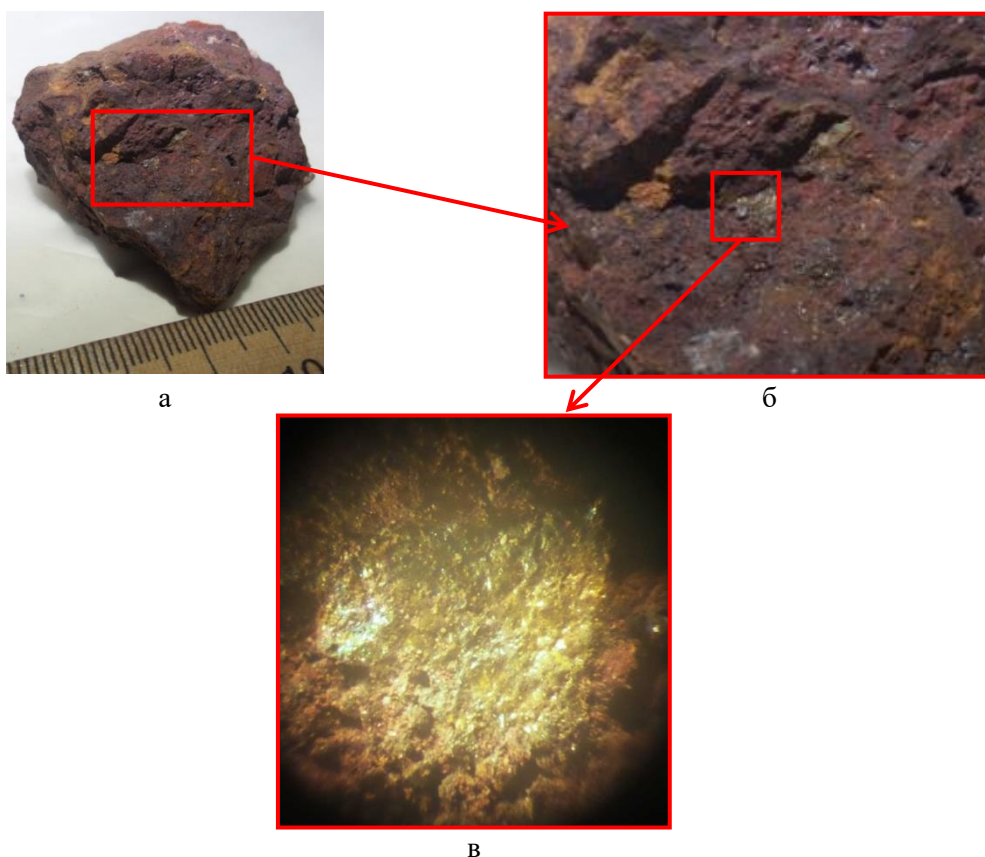


Рис. 9 – Одиначне вкраплення халькопіриту, матеріал класу крупності +40 мм: а – загальний вигляд уламку; б – фрагмент уламку з вкрапленням, збільшено у 2,5 рази; в – вкраплення халькопіриту під мікроскопом $\times 17$

Таблиця

Мінеральний склад матеріалу верхніх класів (+40,0+5,0 мм)
крупності вихідної проби залізородної сировини

Клас крупності, мм	Масова доля мінералів, %					Сума
	диспергований гематит + гідрогемацит	гетит + гідрогецит	глинистий мінерал	кварц	кальцит	
в класах крупності вихідної руди						
+40,0	58,42	4,00	9,69	25,82	2,07	100,00
-40,0+20,0	48,68	3,31	8,41	37,95	1,65	100,00
-20,0+10,0	53,59	3,66	11,28	29,71	1,76	100,00
-10,0+5,0	43,67	3,36	18,11	33,44	1,42	100,00
в класах крупності після розділення						
+40,0	28,35	1,94	4,70	12,53	1,01	48,53
-40,0+20,0	18,93	1,29	3,27	14,76	0,64	38,89
-20,0+10,0	3,38	0,23	0,71	1,87	0,11	6,30
-10,0+5,0	0,90	0,07	0,37	0,69	0,03	2,06
Всього	51,56	3,53	9,05	29,85	1,79	95,78

Висновки

1. Проведення мікроскопічного аналізу дозволило виконати опис виявлених мінералів. Основними рудними мінералами дослідженої руди є дисперсний гематит та гідрогемацит. Другорядними рудними мінералами у досліджуваній сировині з вмістом близько 4,0 % є гетит та

гідроgetит – гідроксиди заліза жовтого, коричневого, бурого та чорного кольору. Основним нерудним мінералом в досліджуваній сировині є кварц.

2. Глинистий мінерал представлений, найімовірніше, каолінітом та є другорядним нерудним мінералом.

3. Мінерало-петрологічна характеристика сировини свідчить про його близькість, або до руди вулканогенно-осадового походження за типом родовища Західний Каражал (Казахстан) або до бурозалізнякових руд.

4. На наступному етапі дослідження буде проведений аналіз матеріалу крупністю -5,0+3,0 мм.

Перелік використаних джерел:

1. Дослідження технологічних властивостей проби ефіопської залізної руди аравійсько-нубійського щита. Частина 1. Дослідження речовинного складу проби руди / В. Кривенко, Є. Чупринов, Т. Олійник, В. Харітонов, Ю. Реков. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2022. Вип. 44. С. 20-27. DOI: <https://doi.org/10.32782/2225-6733.44.2022.3>.
2. Mammo Ghebre W. Opportunities for iron resources development in Ethiopia. *The Seventh International Conference on the Geology of Africa*, Assiut, Egypt, 24-26 November 2013. Assiut, 2013. Pp. 15-29.
3. Zeherudin I., Baraki A., Berhe H. Study of development of iron ore and metallurgy industries: challenges, prospects and policy/strategy options (2015-2025). Addis Ababa: FDRE, Policy Study and Research Center, 2017. 175 p.
4. Abd El-Wahed M., Attia M. Genesis of the gneissic core complexes in the Arabian-Nubian Shield and its tectonic implications: A regional overview. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2022. Vol. 236. Article 105337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105337>.
5. De Fino M., La Volpe L., Lirer L. Geology and volcanology of the Edd-Bahar Assoli area (Ethiopia). *Bulletin Volcanologique*. 1978. Vol. 41. Pp. 32-42. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02597681>.
6. Relations between Tectonics and Magmatology in the Northern Danakil Depression (Ethiopia) / F. Barberi, S. Borsi, G. Ferrara, G. Marinelli, J. Varet. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 1970. Vol. 267, № 1181. Pp. 293-311. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.1970.0037>.
7. Ahmed H. Magmatic (Orthomagmatic) Deposits (Ore Deposits Associated with Mafic–Ultramafic Complexes). In: *Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian–Nubian Shield*. Earth and Environmental Sciences Library, 2022. 512 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96443-6_3.

References:

1. Krivenko V.V., Chuprinov E.V., Oliynyk T.A., Haritonov V.M., Rekov Y.V. Study of technological properties of the sample ethiopian iron ore of the arabian-nubian shield. Part 1. Study of the substance composition of the ore sample. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 44, 2022, pp. 20-27. doi: <https://doi.org/10.32782/2225-6733.44.2022.3>. (Ukr.)
2. Mammo Ghebre W. Opportunities for iron resources development in Ethiopia. *The Seventh International Conference on the Geology of Africa*. Assiut, 2013, pp. 15-29.
3. Zeherudin I., Baraki A., Berhe H. *Study of development of iron ore and metallurgy industries: challenges, prospects and policy/strategy options (2015-2025)*. Addis Ababa, FDRE, Policy Study and Research Center Publ., 2017. 175 p.
4. Abd El-Wahed M., Attia M. Genesis of the gneissic core complexes in the Arabian-Nubian Shield and its tectonic implications: A regional overview. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, vol. 236, article 105337. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2022.105337>
5. De Fino M., La Volpe L., Lirer L. Geology and volcanology of the Edd-Bahar Assoli area (Ethiopia). *Bulletin Volcanologique*, 1978, vol. 41, pp. 32-42. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02597681>.
6. Barberi F., Borsi S., Ferrara G., Marinelli G., Varet J. Relations between Tectonics and Magmatology in the Northern Danakil Depression (Ethiopia). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1970, pp. 292-311. doi:

<https://doi.org/10.1098/rsta.1970.0037>.

7. Ahmed H. *Magmatic (Orthomagmatic) Deposits (Ore Deposits Associated with Mafic-Ultramafic Complexes)*. In: Mineral Deposits and Occurrences in the Arabian–Nubian Shield. 2022. 512 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96443-6_3.

Рецензент: В.Й. Засельський,
д-р техн. наук, проф., ННТІ ДУЕТ

Стаття надійшла 08.03.2023

Стаття прийнята 30.04.2023

УДК 669.09.26

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288176

© Руських В.П.¹, Хавалиць Ю.В.²

ПРО ПЕРЕХІД НА ВОДНЕВУ МЕТАЛУРГІЮ

У статті показано, що зміна клімату це не лише потепління, а й надзвичайні природні явища (посухи, повені, штори, смерчі), що призводять до значної економічної шкоди. Потепління клімату спричинене підвищенням концентрації парникових газів в атмосфері Землі. Основним завданням є зниження викидів у довкілля діоксиду вуглецю. Здійснено аналіз міжнародних документів, таких як Кіотський протокол, Паризька кліматична угода, спрямована на скорочення викидів парникових газів в атмосферу. Показано, що значна кількість CO₂ надходить в атмосферу при виробництві чавуну та сталі, наведено дані про кількість викидів діоксиду вуглецю при виплавці сталі в Україні та на металургійному комбінаті «Азовсталь». Зроблено критичний аналіз існуючої технології виробництва сталі, що відрізняється високою ефективністю, але потребує значних капітальних вкладень, паливних та енергетичних ресурсів, джерелом яких є продукт термічної обробки кам'яного вугілля – кокс, вуглець якого у вигляді CO₂ надходить в атмосферу. Розглянуто численні запропоновані способи виробництва сталі без використання цього коксу. Одним із напрямків є виробництво губчастого заліза без плавлення, іншим напрямком безкоксової металургії є високотемпературні процеси одержання рідкого металу, що здійснюються в одну стадію. Визначено теоретично необхідну кількість відновлювача при відновленні заліза оксидом вуглецю та воднем. Розглянуто способи отримання відновлювального газу шляхом конверсії природного газу та газифікації кам'яного вугілля. Показано плани керівництва Групи Метінвест щодо розробки довгострокової технологічної стратегії металургійного виробництва з урахуванням екологічних вимог.

Ключові слова: зміна клімату, парниковий газ, вуглекислий газ, безкоксова металургія, декарбонізація, губчасте залізо.

V.P. Russkikh, Yu.V. Khavalits. On transition to hydrogen metallurgy. The article shows that climate change is not only warming, but also extraordinary natural phenomena (droughts, floods, storms, tornadoes etc), which lead to significant economic damage. Climate warming is caused by increasing concentrations of greenhouse gases in the earth's atmosphere. The main task is to reduce carbon dioxide emissions. An analysis has been carried out of international documents such as the Kyoto Protocol, the Paris Climate Agreement, aimed at reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere. It is shown

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-9711-2599, russkikh_v_p@ukr.net, дата смерті – 7.04.2023 р.

² науковий співробітник, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, uliva1981havalic@gmail.com

that a significant amount of CO₂ enters the atmosphere during the production of pig iron and steel, the data on the amount of carbon dioxide emissions from steel smelting in Ukraine and at «Azovsteel» iron and steel works have been provided. The article contains a critical analysis of the existing steel production technology, which is highly efficient but requires significant capital investment, fuel and energy resources, the source of which is the product of heat treatment of hard coal – coke, its carbon in the form of CO₂ entering the atmosphere. Numerous proposed methods of steel production without the use of this coke are considered. One of the directions was the production of sponge iron without melting, another direction of coke-free metallurgy was high-temperature processes of obtaining liquid metal, that are carried out in one stage. The theoretically required amount of reducing agent at of iron with carbon monoxide and hydrogen has been determined. Methods of producing renewable gas by conversion of natural gas and gasification of coal are considered. The plans of the Metinvest Group management to develop a long-term technological strategy for metallurgical production taking into account environmental requirements are presented.

Key words: *climate change, greenhouse gas, carbon dioxide, coke-free metallurgy, decarburization, sponge iron.*

Постановка проблеми. Клімат змінюється. Результатом цих змін є природні катаклізми, що впливають на життя людей та довколишній світ: це урагани, шторми, посухи, смерчі, цунамі, смерчі та ін. У всьому світі це стає частіше та глобальніше. В останні роки природні катаклізми почастишали настільки, що ігнорувати тему зміни клімату стало просто неможливо, а їх наслідки приносять значні економічні збитки. Президент США оцінив збитки від глобального потепління у 2021 році у 100 мільярдів доларів. За його словами, в штаті Нью-Джерсі за період з 2010 по 2020 роки відбулося 24 екстремальних погодних явищ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження показали, що сучасне потепління відбувається через підвищення концентрації парникових газів в атмосфері Землі. До парникових газів відносять такі гази, як вуглекислий газ, метан, фторвуглеводні, окис азоту, гексафторид сірки. Основним завданням є зниження викидів в довкілля діоксиду вуглецю, утворення якого пов'язано насамперед з людською діяльністю: спалюванням викопного палива – нафти, вугілля та газу на електростанціях та в двигунах внутрішнього згоряння, у промисловості, скороченням площі лісів, розкладанням органічних відходів на звалищах та ін.

Вчені сходяться у думці, що для запобігання небезпечній зміні клімату недостатньо дій лише на рівні держави та бізнесу – необхідна участь людей та змін їх щоденних звичок. Для ефективного вирішення проблеми кліматичної кризи в розвинених країнах особистий вуглецевий слід необхідно скоротити на 80-90% до 2050 [1]. Кінцева мета країн ЄС є досягнення «кліматичної нейтральності», що передбачає скорочення викидів CO₂ в ЄС на 95% у порівнянні з рівнем 1990 р. Попит на природний газ в ЄС знизиться з ~ 5000 ТВт·год у 2020 р. до ~ 4000 ТВт·год у 2050 р. За даними МЕА, якщо додавати 20% водню у європейську газову мережу, то можна досягти скорочення викидів CO₂ на 60 млн. т щорічно [1]. Головна мета полягає в тому, щоб скоротити або зупинити викиди CO₂, а не знизити споживання енергії як таке [2-5].

У травні 1992 р. Організацією об'єднаних націй прийнято рамкову Конвенцію про зміну клімату. Відповідно до Конвенції було засновано Конференцію Сторін, що стала вищим органом конвенції. Саме цей орган на постійній та регулярній основі займається розгляданням питань з будь яких правових документів, що пов'язані із здійсненням Конвенції та можуть бути прийняті Конференцією Сторін. Конференція Сторін приймає необхідні для сприяння ефективному здійсненню рішення щодо Конвенції.

Київський протокол став першим міжнародним документом, міжнародною угодою, що була спрямована на скорочення викидів парникових газів у навколишнє середовище. 11 грудня 1997 року його було прийнято та за вісім років, а саме 16 лютого 2005 року, він набув чинності. Головною метою стала стабілізація рівня концентрації парникових газів у навколишньому середовищі на позначці, що не допускала би шкідливого та небезпечного антропогенного впливу на клімат нашої планети. Було встановлено квоту на максимально припустимий викид парникових газів для кожної країни. Якщо у якійсь країні стається випадок, що вона викидає парникових

газів більше виділеної їй квоти, то вона повинна «докупити» обсяг, якого не вистачає у тій державі, що викидає в атмосферу парникових газів менше виділеної квоти. Кіотський протокол являє собою першу глобальну угоду щодо охорони навколишнього середовища, яка заснована на своєрідному ринковому механізмі регулювання, тобто механізмі торгівлі різними країнами та державами квотами на викиди парникових газів.

Держави призначили собі кількісні зобов'язання на скорочення або обмеження викидів на період з 1 січня 2008 року до 31 грудня 2012 року. Метою цього було зниження у вказаний період сукупного середнього рівня викидів на 5,2% проти рівня 1990 року. Причому основні зобов'язання взяли на себе індустриальні країни, а країни, що розвиваються, зобов'язань на себе не брали. Також не брали зобов'язань на себе Китай та Індія. Серед індустриальних країн Євросоюз має скоротити викиди на 8%, США – на 7%, Японія та Канада – на 6%, країни Східної Європи – у середньому на 8%. Наша держава Україна мала зберегти середньорічні викиди у 2008-2012 роках на рівні 1990 року.

У 2015 році в рамках Конвенції ООН про зміну клімату 196 країн підписали окремий документ у рамках РКЗК ООН – Паризьку кліматичну угоду, згідно з якою всі країни, незалежно від рівня їх економічного розвитку, зобов'язалися скоротити викиди в атмосферу парникових газів. Можливість це зробити є, якщо всі країни світу відмовляться від викопного палива та перейдуть на 100% на відновлювану енергетику. Україна також є членом цієї угоди, вона також бере на себе ці зобов'язання.

Глобальні викиди парникових газів необхідно скорочувати на 7,6% щорічно в період між 2020 та 2030 роками, щоб досягти мети Паризької угоди – обмежити глобальне потепління в рамках 1,5°C. Україна за період з 1990 по 2019 роки скоротила викиди парникових газів до 332 млн. т.

Значна кількість CO₂ надходить в атмосферу внаслідок металургійного виробництва при виплавці чавуну та сталі. Наприклад, 2020 року в Україні було виплавлено 20,36 млн. т чавуну. На виплавку тонни чавуну загалом витрачається 500 кг умовного палива, що містить 80% вуглецю, тобто 400 кг вуглецю. На виплавку всього річного виробництва чавуну в Україні витрата вуглецю становитиме 20,36 x 0,4 = 8,144 млн. т. Весь цей вуглець при виробництві чавуну та сталі надходить в атмосферу у вигляді CO₂.

При окисленні вуглецю за реакцією $C + O_2 = CO_2$ на тонну вуглецю, що окислюється, утворюється 3,67 т вуглекислого газу. За річного виробництва чавуну в Україні 20,36 млн. т в атмосфері викидається 29,89 млн. т CO₂.

На металургійному комбінаті «Азовсталь» 2020 року було виплавлено 3,803 млн. т чавуну та 4,194 млн. т сталі. За такої ж витрати умовного палива на виплавку чавуну в атмосферу надійшло 5,58 млн. т вуглекислого газу, що становить 18,65% від загальної кількості, викинутого металургійними підприємствами України.

Не можна сказати, що працівниками металургійного комбінату «Азовсталь» не вживаються заходи щодо зниження викидів парникового газу. Так впровадження в доменному цеху комбінату результатів двох науково-дослідних робіт, виконаних ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» на замовлення металургійного комбінату «Азовсталь» [6], дозволило знизити викиди CO₂ в докілья на 53095 т/рік (0,95% від загальної кількості викидів комбінату) та знизити витрату повітря на виплавку чавуну на 67565 м³/рік.

Це, безумовно, не може вирішити проблему повного виключення викидів парникових газів та, за словами Д.І. Менделєєва, «прийде згодом знову час шукати способів прямого отримання заліза і сталі з руд, минаючи чавун».

Мета статті – розглянути особливості та доцільності переходу металургії на водневу технологію. Проаналізувати комплекс причин, пов'язаних з недоліками доменного процесу, складністю та суперечливістю існуючої схеми виробництва, а також необхідність підвищення якості сталі, що змушує металургів шукати шляхи позадоменного або «прямого» отримання заліза та сталі.

Виклад основного матеріалу. В даний час загальнопоширеною є двостадійна схема виробництва сталі, яка показала високу ефективність. Чавун, що виплавляється в доменних печах, рафінують у сталеплавильних процесах. Однак двостадійна схема складна, вимагає великих капітальних вкладень, паливних та енергетичних ресурсів, причому на першій стадії виробництва

в залізо переходить ряд елементів, які на другій стадії – при сталеплавильному процесі – треба видаляти. Крім того, в доменному виробництві основним джерелом теплової та відновлювальної енергії є продукт термічної обробки певних марок кам'яного вугілля – кокс. Це визначає необхідність створення нового відновлювального процесу, що здійснюється за умов, що виключають відновлення кремнію, марганцю, фосфору, науглецювання заліза та використання вуглецевмісних джерел енергії.

Ще задовго до розвитку цих методів Д.К. Черновим було проведено глибоке дослідження процесу первинного отримання заліза. Він проаналізував процес та дійшов висновку щодо можливості виплавки металу безпосередньо у доменній печі без використання для цього коксу [4]. Проте розвиток безкоксної металургії пішов іншим шляхом.

Одним з напрямів було виробництво губчастого заліза, тобто відновлення у твердій фазі. Воно здійснюється, як правило, у шахтних печах у протитечії шматкової шихти та відновлювального газу (способи Віберга, Пурофер, Мідрекс, Армко, ВНІМТ, комбінатів «Запоріжсталь», Білорецького та ін.) [7].

Іншим напрямком безкоксної металургії є високотемпературні процеси одержання рідкого металу, що здійснюються в одну стадію. До таких процесів відносяться Доред, Екеторп-Валлак, спосіб Буше, а також процес в киплячому шлаковому шарі. Одним з розроблених процесів цього типу є процес рідкофазного відновлення (ПРВ) або – ROMELT (пізніша назва) [7, 8].

Таким чином, розвиток безкоксної металургії пішов шляхом поділу твердофазного і рідкофазного відновлення в окремі процеси, що здійснюються в різних агрегатах. При цьому продукт твердофазного відновлення призначений для розплавлення переважно в електроагрегатах, а одностадійних рідкофазних процесах відновлення ведеться в ендотермічному режимі при великих витратах тепла з отриманням рідкого металу.

Одержання губчастого заліза у великих обсягах при його відновленні газами вперше стало можливим у другій половині 50-х років ХХ століття, коли було споруджено першу установку фірми «Охалата та Ламіну» в Мексиці, так званого процесу «ХіЛ-1». Після цього з'явилося ще п'ять процесів, які змогли стати альтернативою для традиційної технології виробництва сталі: «Мідрекс», «Пурофер», «Армко», НСК («Ніхонстілкорп», Японія) та «ХіЛ-III» [9, 10].

Під час розробки цих процесів основним стимулом було прагнення отримувати залізо (сталь) без застосування коксу.

Спільним для технологічних процесів аналізованої групи є застосування газу для отримання відновлювального газу. Використовували три способи конверсії природного газу:

- парову: $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$;
- вуглекислотну: $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2$;
- кисневу: $\text{CH}_4 + \frac{1}{2}\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$.

Основною особливістю цих способів конверсії газу є різне співвідношення CO і H_2 в продуктах. При паровій конверсії – 25% CO та 75% H_2 , при вуглекислотній – 50 % і того й іншого, при кисневій конверсії – 33% CO та 67% H_2 .

Чистий водень на відновлення оксидів заліза використаний у процесі «Водень-залізо». Відновлення відбувається в киплячому шарі при температурі 480-540°C та надлишковому тиску 3,5 МПа. Вибір низької температури обґрунтований можливістю злипання частинок шихти, що відновлюються, при температурі вище 540°C, а високий тиск – бажанням збільшити швидкість відновлення при низьких температурах. Процес відрізняється низьким використанням відновлювальної здатності водню. Водень отримують при паровій або кисневої конверсії газу з наступним відмиванням вуглекислоти. Ступінь металізації губчастого заліза досягає 95-98%.

Проект установки для прямого отримання заліза на комбінаті «Запоріжсталь» було розроблено 1961 р. інститутом «Укргіпромет». Будівництво установки розпочато 1965 р. і закінчено 1966 р.

Установка призначалася для проведення дослідно-промислових випробувань та уточнення параметрів та показників технології виробництва губчастого заліза у шахтній печі за допомогою відновлювального газу, отриманого кисневою конверсією природного газу у газокисневого пальнику.

Продуктивність установки по металізованим окатишам змінювали від 50 до 100% проектною потужності. Високий вміст дрібниці у вихідних окатишах та їх низька міцність викликали

порушення роботи печі, що погіршувало фільтрацію газу через шар, газорозподіл і, як наслідок, надмірне підвищення температури, що супроводжується утворенням спеків. Під час роботи на окатишах без дрібниці спеки не утворювалися навіть за температури у зоні відновлення $\sim 1000^{\circ}\text{C}$.

За два роки до початку повномасштабної війни Група Метінвест розпочала розробку довгострокової технологічної стратегії з урахуванням екологічних викликів [11]. Метою розробки було запровадження найкращих світових методів та практик на власному виробництві. Група бачила технологічне майбутнє за електросталеплавильним процесом та використанням водневих технологій. Під час міжнародного форуму «Декарбонізація сталевих індустрій: виклик для України» генеральним директором було сказано: «Ми вивчаємо можливість будівництва єдиного комплексу, що складається з технології прямого відновлення заліза (DRI) та електрометалургійного виробництва для переробки гарячого DRI».

За словами Юрія Риженкова, поки що немає ясності щодо всіх технологій, які використовуватиме Група, та кількісних параметрів, але основні орієнтири виглядають так:

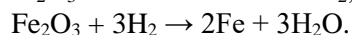
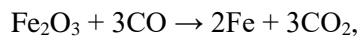
- впровадження нових технологічних виробництв у наступні 10 років, до 2030 року;
- суттєве зниження викидів CO_2 відповідно до технологічних бенчмаркінгів від світових виробників обладнання.

Планується підготовка залізородної сировини, кінцевим продуктом якої будуть окатиші DRI, металізація окатишів у шахтних печах з використанням гарячих відновлювальних газів, плавка металізованих окатишів в електросталеплавильних печах.

Відновлювальний газ доцільно отримувати паровою конверсією природного газу, при цьому він на 75% складається з водню та на 25% з CO .

При дефіциті природного газу або за високої ціни в Україні є можливість отримання відновлювального газу газифікацією вуглецю кам'яного вугілля: $\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$. У цьому випадку відновний газ містить 50% CO і стільки ж водню.

Теоретично необхідна кількість відновника при відновленні заліза оксидом вуглецю та воднем визначається з реакцій:



Звідси випливає, що для відновлення тонни заліза потрібно 0,75 т оксиду вуглецю чи 0,05 т водню. При ступені використання CO та H_2 у відновлювальному агрегаті на рівні 45%, маса відновників відповідно збільшується до 1,67 та 0,11 т/т заліза. Маса водню більш ніж у 15 разів менша за масу оксиду вуглецю. Отже, економічно доцільно як відновник використовувати водень, якщо його ціна буде не більш ніж у 15 разів вища за ціну оксиду вуглецю.

Висновки

1. Перехід чорної металургії на водневу технологію є обов'язковим. Водневі технології – основний засіб зменшення вуглецевого сліду в атмосфері.

2. Металізація отриманням окатишів DRI в шахтних печах, виплавка сталі в електропечах є однією з найбільш раціональних водневих технологій.

3. Газ для відновлення та металізації окатишів повинен містити якнайменше оксиду вуглецю. Саме це сприятиме зниженню викидів CO_2 в навколишній простір.

4. Використання водню як відновника економічно доцільно, якщо його ціна буде не більш ніж у 15 разів вищою за ціну оксиду вуглецю.

Перелік використаних джерел:

1. Шрайбер О.А., Дубровський В.В., Тесленко О.І. Сучасний стан і перспективи розвитку водневої енергетики у світі. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32, № 5. С. 199-209. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/30>.
2. Біла С.О. Інституційна підтримка міжнародного економічного співробітництва у сфері відновлюваної енергетики. *Економічний вісник університету*. 2018. Вип. 37/1. С. 267-275. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1220715>.
3. Біла С.О., Овчаренко К.Ю. Роль «зеленої енергетики» у забезпеченні міжнародної економічної безпеки. *Стратегія розвитку України*. 2019. № 1. С. 26-34.
4. Біла С.О., Захаров І.М. Стратегічні пріоритети міжнародного економічного співробітництва

- України та ЄС у сфері сталого розвитку. *Стратегія розвитку України*. 2017. № 2. С. 27-34.
5. Гура К.Ю., Петрук В.Г. Аналіз сучасних тенденцій декарбонізації та екомодернізації енергетики України і світу. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2021. № 5. С. 9-26. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-19-26>.
 6. Разработка мероприятий по повышению эффективности работы газового потока в ДП № «МК «Азовсталь» на основе балансовых методов анализа плавки: отчет НИР (договор № 41/0148Н/554 от 25.04.2019 г.). – Мариуполь. ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 98 с.
 7. Губін Г.В., Півень В.О. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза. Кривий Ріг: ПП «Видавничий дім», 2010. 336 с.
 8. Kalle U., Pittel K., Steffen R. Development of sponge iron production throughout the world. *LKAB-DR pellet symposium*. Kiruna, 1979.
 9. Безкоксова металургія заліза / В.П. Іващенко, О.Г. Величко, В.С. Терещенко, В.А. Чеченев. Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-ВАЛ», 2003. 336 с.
 10. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки. Киев: Наукова думка, 2007. 411 с.
 11. «Метинвест» идет по пути декарбонизации и «зеленой» металлургии – гендиректор. URL: <https://ru.interfax.com.ua/news/greendal/751739.html>.

References:

1. Schreiber O.A., Dubrovskiy V.V., Teslenko O.I. The current state and prospects for the development of hydrogen energy in the world. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2021, vol. 32, № 5, pp. 199-209. doi: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.5/30>. (Ukr.)
2. Bila S.O. Institutional support of international economic cooperation in the field of renewable energy. *University economic bulletin*, 2018, iss. 37/1, pp. 267-275. doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1220715>. (Ukr.)
3. Bila S.O., Ovcharenko K.Yu. The role of «green energy» in ensuring international economic security. *Strategy of development of Ukraine*, 2019, № 1, pp. 26-34. (Ukr.)
4. Bila S.O., Zakharov I.M. Strategic priorities of international economic cooperation of Ukraine and the EU in the sphere of sustainable development. *Strategy of development of Ukraine*, 2017, № 2, pp. 27-34. (Ukr.)
5. Hura K.Yu., Petruk V.G. Analysis of modern trends of decarbonization and eco-modernization of the energy sector of Ukraine and the world. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 2021, № 5, pp. 9-26. doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-158-5-19-26>.
6. *Research report (contract No. 41/0148N/554 dated April 25, 2019). Development of measures to improve the efficiency of the gas flow in BF No. «МК «Azovstal» based on balance methods of analysis of the heat*. Mariupol, 2019. 98 p. (Rus.)
7. Gubin G.V., Piven V.O. *Modern industrial methods of coke-free metallurgy*. Kriviy Rig, PP «Vidavnychy dim» Publ., 2010. 336 p. (Rus.)
8. Kalle U., Pittel K., Steffen R. Development of sponge iron production throughout the world. *LKAB-DR pellet symposium*, Kiruna, 1979.
9. Ivashchenko V.P., Velichko O.G., Tereshchenko V.S., Chechenev V.A. *Non-coke metallurgy of the hall*. Dnipropetrovsk, RVA «Dnipro-VAL» Publ., 2003. 336 p. (Rus.)
10. Bolshakov V.I. *Technology of highly efficient energy-saving blast furnace melting*. Kyiv, Naukova dumka Publ., 2007. 411 p. (Rus.)
11. Metinvest is following the path of decarbonization and «green» metallurgy - CEO. Available at: <https://ru.interfax.com.ua/news/greendal/751739.html> (accessed 19 December 2022).

Рецензент: Л.І. Тарасюк,
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 13.02.2023
Стаття прийнята 02.04.2023

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.3:629.421

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288177

© Рой С.В.¹, Качан А.В.², Тихонов А.С.³, Якунін Д.І.⁴,
Рябов Є.С.⁵

ЗАСТОСУВАННЯ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПРИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОВОЗУ ТГМ6

Розглянуто питання оновлення локомотивного парку промислових підприємств шляхом модернізації застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності. Проаналізовано попередні дослідження щодо вибору типу приводу колісних пар та встановлено, що застосування групового приводу колісних пар забезпечує можливості реалізації високих тягових зусиль без додаткових пристроїв, а сам привід має меншу вартість. Це обумовлює доцільність застосування групового приводу колісних пар при модернізації тепловозів з гідравлічною передачею потужності. Для реалізації вказаних переваг необхідним є застосування тягового електроприводу на основі електромеханічних перетворювачів змінного струму. Проведено аналіз тягового електроприводу тепловозу ТГМ6, модернізованого ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод» з використанням тягового електроприводу на основі асинхронного електродвигуна та групового приводу колісних пар. Проведено аналіз шляхів удосконалення тягового електроприводу для зменшення споживання паливно-енергетичних ресурсів. Визначено, що доцільним може бути застосування силової енергетичної установки з накопичувачем енергії та застосування двох тягових електродвигунів для приводу колісних пар.

Ключові слова: тяговий електропривод, енергоефективність, рухомий склад, модернізація, локомотив.

S.V. Roi, A.V. Kachan, A.S. Tykhonov, D.I. Iakunin, Ye.S. Riabov. Application of electric traction drive for the modernization of locomotives with hydraulic power transmission. The issue of updating the locomotive fleet of industrial enterprises by modernizing outdated diesel locomotives with hydraulic power transmission was considered. The analysis of existing modernizations shows the possibility of using traction electric drive while preserving the original group drive of wheel pairs. This approach is used by manufacturers when updating outdated and creating new diesel locomotives and traction modules for rolling stock. A possible option is the use of single-motor carts. Previous studies on the choice of the type of wheel pairs drive were analyzed and it was established that the use of a group

¹ директор, ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0009-0009-0610-308X, rsyntz@gmail.com

² інженер, ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0009-0006-9961-322X, inbox.ak@ukr.net

³ головний енергетик, ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод», м. Миколаїв, аспірант, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0009-0002-7014-1186, ntrzconstructor@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0000-0002-3995-3162, unicomber@ukr.net

⁵ канд. техн. наук, ст. наук. співроб., доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, ORCID: 0000-0003-0753-514X, riabov.ievgen@gmail.com

drive of wheel pairs provides the possibility of realizing high traction forces without additional devices, and the drive itself has a lower cost. This determines the expediency of using a group drive of wheel pairs when modernizing diesel locomotives with hydraulic power transmission. To realize these advantages, it is necessary to use a traction electric drive based on electromechanical alternating current converters. This approach was implemented by Mykolaiv Locomotive Repair Plant LLC during the modernization of TGM6 diesel locomotives. The diesel locomotive is intended for shunting and hauling operations, as a result of which it was assumed during the design that the traction force when moving is equal to 320 kN, the continuous traction force is 300 kN, and the maximum speed is 50 km/h. The power plant consists of a modern Cummins diesel engine and a synchronous generator. A frequency-controlled asynchronous traction electric motor is used to drive the wheel pairs. Power and control of the electric motor is carried out using a voltage inverter. Diesel locomotives use a controlled electric drive of cooling motor-fans, and semiconductor converters are used to power auxiliary systems. The locomotive and its systems are controlled by a microprocessor control system. The application of the traction electric drive based on the asynchronous electric motor provided the estimated efficiency of the diesel locomotive and the efficiency of the diesel power at the nominal power and the estimated speed of the long-term mode, equal to 6 km/h, are 0.312 relative units and 0.69 relative units, respectively. The analysis of ways to improve the traction electric drive to reduce the consumption of fuel and energy resources was carried out. It was determined that the use of a power plant with energy storage and the use of two traction electric motors for the group drive of wheel pairs may be expedient.

Key words: *traction electric drive, energy efficiency, rolling stock, modernization, locomotive.*

Постановка проблеми. Залізничний транспорт широко застосовується у технологічних процесах промислових підприємств гірничо-видобувної та металургійної галузей, на підприємствах з виробництва будівельних матеріалів, хімічних підприємствах тощо. Для переміщення вагонів застосовуються тепловози з гідравлічною передачею потужності типу ТГМ3, ТГМ4, ТГМ6, ТГМ40, ТГМ23, ТГК2 та інші. Вказані тепловози – технічно застарілі, що викликає підвищені витрати на паливо-мастильні матеріали, технічне обслуговування та ремонт. Внаслідок тривалих термінів експлуатації, неякісного обслуговування та ремонту все частіше виникають поломки ключових агрегатів та вузлів, відновлення чи заміна яких неможлива.

Для оновлення тепловозів з гідравлічною передачею потужності здебільшого застосовується ремоторизація, при якій встановлюється сучасний дизельний двигун. Такий вид модернізації застосовують вітчизняні локомотиворемонтні заводи. За кордоном здійснюють модернізації із застосуванням сучасної гідропередачі [1].

Альтернативним варіантом є застосування тягового електроприводу при збереженні оригінальної екіпажної частини з груповим приводом колісних пар. Проекти таких модернізацій розробляються (а за повідомленнями на інтернет-ресурсах – вже реалізовані) у СНД та країнах Балтії. В Україні модернізацію тепловозу типу ТГМ6 із застосуванням тягового електроприводу виконано ТОВ «Миколаївський тепловозоремонтний завод». У розрізі цього вбачається актуальним розробка та дослідження тягового електроприводу для тепловозів з груповим приводом колісних пар.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Груповий привод колісних пар та електричний привод колісних пар застосовуються на тягових модулях колійних машин (рис. 1а).

Передача крутного моменту на колісні пари в транспортному режимі відбувається від одного тягового електродвигуна ЕД-118А через режимний редуктор, карданні вали та осьові редуктори, а в робочому режимі – від одного електродвигуна ДК-213 через знижувальний і режимний редуктори, карданні вали та осьові редуктори. Аналогічну трансмісію мають тягово-енергетичні модулі ТЕУ-630, УТМ2. На колійній тяговій машині ПТМ-630 рух у транспортному режимі здійснюється від дизеля через гідропередачу. У робочому режимі колісні пари приводяться у

обертання від електродвигуна, який через погоджувальний редуктор з'єднано з вихідним валом гідропередачі.



а)



б)

Рис. 1 – Загальний вигляд універсального тягового модуля УТМ-1 (а) дослідного тепловозу ТЕМ12 (б)

Відомим є тепловоз ТЕМ12 (рис.1б), дослідний зразок якого експлуатувався на Маріупольському коксохімічному заводі «Маркохім». На тепловозі застосовано два тягові електродвигуни ЕД-121, підвішені до головної рами кузова. Вали електродвигунів з'єднані між собою та сполучені з карданними валами осьових редукторів візків. Це забезпечує механічний зв'язок між собою всіх колісних пар локомотива. Живлення та керування тяговими електродвигунами здійснюється від дизель-генераторної установки.

Наразі модернізація тепловозів з гідравлічною передачею шляхом застосування тягового електроприводу виконується європейськими компаніями. Компанія Alstom застосувала тяговий електропривод при модернізації застарілих тепловозів з гідропередачею типу BR203 (V100) [2] (рис. 2а). Важливим є те, що на модернізованому тепловозі також застосовано гібридну енергетичну установку. Компанія Kolejové pohonu [3] застосовує тяговий електропривод при модернізації застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності різних модифікацій (рис. 2б). Оновлені локомотиви можуть бути з живленням від тягових акумуляторів або дизель-генератора. При створенні гібридного локомотиву LHy-M (рис. 2в) було використано екіпажну частину тепловозу з гідравлічною передачею потужності LDH 1250 CP [4]. На усіх вказаних тепловозах застосовано тяговий електропривод на основі електродвигунів змінного струму.



а)



б)



в)

Рис. 2 – Загальний вигляд: а) тепловозу BR203H; б) Battery Locomotives of A415; в) гібридний локомотив LHy-M

Компанія Toshiba використала екіпажну частину тепловозу з гідравлічною передачею потужності VR90 при створенні гібридного локомотиву HELMS [5] (рис. 3а).

Компанія CFD [6] пропонує нові локомотиви, які обладнані тяговим електроприводом з груповим приводом колісних пар (рис. 3б). Компанією Skoda опрацьований проєкт електровозу із застосуванням групового приводу колісних пар [7] (рис. 3в). На електровозі запропоновано застосування двох електродвигунів, розміщених під рамою електровозу, які через карданні вали та проміжні редуктори з'єднані з осьовими редукторами колісних пар трьох двовісних візків. У [8] можна знайти пропозиції щодо застосування групового приводу на магістральних електровозах.

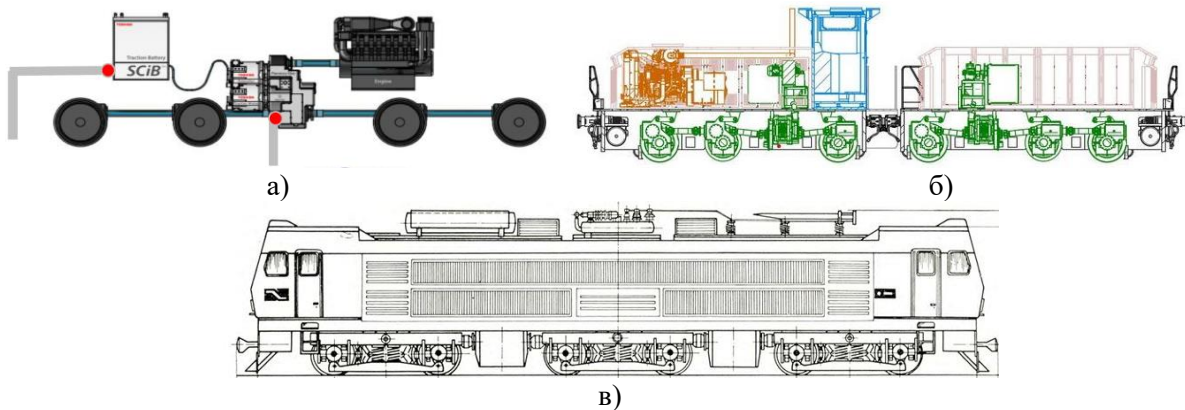


Рис. 3 – Схема трансмісії локомотиву HELMS (а), проект локомотиву F2D33 компанії CFD (б); проект електровозу Skoda з груповим приводом колісних пар (в)

Створення локомотивів з груповим приводом колісних пар також можливе шляхом застосування *мономоторних візків*, в яких від одного тягового електродвигуна приводяться у обертання декілька колісних пар (рис. 4). Електровози з такими візками створювалися для французьких залізниць, а згодом поширилися і на інші європейські країни. У мономоторних візках застосовано електродвигуни пульсуючого струму. Мономоторний візок аналогічної конструкції створений для електровозу ВЛ83, де було застосовано вентильний (синхронний) двигун.

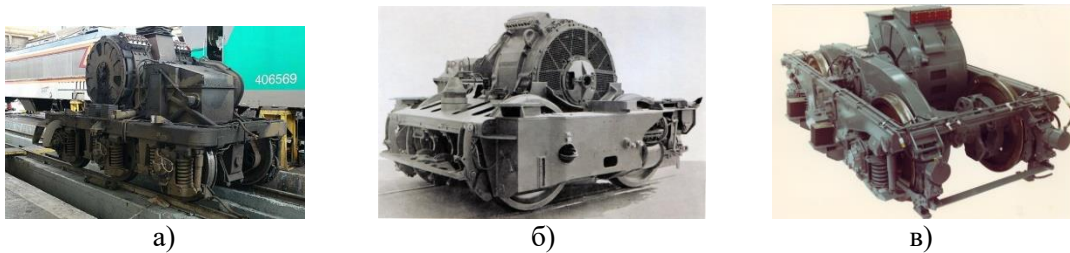


Рис. 4 – Мономоторні візки: а) моторний візок електровозу серії CC6500 SNCF; б) моторний візок електровозів серії BB8500, BB17000 та BB25500; в) візок електровозу ВЛ83

Таким чином, найбільшого поширення набуло застосування мономоторних візків на електрорухомому складі. Розповсюдженим підходом є використання екіпажної частини тепловозів з гідравлічною передачею потужності для створення маневрових локомотивів з тяговим електроприводом. В цьому випадку є можливим застосування гібридних енергетичних установок та тягових акумуляторних батарей. Також відомо про створення нових локомотивів з тяговим електроприводом та груповим приводом колісних пар.

Тяговий електропривод локомотивів з груповим приводом колісних пар створюється з використанням електродвигунів змінного струму, як правило, асинхронних.

Метою статті є представлення результатів розробки тягового електроприводу для модернізації тепловозів з гідравлічною передачею потужності.

Виклад основного матеріалу. Узагальнення матеріалів, присвячених аналізу та порівнянню індивідуального та групового тягового приводу колісних пар [9, 10], дозволяє виділити наступні переваги групового приводу колісних пар:

- потребує меншої кількості агрегатів;
- має меншу вартість;
- має меншу трудомісткість обслуговування та ремонтів;
- екіпажна частина локомотиву з груповим приводом колісних пар має меншу масу, моменти інерції та розміри;
- підвищений коефіцієнт зчеплення;

– менша схильність до боксування та юзу в умовах нестабільності зчеплення колеса з рейкою.

До недоліків групового приводу колісних пар відносять:

- більш низький коефіцієнт корисної дії;
- збільшений опір рухові;
- зменшення статичного прогину ресорного підвішування;
- підвищені вимоги до технічного обслуговування;
- значні динамічні навантаження у нестационарних режимах роботи.

Як бачимо, груповий привід колісних пар має суперечливі властивості. Однак вказані переваги у вигляді меншої вартості приводу та можливості реалізації високих тягових зусиль без додаткових пристроїв є значущими. А отже, збереження групового приводу колісних пар при модернізації тепловозів з гідравлічною передачею потужності та його застосуванні при створенні нових локомотивів автори вважають доцільним.

Зважаючи на вищенаведене, ТОВ «Миколаївський тепловозремонтний завод» розробив проект модернізації застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності типу ТГМ та уперше в Україні виконав за цим проектом модернізацію тепловозу ТГМ6Д (рис. 5). Умови експлуатації модернізованого тепловозу передбачають його застосування для виконання «середньої» та «важкої» маневрової роботи. За результатами аналізу режимів експлуатації маневрових тепловозів на ПАО «АрселорМітал Кривий Ріг» визначено параметри тепловозу, які наведено у таблиці. Гранична тягова характеристика тепловозу показана на рис. 6.

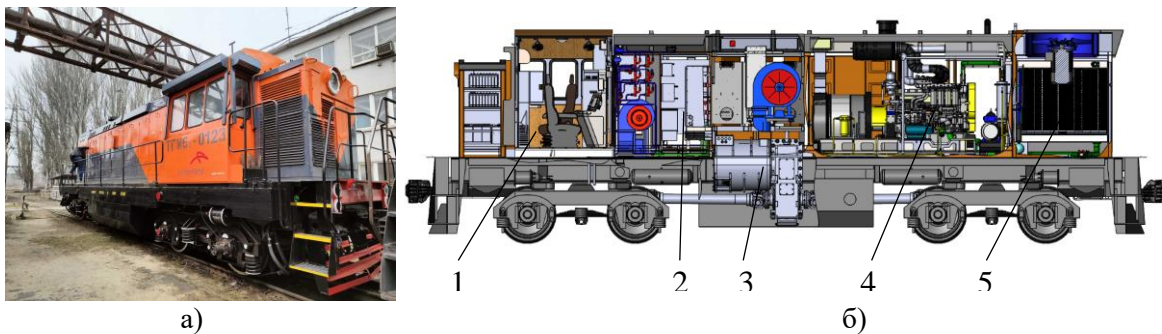


Рис. 5 – Загальний вигляд (а) та розміщення обладнання (б) на модернізованому тепловозі ТГМ6Д №0123: 1 – кабіна; 2 – апаратна камера; 3 – мотор-редуктор; 4 – дизель-генератор; 5 – охолоджуючий пристрій

Таблиця

Параметри модернізованого тепловозу ТГМ6 з тяговим електроприводом

Параметр	Од.вим.	Значення
Потужність по дизелю	кВт	747
Сила тяги тривалого режиму	кН	300
Максимальна швидкість	км/год	50
Тип тягового електроприводу		на основі електричних машин змінного струму
Тип приводу колісних пар		груповий із застосуванням екіпажної частини тепловозу ТГМ6
Маса тепловозу	т	98

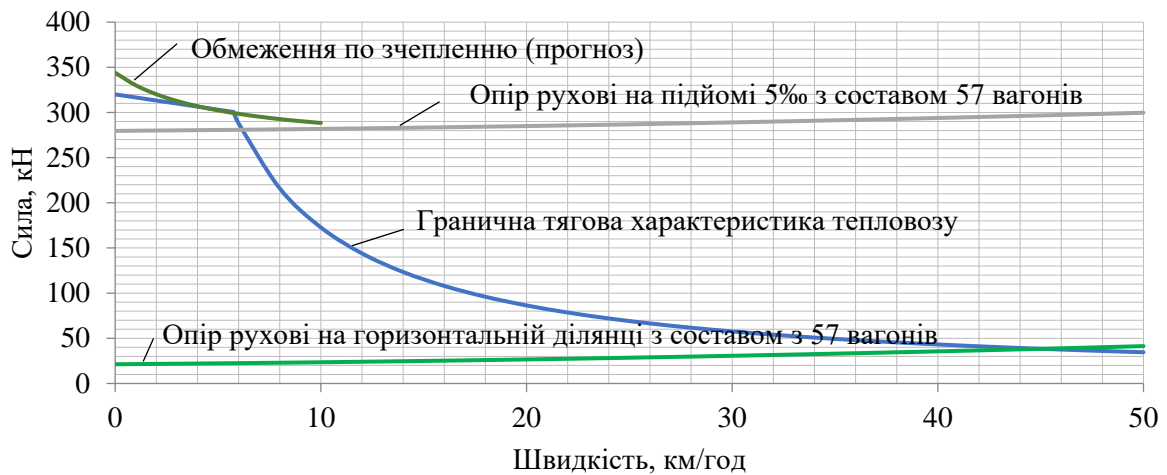


Рис. 6 – Тягові характеристики модернізованого тепловозу

Для забезпечення тягових властивостей тепловозу та реалізації переваг групового приводу колісних пар на тепловозі застосовано тяговий електропривод на основі асинхронного електродвигуна. Структурну схему тягової системи тепловозу показано на рис. 7.

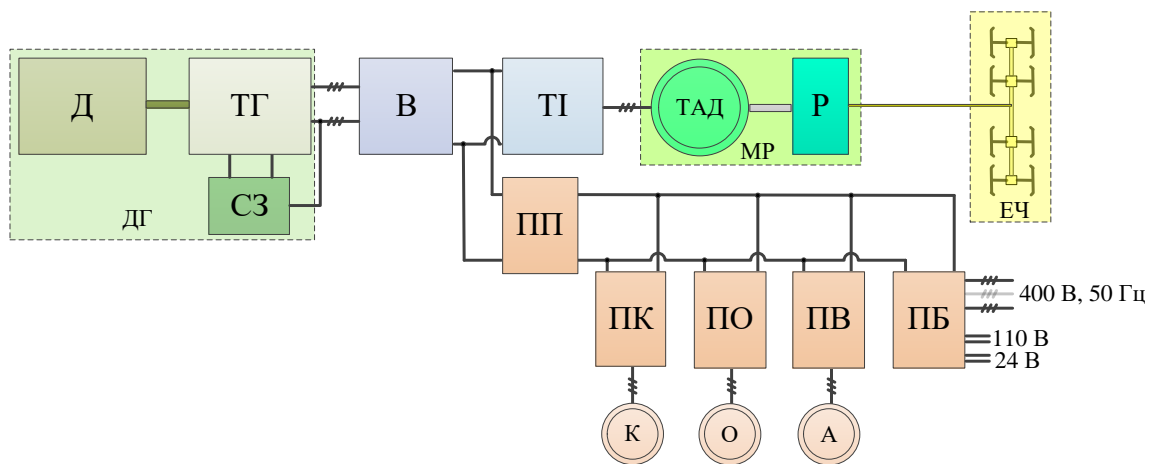


Рис. 7 – Структурна схема тягової системи модернізованого тепловозу: ДГ – дизель-генераторна установка; Д – дизельний двигун; ТГ – тяговий генератор; СЗ – система збудження; В – випрямляч; ТІ – тяговий інвертор; МР – мотор-редуктор; ТАД – тяговий асинхронний двигун; Р – проміжний редуктор; ЕЧ – екіпажна частина тепловозу; ПП – проміжний перетворювач; ПК – перетворювач для живлення електродвигуна компресора; К – мотор-компресор; ПО – перетворювач для живлення електродвигуна вентилятора охолоджуючого пристрою; О – електродвигун мотор-вентилятора охолоджуючого пристрою; ПВ – перетворювач для живлення електродвигуна вентилятора охолодження тягового асинхронного електродвигуна; А – електродвигун мотор-вентилятора охолодження тягового електродвигуна; ПБ – багатоканальний перетворювач для живлення електричних кіл тягового електрообладнання та бортової мережі

Джерелом живлення є дизель-генераторна установка ДГ з дизелем виробництва Cummins потужністю 747 кВт при частоті обертання 1800 об/хв. Тяговий синхронний генератор ТГ забезпечує живлення через некерований випрямляч В тягового інвертора ТІ та погоджувального перетворювача допоміжних систем ПП. Тяговий інвертор ТІ забезпечує живлення та керування тяговим асинхронним електродвигуном ТАД. Обертний момент від валу тягового асинхронного

електродвигуна *ТАД* передається на проміжний редуктор *P*, вихідний вал якого сполучений карданними валами з осьовими редукторами колісних пар екіпажної частини тепловозу *ЕЧ*.

Живлення допоміжних систем тепловозу здійснюється від погоджувального перетворювача *ПП*, який під'єднано до некерованого випрямляча *В*. На тепловозі застосовано частотно-керований електропривод мотор-вентиляторів охолоджуючого пристрою (електродвигун *О* та перетворювач *ПО*), частотно-керований електропривод мотор-вентилятора охолодження тягового електродвигуна (електродвигун *А* та перетворювач *ПВ*) та мотор-компресор, укомплектований електродвигуном *К* та перетворювачем *ПК*. Для живлення бортової мережі та допоміжних кіл тягового електрообладнання призначений багатоканальний перетворювач *ПБ*. На тепловозі застосовано акумуляторну батарею підвищеної ємності, що дозволяє забезпечити роботу обладнання у кабіні при непрацюючому дизельному двигуні.

Електрообладнання виконано у «тяговому» виконанні з урахування умов експлуатації тепловозу. Тяговий асинхронний електродвигун – з короткозамкненою обмоткою ротора, з незалежною вентиляцією, інтенсивність вентиляції змінюється в залежності від навантаження тягового асинхронного електродвигуна. Тяговий генератор – синхронний, з самовентиляцією. При розробці тягових електричних машин застосовані сучасні електротехнічні та ізоляційні матеріали. Тяговий інвертор та допоміжні перетворювачі виконані на IGBT-транзисторах.

Для системи керування тепловозом використовується мережа на основі протоколу CAN. Система керування забезпечує управління тяговою системою в штатних режимах та програмний захист у аварійних ситуаціях.

Особливістю розробленого тягового електроприводу є можливість тривалої роботи тепловозу з максимальною силою тяги при зниженій потужності: тяговий електропривод забезпечує тривалу роботу тепловозу з максимальною силою тяги при швидкості від 3 км/год. Застосування частотно-керованого електроприводу мотор-вентиляторів охолоджуючого пристрою та охолодження тягового асинхронного електродвигуна забезпечує їх роботу з оптимальним навантаженням, що сприяє зниженню споживання енергії.

Розрахунковий коефіцієнт корисної дії тепловозу та коефіцієнт корисного використання потужності дизеля при номінальній потужності та розрахунковій швидкості тривалого режиму, рівній 6 км/год, складають 0,312 д.о. та 0,69 д.о. відповідно. Ці значення задовольняють вимогам стандартів на маневрові тепловози, хоча знаходяться на межі допустимого діапазону. На теперішній час тепловоз проходить експлуатаційні випробування на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Експериментальні поїздки підтвердили реалізацію високих тягових зусиль. Зокрема, тепловоз забезпечив рух поїздів, для яких штатно застосовуються шестивісні тепловози типу ТЕМ2 та ЧМЕ3. Наразі тривають дослідна експлуатація та збір даних для оцінки паливної економічності модернізованого тепловозу.

Як зазначалося, модернізований тепловоз створений для «середньої» та «важкої» маневрової роботи, що передбачає його переважну експлуатацію з високими тяговими зусиллями. Це обумовило застосування традиційної дизель-генераторної установки та тягового електроприводу з одним електродвигуном. Водночас маневрові тепловози на промислових підприємствах використовуються у різних експлуатаційних режимах. Найпоширенішою ситуацією є тривалі режими роботи, які характеризуються неповним використанням потужності та сили тяги [11, 12]. Для виключення режимів роботи з підвищеною витратою палива доцільним вважається застосування гібридної силової енергетичної установки, у тому числі з використанням водневих технологій [13, 14]. Можливим варіантом є дводизельна силова енергетична установка або повністю акумуляторний локомотив [15, 16]. Опис схемних рішень, які використовуються при створенні подібних силових установок, та підходів до їх оптимізації можна знайти у роботах [13, 15, 17]. Доцільним є застосування електродинамічного гальмування.

Зменшення споживання енергії тяговим електроприводом при роботі з неповною силою тяги можливо досягнути шляхом застосування двох (чи більшої кількості) тягових електродвигунів, навантаження кожного з яких оптимізовано для поточної величини сили тяги [18]. При цьому можливими є такі варіанти:

– електродвигуни приєднані до спільного проміжного редуктора, який з'єднаний з осьовими редукторами колісних пар (рис. 8а) (технічне рішення, застосоване на тепловозах BR203H та LHy-M);

– є два окремі мотор-редуктори, які з'єднані з осьовими редукторами візків та між собою (рис. 8б);
– кожен мотор-редуктор з'єднаний з окремим візком, з'єднання редукторів між собою немає (рис. 8в).

Також можливим є варіант із застосуванням мономоторних візків.

Варто відзначити, що для реалізації роздільного навантаження електродвигунів вони повинні мати індивідуальне живлення. Електродвигуни можуть бути неідентичними один одному.

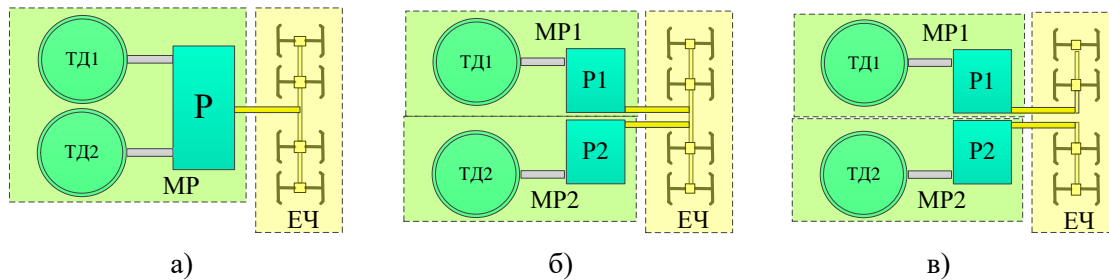


Рис. 8 – Схеми механічної частини багатодвигунного електроприводу з груповим приводом колісних пар: МР, МР1, МР2 – мотор-редуктор, ТД1, ТД2 – тягові електродвигуни; Р, Р1, Р2 – проміжні редуктори, ЕЧ – екіпажна частина тепловозу

Для зменшення енергоспоживання тяговим електроприводом необхідне застосування алгоритмів керування, спрямованих на мінімізацію втрат у його компонентах [18, 19]. Загальному споживанню паливно-енергетичних ресурсів сприяє впровадження електродинамічного гальмування із акумулюванням енергії у бортовому накопичувачі енергії.

Таким чином, застосування тягового електроприводу дозволяє провести модернізацію застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності. Для отримання найбільшого ефекту від модернізації необхідно врахування умов експлуатації тепловозу та впровадження у його тяговій системі рішень, які найбільш відповідають умовам експлуатації.

Висновки

1. Рациональним шляхом оновлення застарілих маневрових тепловозів з гідравлічною передачею потужності є застосування тягового електроприводу при збереженні групового приводу колісних пар. Ключовою перевагою такого підходу є менша вартість електроприводу (а отже – і модернізації в цілому) та можливість стабільної реалізації високих тягових зусиль.

2. Розроблено тяговий електропривод для модернізації застарілих тепловозів з гідравлічною передачею потужності та уперше в Україні проведено модернізацію тепловозу ТГМ6Д із застосуванням розробленого тягового електроприводу.

3. Розрахунково-теоретичні показники модернізованого тепловозу відповідають рівню сучасних маневрових локомотивів. Отримані при експериментальних поїздках дані підтверджують можливість застосування модернізованого чотиривісного тепловозу ТГМ6 №0123 із складами, для водіння яких застосовуються шестивісні тепловози типу ТЕМ2 та ЧМЕЗ.

4. Запропоновано варіант удосконалення розробленого тягового електроприводу шляхом застосування декількох електродвигунів при збереженні групового приводу колісних пар, а також показано доцільність застосування гібридної силової енергетичної установки, впровадженні електродинамічного гальмування та необхідності оптимізації режимів тягової системи при її роботі з неповним навантаженням.

Перелік використаних джерел:

1. A korszerűsített TEM2 és TGM4B típusú mozdonyok bemutatása. URL: http://vasutgepeszet.hu/wp-content/uploads/vasutgepeszet_2017-1_Csetvei_Csuka_Szorath.pdf.
2. Hybrid locomotives overview of construction solutions / M. Konarzewski, T. Niezgod, M. Stankiewicz, P. Szurgott. *Journal of KONES*. 2013. № 20. Pp. 127-134. DOI: <https://doi.org/10.5604/12314005.1135325>.

3. Kolejové pohony a.s. URL: <https://www.kolejovepohony.cz/en/>.
4. Locomotiva hibrid de manevră – premieră mondială. Transformarea locomotivei diesel hidraulică LDH 1250 CP în Locomotiva hibrid LHy-M. URL: <http://www.locomotivahibrid.ro/wp-content/uploads/2017/10/LHy-M- Studiu-de-solutii Etapa-1-1.pdf>.
5. HELMS. Hybrid Electro-Mechanical Shunter. URL: https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrosolution/www/infrastructure/en/railway/as-sets/pdf/TOSHIBA_HELMS_Poster.pdf.
6. Compagnie de Chemins de Fer Départementaux. URL: <https://www.cfd.group/>.
7. František Palík, Petr Lapáček. Vzpomínky konstruktéra lokomotiv Škoda. Brně: CPRESS, 2023. 168 s.
8. Nouvion F.F. Three-Phase Motors in Electric Rail Traction. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1984. Vol. IA-20, № 5. Pp. 1152-1170. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504578>.
9. Рябов Є.С., Єріцян Б.Х., Якунін Д.І., Демидов О.В. Маневровий локомотив з електричною передачею потужності та груповим приводом колісних пар. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей ХХХ міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022*, м. Харків, 19-21 жовтня 2022 р. Харків: НТУ «ХПІ». С. 179.
10. Гетьман Г.К., Голік С.М. Тягові передачі електрорухомого складу: Навчальний посібник. Дніпро: Вид-во ПФ «Стандарт-Сервіс», 2020. 260 с.
11. Маслак Г., Красулін О. Нові енергозберігаючі технології в транспортному обслуговуванні промислових підприємств. *European Science*. 2023. Vol. 3(17-03). Pp. 69-94. DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-17-03-006>.
12. Оновлення тягового рухомого складу промислових підприємств / С.В. Рой, А.В. Качан, А.С. Тихонов, Є.С. Рябов, Б.Х. Єріцян. *Транспорт: наука та практика: збірник наукових праць за матеріалами II-ї Міжнародної науково-практичної конференції*, Київ - Одеса, 25-26 травня 2023 р. Київ: СНУ ім. В. Даля, 2023. С. 169-172.
13. Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive / A. Falendysh, P. Kharlamov, O. Kletska, N. Volodarets. *Transportation Research Procedia*. 2016. Vol. 14. Pp. 665-671. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.325>.
14. Seyam S., Dincer I., Agelin-Chaab M. Development and assessment of a cleaner locomotive powering system with alternative fuels. *Fuel*. 2021. Vol. 296. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120529>.
15. NRE. URL: <https://nre.com/>.
16. Emd® joule battery electric locomotives. URL: <https://www.progressrail.com/en/Segments/RollingStock/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html>.
17. A multi-objective optimal sizing scheme for hybrid traction power supply systems onboard shunting locomotive / H. Pei, L. Diao, Zh. Jin, C. Xu, Y. Zhang, Y. Fan. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Vol. 72. Pp. 399-414. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.023>.
18. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport / I. Riabov, S. Goolak, L. Kondratieva, L. Overianova. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2023. Vol. 42, 101416. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>.
19. Exploitation of Energy Optimal and Near-Optimal Control for Traction Drives with AC Motors / B. Ftorek, J. Šimon, M. Kiselev, V. Vavrůš, J. Vittek. *Symmetry*. 2022. Vol. 14. Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14122613>.

References:

1. A korszerűsített TEM2 és TGM4B típusú mozdonyok bemutatása Available at: http://vasutgepeszet.hu/wp-content/uploads/vasutgepeszet_2017-1_Csetvei_Csuka_Szorath.pdf (accessed 15 March 2023).
2. Konarzewski M., Niezgodna T., Stankiewicz M., Szurgott P. Hybrid locomotives overview of construction solutions. *Journal of KONES*, 2013, vol. 20, pp. 127-134. doi: <https://doi.org/10.5604/12314005.1135325>.
3. Kolejové pohony a.s. Available at: <https://www.kolejovepohony.cz/en/> (accessed 10 February 2023).

4. Locomotiva hibrid de manevră – premieră mondială. Transformarea locomotivei diesel hidraulică LDH 1250 CP în Locomotiva hibrid LHy-M Available at: http://www.locomotivahibrid.ro/wp-content/uploads/2017/10/LHy-M- Studiu-de-solutii_Etapa-1-1.pdf (accessed 08 December 2022).
5. HELMS. Hybrid Electro-Mechanical Shunter Available at: https://www.global.toshiba/content/dam/toshiba/migration/infrasolution/www/infrastructure/en/railway/assets/pdf/TOSHIBA_HELMS_Poster.pdf (accessed 28 November 2022).
6. Compagnie de Chemins de Fer Départementaux Available at: <https://www.cfd.group/> (accessed 13 December 2022).
7. Palík F., Petr Lapáček P. *Vzpomínky konstruktéra lokomotiv Škoda*. Brně: CPRESS, 2023. 168 s. (Czech)
8. Nouvion F.F. Three-Phase Motors in Electric Rail Traction. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1984, vol. IA-20, № 5, pp. 1152-1170. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504578>.
9. Riabov Ye.S., Yeritsian B.Kh., Iakunin D.I., Demydov O.V. Shunting locomotive with electric power transmission and group drive of wheel pairs. *Information technologies: science, engineering, technology, education, health: theses of reports of XX Int. Sci. and Pract. Conf. MicroCAD-2022, Ukraine, Kharkiv, 2022*, pp. 179. (Ukr.)
10. Hetman H.K., Holik S.M. *Traction transmissions of electric rolling stock: Training manual*. Dnipro, Standard-Service Publ., 2020. 260 p. (Ukr.)
11. Maslak H., Krasulin O. New energy-saving technologies in transport service of industrial enterprises. *European Science*, 2023, vol. 3(17-03), pp. 69-94. <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-17-03-006>. (Ukr.)
12. Roi S.V., Kachan A.V., Tykhonov A.S., Riabov Ye.S., Yeritsian B.Kh. Modernization of the traction rolling stock of industrial enterprises. *Transport: Science and Practice: collection of scientific works based on the materials of the II Int. Sci. and Pract. Conf., Kyiv – Odesa, 2023*, pp. 169-172. (Ukr.)
13. Falendysh A., Kharlamov P., Kletska O., Volodarets N. Calculation of the Parameters of Hybrid Shunting Locomotive. *Transportation Research Procedia*, 2016, vol. 14, pp. 665-671. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.325>.
14. Seyam S., Dincer I., Agelin-Chaab M. Development and assessment of a cleaner locomotive powering system with alternative fuels. *Fuel*, 2021, vol. 296, 2021, pp. 1-15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120529>.
15. NRE Available at: <https://nre.com/> (accessed 01 November 2022).
16. Emd® joule battery electric locomotives Available at: <https://www.progressrail.com/en/Segments/RollingStock/Locomotives/FreightLocomotives/EMDJoule.html> (accessed 13 November 2022).
17. Pei H., Diao L., Jin Z., Xu C., Zhang Y., Fan Y. A multi-objective optimal sizing scheme for hybrid traction power supply systems onboard shunting locomotive. *Alexandria Engineering Journal*, 2023, vol. 72, pp. 399-414. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.04.023>.
18. Riabov I., Goolak S., Kondratieva L., Overianova L. Increasing the energy efficiency of the multi-motor traction electric drive of an electric locomotive for railway quarry transport. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2023, vol. 42, 101416, 2023. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101416>.
19. Ftorek B., Šimon J., Kiselev M., Vavrůš V., Vittek J. Exploitation of Energy Optimal and Near-Optimal Control for Traction Drives with AC Motors. *Symmetry*, 2022, vol. 14, pp. 1-14. doi: <https://doi.org/10.3390/sym14122613>.

Рецензент: С.Г. Буряковський
д-р техн. наук, професор, НДКТІ «Молнія» НТУ «ХПІ»

Стаття надійшла 10.04.2023
Стаття прийнята 28.05.2023

УДК 621.316.716.2

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288179

© Постіл А.О.¹, Бялобржеський О.В.²

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ
АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА З ФАЗНИМ РОТОРОМ
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ГЕНЕРАЦІЇ
З НЕСИМЕТРІЄЮ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ МАШИНИ**

За результатами аналізу систем з використанням генераторів подвійного живлення виявлено різноманіття моделей, більшість з яких побудовані у α - β та d - q системах координат. Моделі та системи керування виконані з урахуванням несиметрії напруги електричної мережі. Синтезовано модель трифазного генератора подвійного живлення з можливістю введення несиметрії електричних параметрів статора та ротора. Проведено моделювання режимів із симетричними та несиметричними параметрами обмоток машини. Несиметрію реалізовано шляхом зміни індуктивності та опору однієї з фаз статора та/або ротора. В обох випадках отримано необхідний режим генерації як за частотою напруги, так і за її діючим значенням. У разі несиметричних параметрів обмоток відмічена несиметрія генерованої напруги та виникнення пульсації електромагнітного моменту з частотою 100 Гц. Використовуючи підхід до аналізу електричної потужності, зумовленої напругою та струмом прямої, зворотної та нульової послідовностей, за результатами моделювання відмічено, що у разі несиметрії разом із виникненням складових потужності зворотної послідовності відбуваються зміни у складових потужності прямої послідовності. Зазначені складові потужності зростають із збільшенням несиметрії параметрів машини.

Ключові слова: асинхронний генератор з фазним ротором, несиметрія електричних параметрів, генерація, активна та реактивна потужності, пряма, зворотня та нульова послідовності.

A.O. Postil, O.V. Bialobrzheskyi. Double feed inductor generator mathematical model for studying generation modes with unbalance of electrical machine parameters. The analysis of systems using dual power generators revealed a variety of models, most of which are built in the α - β and d - q coordinate systems. Models and control systems are made taking into account the unbalance of the voltage of the electrical network. A model of a three-phase dual-supply generator with the possibility of introducing asymmetry of the electrical parameters of the stator and rotor has been synthesized. Modes with symmetric and asymmetric parameters of the machine windings were modeled. Unbalance is implemented by changing the inductance and resistance of one of the stators and/or rotor phases. In both cases, the required generation mode was obtained both in terms of voltage frequency and its effective value. In the case of unbalance parameters of the windings, asymmetry of the generated voltage and the occurrence of pulsations of the electromagnetic moment with a frequency of 100 Hz were noted. Using the approach to the analysis of the electric power caused by the voltage and current of positive, negative and zero sequences, according to the simulation results, it was noted that in the case of asymmetry, along with the appearance of the components of the negative sequence power, changes in the components of the positive sequence power occur. The indicated power components increase with increasing asymmetry of machine parameters.

¹ аспірант, «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, ORCID: 0000-0001-9411-7047, arturpostil9@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, «Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського», м. Кременчук, ORCID: 0000-0003-1669-4580, seemal@kdu.edu.ua

Keywords: *double feed inductor generator, electrical parameters unbalance, generation, active and reactive power, positive, negative and zero sequences.*

Постановка проблеми. Розповсюдження альтернативних джерел енергії разом із рішенням задач формування додаткових розосереджених джерел ставить ряд інших задач, які виникають. По-перше, це баланс електричної потужності, по-друге, це стабільність напруги за частотою та діючим значенням, по-третє, це якість електричної енергії в умовах несиметрії та несинусоїдальності струму та/або напруги.

У разі використання вітроенергетичних установок одним з критичних питань оптимальної генерації електричної енергії є дотримання частоти електромагнітного поля статора та підтримка необхідного електромагнітного моменту в умовах нестабільного вітрового потоку. Одним з варіантів вирішення цього завдання є використання асинхронних генераторів з фазним ротором. В такому випадку забезпечення якості електричної енергії залишається пов'язаним із режимами електричної машини – генератора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Покращення стратегії управління асинхронним генератором з подвійним живленням в умовах незбалансованої напруги мережі є актуальним предметом дослідження. Стратегія, запропонована в [1], застосовувалася за умов синхронізації і у умовах підключення до мережі. Процес синхронізації здійснюється шляхом управління компонентами прямої та зворотної послідовності напруги по осі статора q , щоб вони слідували за напругою по осі q напруги мережі. Це реалізується шляхом управління компонентами прямої та зворотної послідовності струму осі d ротора. Формуючи струм осі d ротора, формують ЕРС статора, яка відповідає напрузі мережі. Пропонована стратегія управління фокусується на регулюванні середньої активної та реактивної потужності статора шляхом управління позитивними складовими струмів по осі q і d відповідно. Також реалізується мінімізація пульсацій крутного моменту генератора шляхом керування компонентами зворотної послідовності ротора.

Модульна стратегія управління системою асинхронного генератора з подвійним живленням, включаючи перетворювач з боку мережі та перетворювач з боку ротора, при несиметричній та гармонійній напрузі мережі представлена у статті [2]. У запропонованій стратегії управління можна уникнути процесу декомпозиції послідовності та складного обчислення управляючого сигналу. Авторами сформовано два напрями керування: плавна подача активної та реактивної потужності в електромережу; формування збалансованого та синусоїдального струму, що вводиться в електричну мережу. За рахунок керування роторним перетворювачем формується третя гармоніка струму ротора, яка зменшує пульсації електромагнітного моменту.

Використовують стратегію прямого управління потужністю в режимі ковзання для асинхронного генератора з подвійним живленням як в збалансованих, так і в незбалансованих умовах мережі з використанням розширеної активної потужності [3]. Пропонується розширена активна потужність, яка ефективна як у збалансованих, так і в незбалансованих умовах мережі із простою стратегією управління. Зазначена стратегія дозволяє отримувати синусоїдальні струми статора та стримувати пульсації електромагнітного моменту в умовах незбалансованої мережі без необхідності процесу декомпозиції та контуру фазового автопідстроювання частоти. Подібні рішення застосовано в роботі [4], де також використане спільне управління перетворювачем з боку ротора та перетворювачем з боку мережі системи генерації асинхронного генератора з подвійним живленням в умовах небалансу мережі. Перетворювач з боку ротора керується для зменшення пульсацій крутного моменту. Визначено напрям управління мережевим перетворювачем, тобто збалансовані повні струми і постійна повна активна або реактивна потужність, щоб зменшити вплив напруги зворотної послідовності на продуктивність системи.

Робота системи перетворення енергії вітру на основі асинхронного генератора з подвійним живленням за дослідженням [5] виявилася надзвичайно чутливою до невірніоважених напруг мережі. Авторами представлена вдосконалена стратегія управління, що працює при незбалансованих напругах мережі, з використанням змішаного узагальненого інтегратора. Він являє собою гібридну форму узагальнених інтеграторів другого та третього порядку та використовується для розрахунку позитивної та негативної послідовності. Стратегія розширеного управління на основі такого інтегратора використовує управління по смузі гістерезису струмами ротора та струмами мережі для створення послідовностей перемикання для перетворювача з боку ротора і

перетворювача з боку мережі відповідно. Автори відзначають покращення синхронізації мережі в системі з генератором за наявності небалансу напруги живлення. Узгоджена схема прямого управління потужністю для перетворювача з боку ротора [6] та перетворювача з боку мережі асинхронного генератора з подвійним живленням за умов незбалансованої напруги мережі. Для усунення взаємодій зв'язку між контуром фазового автопідстроювання частоти та локальною незбалансованою мережею використовується віртуальний фазовий кут замість фактичного. Під час дисбалансу мережі перетворювач ротора керується для зменшення пульсацій крутного моменту. Односторонній резонансний регулятор із частотною розв'язкою між сигналами прямої та зворотної послідовності однієї й тієї ж частоти використовується у узгодженій схемі прямого керування потужністю, щоб уникнути складних розрахунків компонентів компенсації потужності. Автори досліджують межі напруги у ланці постійного струму, коливання потужності постійного струму конденсатора, вплив відхилень частоти і мережеву синхронізацію запропонованої стратегії.

В роботі [7] пропонують гнучку стратегію компенсації для паралельно з'єднаних асинхронних генераторів з подвійним живленням при підключенні до несиметричної слабкої мережі. Пропонована стратегія має дві основні переваги: коефіцієнт несиметрії напруги в точці загального зв'язку можна безперервно контролювати, таким чином, може бути досягнутий гнучкий компроміс між балансним вихідним струмом генератора і збалансованою напругою. При цьому зворотна послідовність струму, яка необхідна для компенсації, може бути належним чином розподілена між паралельними генераторами та їх перетворювачами з боку мережі відповідно до їх відповідних умов роботи без необхідності зв'язку в реальному часі. Проаналізовано продуктивність та стійкість запропонованої стратегії.

Максимальний відбір потужності та постійне вироблення енергії плавним і безперервним чином є складними завданнями управління для надійної роботи генератора подвійного живлення при провалах напруги в мережі через сильні пульсації потужності та крутного моменту [8]. Суть роботи полягає в тому, щоб обчислити кутову частоту потоку статора для точного еталонного вироблення електроенергії та управління генератором, схильним до асиметрії напруги мережі. Кутова частота потоку статора розраховується за компонентами напруги та струму статора у стаціонарній системі відліку прямої послідовності α - β без необхідності використання автоналаштування частоти та диференціювання вектора напруги статора. Обчислений сигнал частоти магнітного потоку статора використовується для розрахунку швидкості обертання ротора та вироблення еталонної потужності для отримання максимальної потужності генератора.

Щоб безперешкодно підключати до постійно обурених мереж вітряні турбіни на основі генераторів подвійного живлення, потрібно точно синхронізувати напругу, індуковану на їхньому статорі, з напругою мережі [9]. З метою вирішення задачі синхронізації генераторів з одночасно незбалансованими і гармонійно спотвореними мережами пропонується алгоритм керування ковзним режимом без фазового автопідстроювання частоти та природно без вібрацій. Автори розробили рішення на основі стаціонарної системи відліку, що дозволяє уникнути розкладання на позитивні та негативні послідовності та гармонійні складові. У статті [10] представлена еталонна схема генерації струму для покращення динамічних характеристик асинхронного генератора з подвійним живленням, який підключений до несиметричної напруги мережі. Коливання потужності і крутного моменту, викликані дисбалансом напруги в мережі, мінімізуються за допомогою додаткових компенсаційних складових в опорних струмах. Основна увага приділяється оцінці опорних струмів та реалізації керування без необхідності подвійного векторного керування. Управління активною та реактивною потужністю реалізовано у позитивній системі відліку d - q з використанням векторного управління, орієнтованого на потік статора. Перетворювач на стороні ротора управляється для забезпечення ефективного зниження коливань крутного моменту, активної і реактивної потужності. Коливання напруги у ланці постійного струму зведено до мінімуму, а коефіцієнт потужності з боку мережі підтримується рівним одиниці за допомогою перетворювача з боку мережі. На відміну від раніше описаних методів, запропонована схема дозволяє ефективно зменшити коливання моменту, що крутить, активної і реактивної потужності, а також напруги у ланці постійного струму.

Але в усіх перелічених випадках автори покладають, що електрична машина симетрична як у колах статора, так і у колах ротора. В деяких випадках виникає несиметрія електричних

параметрів ротора та/або статора, що викликає необхідність дослідження впливу несиметрії електричних параметрів машини на режим генерації.

Мета статті – розробка моделі асинхронного генератора з фазним ротором для дослідження режимів генерації із несиметрією електричних параметрів машини.

Виклад основного матеріалу. Залежно від задач дослідження використовується декілька способів представлення електромеханічних процесів асинхронного генератора. Відносно простий та досить адекватний, з позиції авторів [11], є спосіб, в якому покладають вектор потоку взаємодукації і відповідний йому вектор потокозчеплення колінеарними вектору струму намагнічування; самоіндукція розсіювання обмоток статора і ротора вважається незмінною; розподіл потоку намагнічування рівномірний; несиметрія має місце виключно у зовнішніх колах. Поширюючи такий спосіб на асинхронний генератор з фазним ротором, рівняння електричного балансу для статора:

$$\frac{d\psi_A}{dt} = -i_A R_1 + u_A; \quad \frac{d\psi_B}{dt} = -i_B R_1 + u_B; \quad \frac{d\psi_C}{dt} = -i_C R_1 + u_C, \quad (1)$$

де ψ_A, ψ_B, ψ_C – потокозчеплення фаз статора; i_A, i_B, i_C – струм фаз статора; u_A, u_B, u_C – напруга фаз статора; R_1 – опір статора. Рівнянь електричного балансу для ротора:

$$\frac{d\psi_a}{dt} = -i_a R_2 - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} (\psi_b - \psi_c) + u_a; \quad \frac{d\psi_b}{dt} = -i_b R_2 - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} (\psi_c - \psi_a) + u_b; \quad \frac{d\psi_c}{dt} = -i_c R_2 - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} (\psi_a - \psi_b) + u_c, \quad (2)$$

де ψ_a, ψ_b, ψ_c – потокозчеплення фаз ротора; i_a, i_b, i_c – струм фаз ротора; u_a, u_b, u_c – напруга фаз ротора; R_2 – опір ротора, ω – частота обертання ротора; p_n – кількість пар полюсів.

Відповідно струми статора та ротора визначають з урахуванням само- та взаємодукації наступним чином:

$$i_{A,B,C} = c_1 \psi_{A,B,C} - c_2 \psi_{a,b,c}; \quad i_{a,b,c} = -c_2 \psi_{A,B,C} + c_3 \psi_{a,b,c}, \quad (3)$$

де $c_1 = (L_1 - L_{ек})/L_1^2$; $c_2 = L_{ек}/L_1 L_2$; $c_3 = (L_2 - L_{ек})/L_2^2$; $L_{ек} = L_1 L_2 L_{\mu} / (L_1 L_{\mu} + L_2 L_{\mu} + L_1 L_2)$.

Виконуючи підставлення, отримують рівняння для потокозчеплення статора та ротора в наступному вигляді:

$$\frac{d\psi_A}{dt} = -c_1 R_1 \psi_A + c_2 R_1 \psi_a + u_A; \quad \frac{d\psi_B}{dt} = -c_1 R_1 \psi_B + c_2 R_1 \psi_b + u_B; \quad \frac{d\psi_C}{dt} = -c_1 R_1 \psi_C + c_2 R_1 \psi_c + u_C; \quad (4)$$

$$\frac{d\psi_a}{dt} = -c_2 R_2 \psi_A - c_3 R_2 \psi_a - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_b + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_c + u_a; \quad \frac{d\psi_b}{dt} = -c_2 R_2 \psi_B - c_3 R_2 \psi_b - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_c + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_a + u_b; \quad (5)$$

$$\frac{d\psi_c}{dt} = -c_2 R_2 \psi_C - c_3 R_2 \psi_c - \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_a + \frac{\omega p_n}{\sqrt{3}} \psi_b + u_c.$$

Відповідно вводячи заміну $L_1 \rightarrow L_A, L_B, L_C$, $L_2 \rightarrow L_a, L_b, L_c$ та $R_1 \rightarrow R_A, R_B, R_C$, $R_2 \rightarrow R_a, R_b, R_c$, можливо отримати рівняння для несиметричних параметрів машини, але дані рівняння не враховують взаємну несиметричну індукцію між фазами. Тому більш раціональним є використання способу моделювання асинхронного генератора з фазним ротором, що представлений у [12]. В такому рівняння електричного балансу статора та ротора записують наступним чином:

$$u_A = -i_A R_A + \frac{d\psi_A}{dt}; \quad u_B = -i_B R_B + \frac{d\psi_B}{dt}; \quad u_C = -i_C R_C + \frac{d\psi_C}{dt}; \quad (6)$$

$$u_a = i_a R_a + \frac{d\psi_a}{dt}; \quad u_b = i_b R_b + \frac{d\psi_b}{dt}; \quad u_c = i_c R_c + \frac{d\psi_c}{dt}. \quad (7)$$

Але потокозчеплення в такому випадку розглядаються в більш складній формі з урахуванням кута положення ротора:

$$\psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Aa} i_a \cos \gamma + M_{Ab} i_b \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + M_{Ac} i_c \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (8)$$

$$\psi_B = L_B i_B + M_{BA} i_A + M_{BC} i_C + M_{Ba} i_a \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + M_{Bb} i_b \cos \gamma + M_{Bc} i_c \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right); \quad (9)$$

$$\psi_C = L_C i_C + M_{CB} i_B + M_{CA} i_A + M_{Ca} i_a \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + M_{Cb} i_b \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + M_{Cc} i_c \cos \gamma; \quad (10)$$

$$\psi_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + M_{aA} i_A \cos \gamma + M_{aB} i_B \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + M_{aC} i_C \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right); \quad (11)$$

$$\psi_b = L_b i_b + M_{ba} i_a + M_{bc} i_c + M_{bA} i_A \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + M_{bB} i_B \cos \gamma + M_{bC} i_C \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (12)$$

$$\psi_c = L_c i_c + M_{cb} i_b + M_{ca} i_a + M_{cA} i_A \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) + M_{cB} i_B \cos \left(\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) + M_{cC} i_C \cos \gamma, \quad (13)$$

де γ – кут положення ротора відносно статора; $L_{PH} = L_{\sigma PH} + L_{\mu}$ – індуктивність фази статора; $L_{\sigma PH}$ – індуктивність, зумовлена потоком розсіювання статора; L_{μ} – індуктивність, зумовлена потоком намагнічування; $M_{PHPH} = M_{phph} = -0.5L_{\mu}$ – взаємна індуктивність між фазами статора, ротора; $M_{PHph} = M_{phPH} = L_{\mu}$ – взаємна індуктивність між фазами ротора та статора.

В такому випадку електромагнітний момент електричної машини визначається наступним чином:

$$M_{em} = -\frac{1}{2} L_{\mu} p_n \left[i_A (i_a - 0.5i_b - 0.5i_c) + i_B (i_b - 0.5i_a - 0.5i_c) + i_C (i_c - 0.5i_a - 0.5i_b) \right] \sin \gamma + \\ -\frac{\sqrt{3}}{4} L_{\mu} p_n \left[i_A (i_b - i_c) + i_B (i_c - i_a) + i_C (i_a - i_b) \right] \cos \gamma. \quad (14)$$

Електромагнітний момент та зовнішній механічний момент M_m пов'язані з частотою обертання ротора відомим чином:

$$J \frac{d\omega}{dt} + M_{em} = M_m, \quad (15)$$

де J – момент інерції обертових частин.

Кут положення ротора відносно статора визначається інтегруванням частоти обертання з урахуванням кількості пар полюсів p_n :

$$\gamma = p_n \int \omega dt. \quad (16)$$

Зважаючи на велику кількість рівнянь, таку модель раціонально представити декількома підсистемами. Визначимо як вхідні змінні частоту обертання ротора та напругу ротора, вихідними змінними є напруга статора, струм ротора та електромагнітний момент. Збудуючою дією будемо покладати струм статора. Для підсистеми статора будемо вважати вхідними параметрами струм ротора, кут положення ротора та струм навантаження (струм статора). Зважаючи на велику кількість рівнянь, раціонально скористатись матричною формою. Попередньо введемо відповідні матриці параметрів режиму та параметрів машини:

- струм статора він же струм навантаження асинхронного генератора:

$$\mathbf{i}_s = [i_A \quad i_B \quad i_C]^T = \mathbf{i}_{ld}; \quad (17)$$

- струм ротора:

$$\mathbf{i}_r = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T; \quad (18)$$

- напруга статора:

$$\mathbf{u}_s = [u_A \quad u_B \quad u_C]^T; \quad (19)$$

- напруга ротора:

$$\mathbf{u}_r = [u_a \quad u_b \quad u_c]^T; \quad (20)$$

- опір статора:

$$\mathbf{R}_s = \begin{bmatrix} R_A & 0 & 0 \\ 0 & R_B & 0 \\ 0 & 0 & R_C \end{bmatrix}; \quad (21)$$

- опір ротора:

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}; \quad (22)$$

- індуктивність статора:

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} L_{\sigma A} + L_{\mu} & -0.5L_{\mu} & -0.5L_{\mu} \\ -0.5L_{\mu} & L_{\sigma B} + L_{\mu} & -0.5L_{\mu} \\ -0.5L_{\mu} & -0.5L_{\mu} & L_{\sigma C} + L_{\mu} \end{bmatrix}; \quad (23)$$

- індуктивність ротора:

$$\mathbf{L}_r = \begin{bmatrix} L_{\sigma a} + L_{\mu} & -0.5L_{\mu} & -0.5L_{\mu} \\ -0.5L_{\mu} & L_{\sigma b} + L_{\mu} & -0.5L_{\mu} \\ -0.5L_{\mu} & -0.5L_{\mu} & L_{\sigma c} + L_{\mu} \end{bmatrix}; \quad (24)$$

- взаємна індуктивність ротора та статора:

$$\mathbf{M}_{rs} = L_{\mu} \begin{bmatrix} \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma & \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \gamma \end{bmatrix}; \quad (25)$$

- взаємна індуктивність статора та ротора:

$$\mathbf{M}_{sr} = \mathbf{M}_{rs}^T. \quad (26)$$

Відповідно напруга статора:

$$\mathbf{u}_s = \frac{d}{dt} \mathbf{M}_{rs} \mathbf{i}_r - \frac{d}{dt} \mathbf{L}_s \mathbf{i}_s - \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s. \quad (27)$$

Струм ротора:

$$\mathbf{i}_r = \mathbf{L}_r^{-1} \left[\int \mathbf{u}_r dt - \int \mathbf{R}_r \mathbf{i}_r dt - \mathbf{M}_{sr} \mathbf{i}_s \right]. \quad (28)$$

Таким чином загальну структуру моделі доцільно розглядати за схемою, наведеною на рис. 1а. Відповідно до формул (14-18) реалізовано механічну частину (*Mechanical part*) машини, наведену на рисунку 1б. Статорну частину (*Stator part*) моделі (рис. 2а) реалізовано за формулами (16-19, 21, 23, 25), роторну частину (*Rotor part*) моделі (рис. 2б) реалізовано за формулами (17, 18, 20, 22, 24, 26).

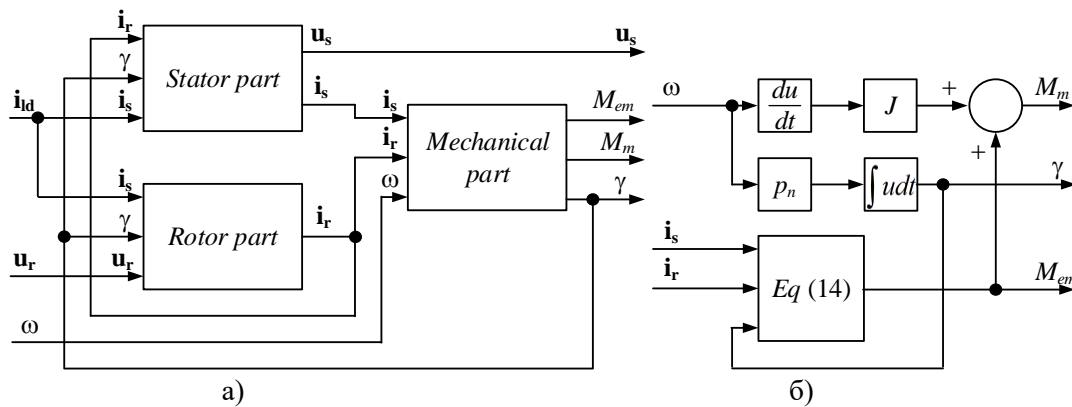


Рис. 1 – Схема моделі: а – загальна; б – механічна частини

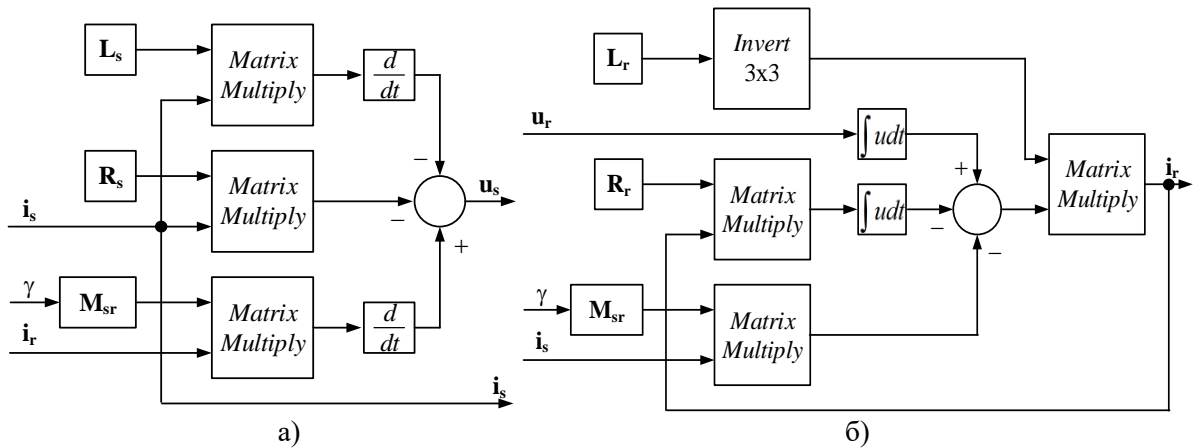


Рис. 2 – Схема моделі: а – статорна частина; б – роторна частина

Зазначену модель синтезовано в пакеті візуального програмування. Використані наступні параметри машини: $L_{\mu} = 0.1 \text{ Гн}$; $L_{\sigma s} = 2 \text{ мГн}$; $L_{\sigma r} = 0.7 \text{ мГн}$; $R_s = 0.435 \text{ Ом}$; $R_r = 0.816 \text{ Ом}$; $p_n = 4$; $J = 0.089 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. За умови дії наступних параметрів режиму: $U_{r,DC} = 5 \text{ В}$; $\omega = 79 \text{ с}^{-1}$ та підтримується незмінною. До статора машини підключене навантаження потужністю $P_{ld} = 4 \text{ кВт}$; $Q_{ld} = 2 \text{ кВАр}$. Проведено дослідження часових діаграм струму, напруги та електромагнітного моменту для двох режимів із симетричними параметрами обмоток (рис. 3а) та несиметричними (рис. 3б). Несиметричний режим реалізовано зміною на -5% параметрів однієї з обмоток статора та ротора. В обох випадках відбувається стала генерація, але у другому випадку, за умови наявності несиметрії параметрів обмоток, наявна несиметрія напруги та струму.

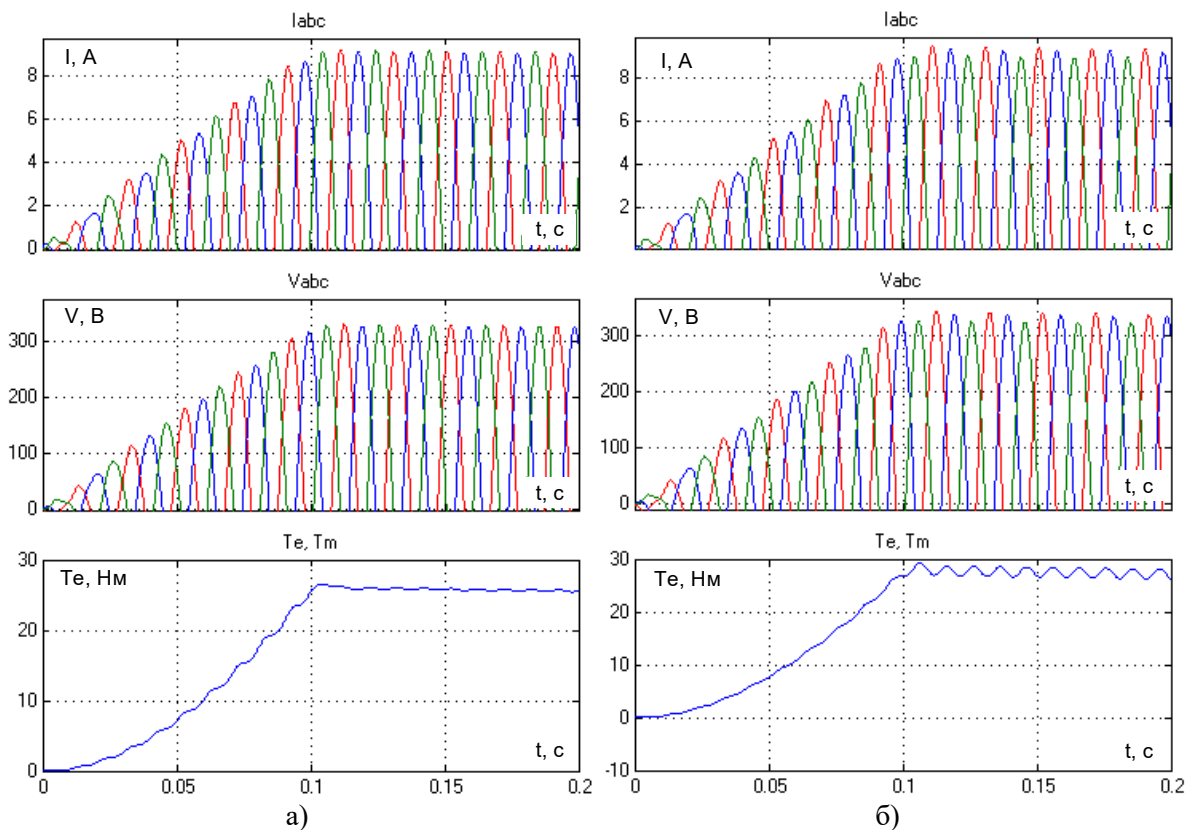


Рис. 3 – Часові діаграми струму, напруги навантаження та електромагнітного моменту: а – симетричний режим; б – несиметричний режим

Задля розширення спектру дослідження розглянемо активні та реактивні потужності прямої та зворотної послідовностей. Розглянемо несиметричну систему, в якій протікає синусоїдальний струм та діє синусоїдальна напруга, які представлені нульовою (0), прямою (+) та зворотною (-) послідовностями [13]:

$$\begin{cases} u_A = \sqrt{2}U_1^0 \sin(\omega t + \psi_{u1^0}) + \sqrt{2}U_1^+ \sin(\omega t + \psi_{u1^+}) + \sqrt{2}U_1^- \sin(\omega t + \psi_{u1^-}); \\ u_B = \sqrt{2}U_1^0 \sin(\omega t + \psi_{u1^0}) + \sqrt{2}U_1^+ \sin(\omega t + \psi_{u1^+} - 2\pi/3) + \sqrt{2}U_1^- \sin(\omega t + \psi_{u1^-} - 4\pi/3); \\ u_C = \sqrt{2}U_1^0 \sin(\omega t + \psi_{u1^0}) + \sqrt{2}U_1^+ \sin(\omega t + \psi_{u1^+} - 4\pi/3) + \sqrt{2}U_1^- \sin(\omega t + \psi_{u1^-} - 2\pi/3); \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I_1^0 \sin(\omega t + \psi_{i1^0}) + \sqrt{2}I_1^+ \sin(\omega t + \psi_{i1^+}) + \sqrt{2}I_1^- \sin(\omega t + \psi_{i1^-}); \\ i_B = \sqrt{2}I_1^0 \sin(\omega t + \psi_{i1^0}) + \sqrt{2}I_1^+ \sin(\omega t + \psi_{i1^+} - 2\pi/3) + \sqrt{2}I_1^- \sin(\omega t + \psi_{i1^-} - 4\pi/3); \\ i_C = \sqrt{2}I_1^0 \sin(\omega t + \psi_{i1^0}) + \sqrt{2}I_1^+ \sin(\omega t + \psi_{i1^+} - 4\pi/3) + \sqrt{2}I_1^- \sin(\omega t + \psi_{i1^-} - 2\pi/3), \end{cases} \quad (30)$$

де $U_1^0, U_1^+, U_1^-, I_1^0, I_1^+, I_1^-$ – діючі значення напруги та струму нульової, прямої та зворотної послідовностей, відповідно; $\psi_{u1^0}, \psi_{u1^+}, \psi_{u1^-}, \psi_{i1^0}, \psi_{i1^+}, \psi_{i1^-}$ – фазовий зсув напруги та струму нульової, прямої та зворотної послідовностей, відповідно; ω – кутова частота; t – час.

Потужність такої трифазної системи має загальний вигляд відповідно до [14]:

$$P_{3ph} = P_{a,1-1} \cos(0) + P_{b,1-1} \sin(0) + P_{a,1+1} \cos(2\omega t) + P_{b,1+1} \sin(2\omega t). \quad (31)$$

Амплітуди ортогональних складових потужностей нульової частоти трифазної системи:

$$\begin{aligned} P_{a,1-1} &= 3U_1^0 I_1^0 \cos(\psi_{u1^0} - \psi_{i1^0}) + 3U_1^+ I_1^+ \cos(\psi_{u1^+} - \psi_{i1^+}) + \\ &+ 3U_1^- I_1^- \cos(\psi_{u1^-} - \psi_{i1^-}) = P_{a,1-1}^{00} + P_{a,1-1}^{++} + P_{a,1-1}^{--} = P_{3ph} \end{aligned} \quad (32)$$

- активна потужність трифазної несиметричної системи, яка складається з активних потужностей відповідних послідовностей;

$$\begin{aligned} P_{b,1-1} &= -3U_1^0 I_1^0 \sin(\psi_{u1^0} - \psi_{i1^0}) - 3U_1^+ I_1^+ \sin(\psi_{u1^+} - \psi_{i1^+}) - \\ &- 3U_1^- I_1^- \sin(\psi_{u1^-} - \psi_{i1^-}) = P_{b,1-1}^{00} + P_{b,1-1}^{++} + P_{b,1-1}^{--} = Q_{3ph} \end{aligned} \quad (33)$$

- реактивна потужність трифазної несиметричної системи, яка складається з реактивних потужностей відповідних послідовностей.

Амплітуди ортогональних складових потужностей подвоєної частоти трифазної системи:

$$\begin{aligned} P_{a,1+1} &= -3U_1^0 I_1^0 \cos(\psi_{u1^0} + \psi_{i1^0}) - 3U_1^+ I_1^+ \cos(\psi_{u1^+} + \psi_{i1^+}) - \\ &- 3U_1^- I_1^- \cos(\psi_{u1^-} + \psi_{i1^-}) = P_{a,1+1}^{00} + P_{a,1+1}^{++} + P_{a,1+1}^{--} \end{aligned} \quad (34)$$

- амплітуда косинусної компоненти осцилюючої складової трифазної системи;

$$\begin{aligned} P_{b,1+1} &= 3U_1^0 I_1^0 \sin(\psi_{u1^0} + \psi_{i1^0}) + 3U_1^+ I_1^+ \sin(\psi_{u1^+} + \psi_{i1^+}) + \\ &+ 3U_1^- I_1^- \sin(\psi_{u1^-} + \psi_{i1^-}) = P_{b,1+1}^{00} + P_{b,1+1}^{++} + P_{b,1+1}^{--} \end{aligned} \quad (35)$$

- амплітуда синусної компоненти осцилюючої складової трифазної системи.

Тобто в симетричній системі ортогональні складові подвоєної частоти відсутні. Нульову послідовність до уваги не приймаємо, бо генератор не має нульового виводу, тому генерувати нульову послідовність не може. Проведемо дослідження для чотирьох режимів: симетричного, несиметричного з несиметрією статора; несиметричного з несиметрією ротора; несиметричного з несиметрією статора та ротора.

Зважаючи на те, що за умови несиметрії в сумарній потужності виникають коливання подвоєної частоти [15] (в даному випадку $100\Gamma\upsilon$), визначимо відносне значення коливань електромагнітного моменту відносно його постійної складової таким чином:

$$M_{100/DC} = \frac{M_{100}}{M_{DC}} 100\%, \quad (36)$$

де M_{DC} – постійна складова електромагнітного моменту; M_{100} – складова моменту пульсуюча з частотою $100\Gamma\upsilon$.

Узагальнені результати дослідження зведені у таблицю. За умови несиметрії параметрів обмотки спостерігається виникнення потужностей зворотної послідовності, але значення цих

потужностей невеликі. У разі несиметрії параметрів статора це викликає зменшення потужностей прямої послідовності. При цьому спостерігається найбільше значення змінної складової електромагнітного моменту $M_{100/DC} = 3.3\%$. За умови несиметрії параметрів обмоток ротора спостерігаються найбільші значення активної та реактивної потужностей прямої послідовності. Несиметрія параметрів обмотки ротора і статора призводить до найсуттєвішої несиметрії напруг та зростання складових потужностей зворотної послідовності.

Таблиця

Показники режиму роботи асинхронного генератора з фазним ротором.

Режим	U_A, B	U_B, B	U_C, B	$P_{a.1-1}^{++} = P^+, Bm$	$P_{a.1-1}^{--} = P^-, Bm$	$P_{b.1-1}^{++} = Q^+, BAp$	$P_{b.1-1}^{--} = Q^-, BAp$	$M_{100/DC}, \%$
сим.	231,1	231,5	229,9	3966	0	1968	0	0,5
несим. стат.	231,1	234,1	226,5	3955	1,4	1963	0,4	3,3
несим. рот.	239,4	235,4	230,4	4109	2,23	2039	0,7	0,5
несим. стат.рот.	239,4	237,7	226,8	4094	4,6	2031	1,68	3,2

Висновки

1. Розроблено структуру динамічної моделі асинхронного генератора з фазним ротором в трифазній системі координат, яка передбачає потокозчеплення обмоток через потоки розсіювання, потоки обмоток статора та потоки обмоток статора та ротора. Взаєміндукція статора та ротора враховує кут положення ротора. Розроблена структура реалізована в матричній формі та дозволяє проводити дослідження в тому числі режимів з несиметрією електричних параметрів машини.

2. Проведено моделювання режимів із симетричними та несиметричними параметрами обмоток машини. Несиметрію реалізовано шляхом зміни індуктивності та опору однієї з фаз статора та/або ротора. В обох випадках отримано необхідний режим генерації як за частотою напруги, так і за її діючим значенням. У разі несиметричних параметрів обмоток відмічено несиметрію генерованої напруги та виникнення пульсацій електромагнітного моменту з частотою 100 Гц.

3. Використовуючи підхід до аналізу електричної потужності, зумовленої напругою та струмом прямої, зворотної та нульової послідовностей, за результатами моделювання відмічено, що у разі несиметрії разом із виникненням складових потужності зворотної послідовності відбуваються зміни у складових потужності прямої послідовності. Зазначені складові потужності зростають із збільшенням несиметрії параметрів машини.

Перелік використаних джерел:

1. Eltamaly A.M., Al-Saud M.S., Abo-Khalil A.G. Dynamic Control of a DFIG Wind Power Generation System to Mitigate Unbalanced Grid Voltage. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 39091-39103. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976195>.
2. Song Y., Nian H. Modularized Control Strategy and Performance Analysis of DFIG System Under Unbalanced and Harmonic Grid Voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2015. Vol. 30, № 9. Pp. 4831-4842. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2366494>.
3. A Sliding-Mode Direct Power Control Strategy for DFIG Under Both Balanced and Unbalanced Grid Conditions Using Extended Active Power / D. Sun, X. Wang, H. Nian, Z.Q. Zhu. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. Vol. 33, № 2. Pp. 1313-1322. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2686980>.
4. Cheng P., Nian H. Collaborative Control of DFIG System During Network Unbalance Using Reduced-Order Generalized Integrators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2015. Vol. 30, № 2. Pp. 453-464. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2363671>.
5. Das S., Singh B. Enhanced Control of DFIG Based Wind Energy Conversion System Under

- Unbalanced Grid Voltages Using Mixed Generalized Integrator. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*. 2022. Vol. 3, № 2. Pp. 308-320. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTIE.2022.3143821>.
6. Nian H., Cheng P., Zhu Z.Q. Coordinated Direct Power Control of DFIG System Without Phase-Locked Loop Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2016. Vol. 31, № 4. Pp. 2905-2918. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2453127>.
 7. Flexible PCC Voltage Unbalance Compensation Strategy for Autonomous Operation of Parallel DFIGs / T. Wang, H. Nian, Z.Q. Zhu, H. Huang, X. Huang. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2017. Vol. 53, № 5. Pp. 4807-4820. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2696491>.
 8. An Improved Angular Stator Flux Frequency Computation Method for Robust MPPT Operation of DFIG Under Unbalanced Grid Voltage / M.A.A. Rani, M. Chakkarapani, C. Nagamani, G.S. Ilango. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2023. Vol. 59, № 1. Pp. 1162-1174. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3211912>.
 9. Sliding-Mode Control Algorithm for DFIG Synchronization to Unbalanced and Harmonically Distorted Grids / A. Susperregui, M.I. Martinez, G. Tapia-Otaegui, A. Etxeberria. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2022. Vol. 13, № 3. Pp. 1566-1579. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3166217>.
 10. An Effective Reference Generation Scheme for DFIG With Unbalanced Grid Voltage / M.A. Asha Rani, C. Nagamani, G. Saravana Ilango, A. Karthikeyan. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2014. Vol. 5, № 3. Pp. 1010-1018. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2322672>.
 11. Мазуренко Л.І., Романенко В.І. Математична модель асинхронного генератора з вентильним збудженням з використанням методу припасовування. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 4. С. 19-24.
 12. Model of the induction machine including saturation / J.M. Aller, D. Delgado, A. Bueno, J.C. Viola, J.A. Restrepo. *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France. 2013. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631883>.
 13. Bialobrzheskyi O.V., Vlasenko R.V. Interrelation of a clarke and fortescue transformation for the three-phase asymmetrical electrical network. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. № 5. Pp. 67-74.
 14. Bialobrzheskyi O.V., Rod'Kin D. A positive, negative and zero sequences electric power, to improve upon the standard IEEE 1459-2010. *COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2023. Vol. 42(2). Pp. 402-424. DOI: <https://doi.org/10.1108/COMPEL-03-2022-0109>.
 15. Bialobrzheskyi O., Nozhenko V., Todorov O. Influence of misalignment of connection of electrical machine shafts on the nature of electric power of the induction motor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022. № 6. Pp. 90-96. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/090>.

References:

1. Eltamaly A.M., Al-Saud M.S., Abo-Khalil A.G. Dynamic Control of a DFIG Wind Power Generation System to Mitigate Unbalanced Grid Voltage. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 39091-39103. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976195>.
2. Song Y., Nian H. Modularized Control Strategy and Performance Analysis of DFIG System Under Unbalanced and Harmonic Grid Voltage. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 30, № 9, pp. 4831-4842. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2366494>.
3. Sun D., Wang X., Nian H., Zhu Z.Q. A Sliding-Mode Direct Power Control Strategy for DFIG Under Both Balanced and Unbalanced Grid Conditions Using Extended Active Power. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, vol. 33, № 2, pp. 1313-1322. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2686980>.
4. Cheng P., Nian H. Collaborative Control of DFIG System During Network Unbalance Using Reduced-Order Generalized Integrators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, vol. 30, № 2, pp. 453-464. doi: <https://doi.org/10.1109/TEC.2014.2363671>.
5. Das S., Singh B. Enhanced Control of DFIG Based Wind Energy Conversion System Under Unbalanced Grid Voltages Using Mixed Generalized Integrator. *IEEE Journal of Emerging and Selected*

- Topics in Industrial Electronics*, 2022, vol. 3, № 2, pp. 308-320. doi: <https://doi.org/10.1109/JESTIE.2022.3143821>.
6. Nian H., Cheng P., Zhu Z.Q. Coordinated Direct Power Control of DFIG System Without Phase-Locked Loop Under Unbalanced Grid Voltage Conditions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2016, vol. 31, № 4, pp. 2905-2918. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2453127>.
 7. Wang T., Nian H., Zhu Z.Q., Huang H., Huang X. Flexible PCC Voltage Unbalance Compensation Strategy for Autonomous Operation of Parallel DFIGs. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, vol. 53, № 5, pp. 4807-4820. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2017.2696491>.
 8. Rani M.A.A., Chakkarapani M., Nagamani C., Ilango G.S. An Improved Angular Stator Flux Frequency Computation Method for Robust MPPT Operation of DFIG Under Unbalanced Grid Voltage. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2023, vol. 59, № 1, pp. 1162-1174. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3211912>.
 9. Susperregui A., Martinez M.I., Tapia-Otaegui G., Etxeberria A. Sliding-Mode Control Algorithm for DFIG Synchronization to Unbalanced and Harmonically Distorted Grids. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, vol. 13, № 3, pp. 1566-1579. doi: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2022.3166217>.
 10. Asha Rani M.A., Nagamani C., Saravana Ilango G., Karthikeyan A. An Effective Reference Generation Scheme for DFIG With Unbalanced Grid Voltage. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2014, vol. 5, № 3, pp. 1010-1018. doi: <https://doi.org/10.1109/TSTE.2014.2322672>.
 11. Mazurenko L.I., Romanenko V.I. Mathematical model of asynchronous generator with gate excitation using the matching method. *Technical Electrodynamics*, 2010, № 4, pp. 19-24. (Ukr.)
 12. Aller J.M., Delgado D., Bueno A., Viola J.C., Restrepo J.A. Model of the induction machine including saturation. *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, France, 2013, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1109/EPE.2013.6631883>.
 13. Bialobrzheskyi O.V., Vlasenko R.V. Interrelation of a clarke and fortescue transformation for the three-phase asymmetrical electrical network. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2016, № 5, pp. 67-74.
 14. Bialobrzheskyi O.V., Rod'Kin D. A positive, negative and zero sequences electric power, to improve upon the standard IEEE 1459-2010. *COMPEL – The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 2023, vol. 42(2), pp. 402-424. doi: <https://doi.org/10.1108/COMPEL-03-2022-0109>.
 15. Bialobrzheskyi O., Nozhenko V., Todorov O. Influence of misalignment of connection of electrical machine shafts on the nature of electric power of the induction motor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, № 6, pp. 90-96. doi: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/090>.

Рецензент: О.П. Чорний
д-р техн. наук, проф., КрНУ ім. Михайла Остроградського

Стаття надійшла 13.02.2023
Стаття прийнята 02.04.2023

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 531.43, 681.5

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288180

© Худяков І.В.¹, Грицук І.В.², Погорлецький Д.С.³, Черненко В.В.⁴,
Поліщук О.В.⁵**ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДАТЧИКА КОНЦЕНТРАЦІЇ ЗАЛІЗА У
МАСЛІ ДЛЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
СУДНОВОГО ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА**

В статті розглядаються особливості загальної проблеми надійності, точності і довговічності машин, механізмів і приладів, а саме, питання тертя, змащувальній дії, зношування поверхонь деталей і робочих органів, які є між собою в дуже складних кореляційних залежностях. Запропоновано підхід до підвищення надійності суднового дизеля, що вимагає розробки ефективних розрахункових методів і моделей для прогнозування довговічності й зносостійкості матеріалів деталей у вузлах тертя при граничній змащенні в широкому діапазоні зміни умов експлуатації й з урахуванням змінних режимів роботи суднового ДВЗ. В статті розглядається загальний підхід і саме особливості побудови складових діагностичної системи суднового ДВЗ. На основі обраного обсягу завдань, розв'язуваних системою діагностування, визначено послідовність функціонування її елементів. Розроблено алгоритм діагностування, за допомогою якого здійснюється процес індивідуального прогнозування й коректування періодичності технічних впливів на механізм. Впровадження даного алгоритму може дати значний ефект при комплексному використанні діагностичної інформації спільно зі статистичною інформацією, збереженої індивідуально по кожному механізмі, при керуванні його технічним станом. На основі запропонованої діагностичної моделі можна здійснювати розпізнавання технічного стану судових ДВЗ по даним трибомоніторингу, виявляючи зміну умов тертя й збільшення швидкості зношування деталей циліндро-поршневої групи. Це дозволить почати попереджуючі коригувальні дії, спрямовані на забезпечення надійної й безпечної експлуатації судових двигунів.

Ключові слова: суднова енергетична установка, двигун, датчик, система змащення, прогнозування, моніторинг, діагностування, інформаційний елемент.

I.V. Khudiakov, I.V. Gritsuk, D.S. Pohorletsky, V.V. Chernenko, A.V. Polishuk. Use of iron in oil concentration sensor for continuous monitoring of marine diesel engine technical condition. The article examines the features of the general problem of reliability, accuracy and durability of machines, mechanisms and devices, namely, the issue of friction, lubricating action, wear of the surfaces of parts and working bodies, which exist among themselves in very complex correlational dependencies. An approach to increasing the reliability of a ship's diesel engine is proposed, which requires the development of effective calculation methods and models for predicting the durability and wear resistance

¹ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-8900-7879, khudiakov.ihor@ksma.ks.ua

² д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7065-6820, gritsuk_iv@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1256-8053, pohorletskiyi.dmytro@ksma.ks.ua

⁴ ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-6639-1102, v.chernenko18@gmail.com

⁵ аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон

of materials of parts in friction nodes at the limit of lubrication in a wide range of changes in operating conditions and taking into account the variable modes of operation of a ship's diesel engine. The article considers the general approach and specific features of the construction of the components of the diagnostic system of the ship's internal combustion engine. Based on the selected volume of tasks solved by the diagnostic system, the sequence of functioning of its elements is determined. The implementation of this algorithm can have a significant effect in the complex use of diagnostic information together with statistical information stored individually for each mechanism, when managing its technical condition. On the basis of the proposed diagnostic model, it is possible to recognize the technical condition of marine diesel engines based on tribomonitoring data, detecting changes in friction conditions and an increase in the rate of wear of parts of the cylinder-piston group. This will enable the initiation of preventive corrective actions aimed at ensuring the reliable and safe operation of marine engines.

Key words: ship power plant, engine, sensor, lubrication system, forecasting, monitoring, diagnostics, information element.

Постановка проблеми. У загальній проблемі надійності, точності і довговічності машин, механізмів і приладів основне місце належить питанням тертя, змащувальній дії, зношуванню поверхонь деталей і робочих органів, які є між собою в дуже складних кореляційних залежностях.

Дослідження показали, що для більшості деталей і вузлів суднової енергетичної установки (СЕУ) відсутня яка-небудь кореляція між їхньою надійністю й частотою профілактичного обслуговування [1]. Це пов'язане з тим, що відсутні надійні методи й засоби, що дозволяють надійно й вчасно проводити моніторинг стану вузлів СЕУ. Крім цього, виконується велика кількість робіт з демонтажу й розбиранню цілком справних механізмів, що приводить до значних економічних витрат і в ряді випадків приводить до відмов, які виникають при розбираннях, і окремих сполучених деталей вузлів тертя.

СЕУ повинна забезпечити безпеку плавання, надійність роботи у всіх можливих умовах експлуатації, у тому числі при тривалому диференті 5° і крені 15° , бортовій і кільовій хитавиці судна з амплітудою до 10° . Механізми і пристрої повинні бути, по можливості, прості та зручні в експлуатації, обслуговуванні, ремонті і повинні задовольняти вимогам Правил Регістра по конструктивним і експлуатаційним властивостям. Висока надійність в роботі суднової енергетичної установки при великому моторесурсі характеризується: безвідмовністю двигуна та обслуговуючих його механізмів; тривалістю ефективної безперервної роботи з гарантованою відсутністю відмов і вимушеного ремонту; частотою виведення установки з експлуатації на профілактику та ремонт; ефективністю використання потужності головного двигуна; тривалістю експлуатаційного періоду; витратами на профілактику та ремонт. Головний двигун з точки зору надійності займає особливе положення, оскільки його безвідмовна робота має вирішальне значення для безпеки плавання. Тому будь-які заходи, що підвищують надійність двигуна, незалежно від витрат є виправданими [2].

З розвитком науково-технічного прогресу необхідно проводити складніші розрахунки сил опору у важконавантажуваних, автоматичних і особливо точних вузлах тертя і забезпечувати їх антифрикційність в експлуатаційних умовах [2, 3]. У багатьох галузях промисловості виникла необхідність створення спеціальних фрикційних пристроїв і гальмівних систем, для чого потрібно керувати процесами зовнішнього тертя, знати і використовувати його закони. Наука про тертя відстає від потреб практики і в наш час не може дати відповіді на багато важливих питань у реальному масштабі. Сучасний стан теорії зовнішнього тертя не дозволяє конструктору проводити необхідні розрахунки сил тертя в машинах, які проєктують.

В останні роки досягнуто значних успіхів у створенні нових матеріалів (композиційні сплави, полімерні матеріали, тверді мастила), однак спеціалісти не мають необхідної інформації про зовнішнє тертя і зношування в машинах і механізмах, яка потрібна для їх розроблення і застосування.

Одним із актуальних завдань сучасного машинобудування є раціональне застосування мастил, що в багатьох випадках визначає працездатність і довговічність машин. Складні умови експлуатації сучасних машин різко підвищили вимоги до змащувальних матеріалів.

Працездатність двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ) порушується внаслідок фізичного зношування, через більш-менш тривалий термін служби. Найпоширенішою причиною виходу деталей машин з ладу є не поломка, а зношування циліндрових втулок (ЦВ) і ушкодження їх робочих поверхонь [2-4].

Для практики дизелебудування й експлуатації важливо знати ресурси окремих деталей як для цілей удосконалювання машини, так і для розробки основних контурів технічної експлуатації. В експлуатації ж ці відомості необхідні для планування технічного обслуговування й ремонту машин (ТО й Р).

Ресурс деталей судових дизелів можна визначити по параметрах їх зношування (лінійне зношування, інтенсивність або швидкість зношування).

Граничним значенням зношування є те значення, якому відповідає: початок різкого зростання інтенсивності зношування; гранично припустиме зниження міцності деталі, що зношується, внаслідок зміни розмірів, що виходить за межі припустимих значень; вплив зношування деталі трибосполучення на працездатність інших деталей; відмова машини.

Забезпечення високої надійності судового дизеля вимагає розробки ефективних розрахункових методів і моделей для прогнозування довговічності й зносостійкості матеріалів деталей у вузлах тертя при граничній змащенні в широкому діапазоні зміни умов експлуатації й з урахуванням змінних режимів роботи ДВЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним з найбільш ефективних методів оцінки технічного стану деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) судових дизелів є трибомоніторинг по параметрах відпрацьованого циліндрового масла (ВЦМ) [5, 6]. Розробка наукової методології інтерпретації отриманих у результаті трибомоніторингу даних дозволяє вчасно почати попереджувальні дії, спрямовані на забезпечення надійної й безпечної експлуатації судових ДВЗ.

Кількість ВЦМ, що стікає в підпоршневі порожнини, виявиться трохи меншою, чим було подано свіжого масла на дзеркало ЦВ. Це обумовлено тим, що частина циліндрового масла витрачається на вигар за рахунок насосної дії поршневих кілець і його випару із дзеркала ЦВ при знаходженні у високотемпературній зоні [6]. Кількість масла, що губиться, у судових умовах досить легко визначається як різниця між масою масла, що пішла з видаткової цистерни на змащення ЦВ, і масою масла, що надійшло у танк ВЦМ за той самий проміжок часу. Як правило, для дизелів, що перебувають у гарному технічному стані й працюючих на режимах, близьких до тривалої експлуатаційної потужності (характерно для морських транспортних судів), втрати масла на вигар не перевищують 5...8% [5, 6]. Таким чином, отримані з експериментальних даних значення коефіцієнта вигару коливаються в дуже вузькому діапазоні і їх величина дорівнює 0,92...0,95.

До різних механізмів повинні застосовуватися різні форми й методи ТО й Р або їх комбінації, що дозволяють вирішувати завдання максимальної безвідмовності технічних засобів або мінімальних економічних витрат на технічну експлуатацію (ТЕ). В роботі [2, 7-9] був зроблений аналіз технічної документації механізмів СЕУ з метою дослідження можливості впровадження засобів технічного діагностування вузлів тертя, що працюють із рідким мастилом.

Аналіз статистичних даних відмов судових механізмів [4] показує, що основною причиною відмов як нових, так і відремонтованих, механізмів є зношування вузлів тертя, що перевищує припустимі значення. Згідно цим даним зношування пар тертя становить від 70 до 90% усієї кількості факторів, що впливають на втрату механізмом його функціональних властивостей. У зв'язку із цим очевидно, що застосування методів технічного діагностування вузлів тертя механізмів по вмісту продуктів зношування (ПЗ) в маслі дозволить виключити близько 70% передбачених план-графіком ТЕ контрольних розкриттів і оглядів механізмів, що дасть можливість одержати істотний економічний ефект від скорочення витрат на запасні частини й підвищення надійності механізмів.

Слід також зазначити, щодо механізмів, що входять у систему ТЕ, повинні застосовуватися різні норми й методи ТЕ або їх комбінація залежно від відповідальності даних механізмів. Ці форми й методи повинні дозволяти вирішувати завдання максимальної безвідмовності роботи або мінімальних економічних витрат.

Метою дослідження є підвищення ефективності використання головного двигуна шляхом модернізації циркуляційної системи мащення [1-10].

Виклад основного матеріалу. Сучасні форми організації технічного обслуговування й ремонту з використанням засобів технічної діагностики вимагають подальшого вдосконалення методів керування технічним станом механізмів на базі діагностичної інформації [9-12]. Розв'язок цієї проблеми включає наступні завдання:

- удосконалювання поточної технічної експлуатації механізмів з використанням засобів технічної діагностики;
- удосконалювання технічних процесів ТО й Р;
- удосконалювання системи планування робіт з ТО й Р на основі діагностичної інформації.

Основним продуктом зношування в ВЦМ є *Fe*. Його надходження в ВЦМ, як відзначалося раніше, викликане зношуванням ЦВ, поршневих кілець і кепів головки поршня. Для постійного моніторингу технічного стану цих елементів авторами статті рекомендується використання датчика зношування вузлів тертя редукторів з картерної системою змащення, який необхідно встановлювати безпосередньо в масляній ванні.

Датчики повинні бути встановлені в інформативних крапках систем змащення механізмів, тобто в місцях, де концентрація параметра, що діагностується, (ДП) найбільша. Тому при монтажі датчиків необхідно враховувати розташування трубопроводу й швидкість потоку в ньому.

У результаті проведених випробувань різних макетів датчиків був обраний датчик з такими конструктивними елементами:

- магнітний сердечник;
- чутливий елемент;
- елемент підстроювання до вимірювальної схеми блоку.

Випробування датчиків зношування показали гарну працездатність датчиків із чутливими елементами у вигляді індуктивної котушки з однієї обмоткою, магнітний сердечник яких виконаний у вигляді дво полюсного постійного магніту циліндричної форми, ескізи обраних датчиків двох типорозмірів наведені на рис. 1 [6].

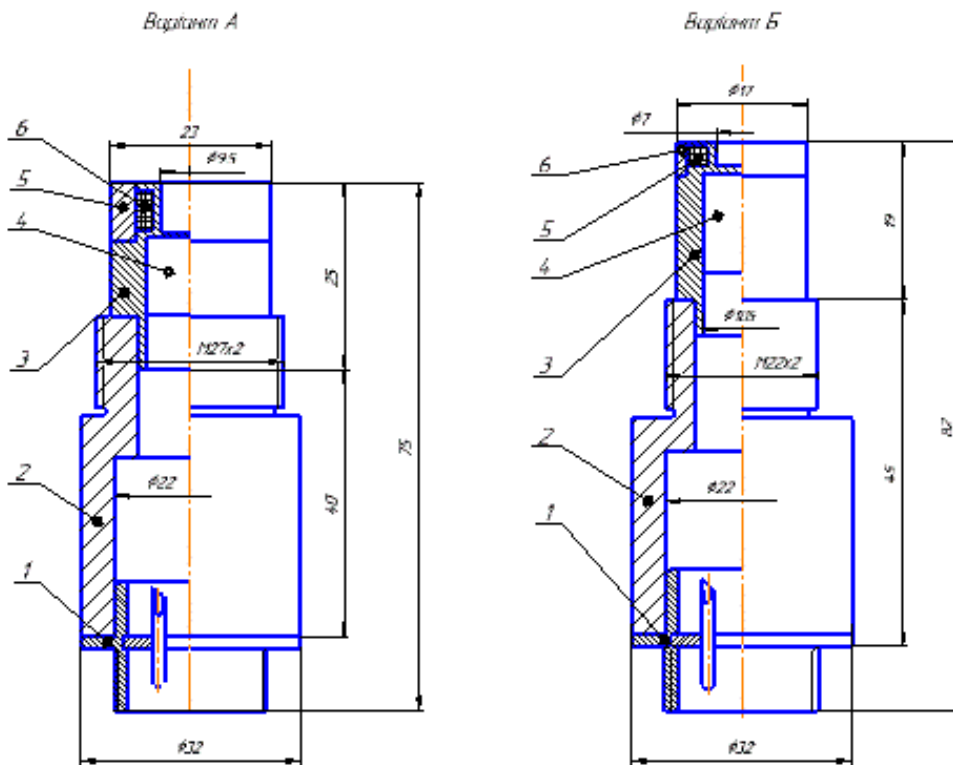


Рис. 1 – Датчики виміру концентрації заліза у маслі

Усі ці елементи розташовуються в корпусі, який повинен бути виконаний з немагнітного матеріалу й забезпечувати надійне кріплення датчика в настановному отворі механізму. Корпус

може бути виготовлений з полімерних матеріалів (текстоліт, гетинакс і ін.) або з металу (латунь, немагнітна сталь, бронза й ін.).

При виборі матеріалу магнітного сердечника повинні бути враховані наступні вимоги:

- матеріал магніту повинен при малому обсязі мати високе значення коерцетивної сили по намагніченості й стійкості до впливу полів, що розмагнічують;
- стабільність параметрів магнітного поля й невисока вартість.

Таким вимогам задовольняють постійні магніти з інтерметалевого з'єднання $SmCO_5$, у яких об'ємна щільність енергії магнітного поля досягає $W > 100$ кДж/м³.

Складність аналітичного вибору оптимальної конструкції чутливого елемента виходить з вимог максимальної чутливості, максимального діапазону вимірів, стабільності показань при коливаннях температури масла, його фізико-хімічних властивостей, вібрації.

На рис. 2 запропонована схема розташування датчика виміру продуктів зношування у маслі.

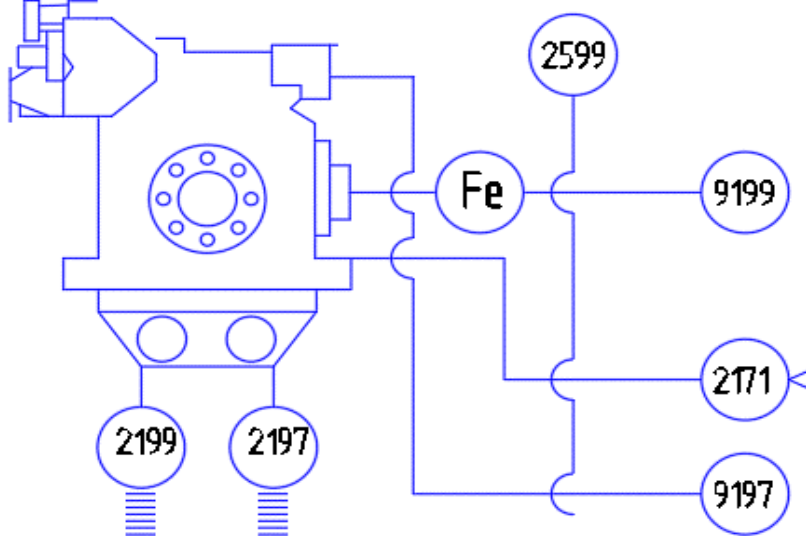


Рис. 2 – Схема розташування датчика виміру концентрації заліза у маслі

Проведені дослідження датчика й реєструючого блоку показали наступне:

Датчики дозволяють контролювати зміст і вступ ПЗ в маслі за масою осаду на ньому.

Розроблена конструкція датчиків дозволяє одержувати інформацію про кількість ПЗ, що надходять у змащення в умовах експлуатації реального механізму.

Вимірювальна схема працездатна в реальних умовах експлуатації й має високу чутливість до змісту ПЗ на датчиках (0,025 мг).

На основі обраного обсягу завдань, розв'язуваних системою діагностування, можна визначити послідовність функціонування її елементів, яка в загальному виді представлена на рис. 3.

У комплексній системі технічного обслуговування й ремонту (ТО й Р) встановлено чотири категорії технічного стану елементів суднових технічних засобів і відповідні їм межі параметрів технічного стану:

- 1 категорія – гарний технічний стан (проведення ТО й Р не потрібно);
- 2 категорія – задовільний (припустимий) технічний стан, який характеризується появою ознак можливого початку розвитку ушкоджень;
- 3 категорія – незадовільно, що характеризується появою ознак ушкоджень (потрібне проведення ТО й Р);
- 4 категорія – аварійний стан – відмова (потрібна негайна зупинка механізму).

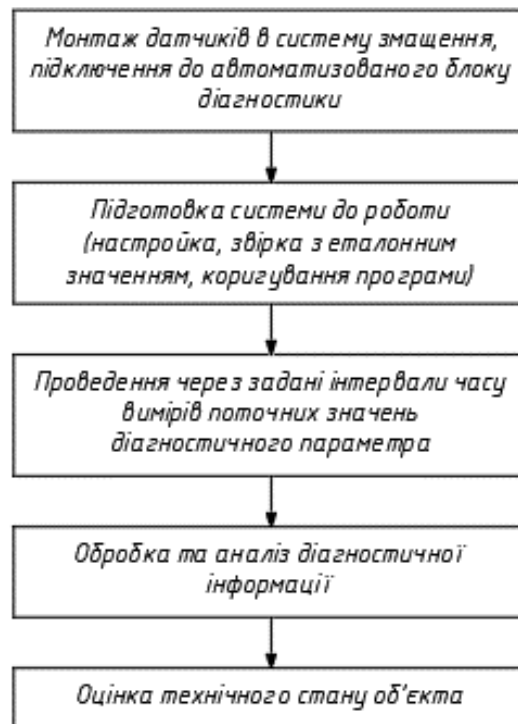


Рис. 3 – Алгоритм функціонування системи діагностування

Алгоритм діагностування при цьому в загальному виді може бути представлений як показано на рис. 4.

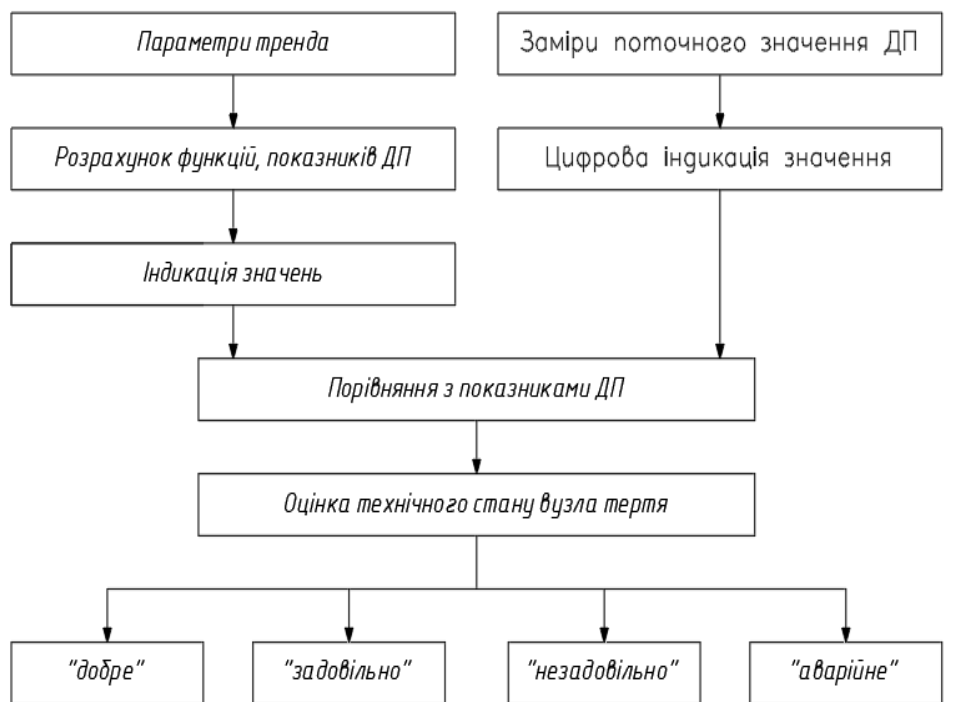


Рис. 4 – Алгоритм діагностування, що реалізує завдання обробки інформації

Таким чином, здійснюється процес індивідуального прогнозування й коректування періодичності технічних впливів на механізм.

Впровадження даного алгоритму може дати значний ефект при комплексному використанні діагностичної інформації спільно зі статистичною інформацією, збереженої індивідуально по кожному механізму, при керуванні його технічним станом.

Зміна схеми ТО й Р конкретного механізму полягає в переході від обслуговування за регламентом до обслуговування за станом на основі розв'язку трьох завдань:

- визначення ефективності заміни схеми ТО й Р за регламентом схемою по стану, яка полягає у величині економії працезатрат;
- розробка оптимальних строків планових вимірів діагностичних параметрів;
- розробка алгоритмів коректування періодичності проведення ТО й Р за результатами діагностування.

Висновки

Система мащення двигуна є найбільш відповідальною системою у складі двигуна на судні. Тому підтримання її в справному стані є однією з найважливіших задач. За результатами проекту було запропоновано дооснастити систему мащення датчиком концентрації заліза у маслі для безперервного моніторингу цього показника. Це дозволить ввести новий алгоритм подачі мастила, знизити зношування поверхонь тертя [9, 10].

Обрана послідовність роботи системи є підставою для розробки методики й алгоритму діагностування, завданням яких є аналіз зміни поточних значень ДП шляхом порівняння їх з еталонними залежностями.

Можна констатувати, що на основі запропонованої діагностичної моделі є можливість здійснювати розпізнавання технічного стану судових ДВЗ по даним трибомоніторинга, виявляючи зміну умов тертя й збільшення швидкості зношування деталей ЦПГ. Це дозволить почати попереджуючі коригувальні дії, спрямовані на забезпечення надійної й безпечної експлуатації судових двигуна. Треба зауважити, що безперервне коригування алгоритму подачі мастила можливо тільки з установленим автономним насосом.

Перелік використаних джерел:

1. Говорущенко Н.Я., Варфоломій В.М. Технічна кібернетика транспорту: навчальний посібник. Харків: ХДАДТУ, 2001. 271 с.
2. Закалов О.В., Закалов І.О. Основи тертя і зношування в машинах: навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. 322 с.
3. Використання інтелектуальних інформаційних технологій позиціонування для контролю теплових параметрів системи комбінованого прогріву ДВЗ транспортного засобу / В.П. Матейчик, В.П. Волков, П.Б. Комов, О.Б. Комов, І.В. Грицук. *Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки*. 2012. № 3(62). С. 136-141.
4. Кадильнікова Т.М. Моніторинг технологічного стану як фактор забезпечення безаварійної роботи. *Вісник Донбаської академії будівництва і архітектури. Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва*. 2002. № 5(36). С. 38-41.
5. Худяков І.В. Можливість застосування різних видів датчиків тиску для управління робочим процесом в ДВЗ. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон: ХДМА, 2014. № 1(10). С. 255-262.
6. Інтелектуальні системи моніторингу транспорту: монографія / В.П. Волков та ін. Харків: Вид-во НТМТ, 2015. 246 с.
7. Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator / I. Gritsuk, Y. Gutarevych, V. Mateichuk, V. Volkov. *SAE Technical Paper*. 2016. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
8. Матейчик В.П. Системний підхід до аналізу структурних схем енергоустановок транспортних засобів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2002. № 7, т. 2. С. 162-167.
9. Худяков І.В., Амелін М.Ю., Рудакова Г.В. Підвищення ефективності експлуатації судових дизельних енергетичних установок. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон: ХДМА, 2016. № 2(15). С. 152-157.

10. Худяков І.В. Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів. *Наукові нотатки*. Луцьк: ЛНТУ, 2019. Вип. 67. С. 141-148. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.67.22>.
11. Cognitive Model of the Internal Combustion Engine / V. Vychuzhanin, N. Rudnichenko, D. Shybaiev, I. Gritsuk, V. Boyko, N. Shybaieva, A. Golovan, V. Zaharchuk, E. Rabinovich, V. Savchuk, E. Zenkin. *SAE Technical Paper*. 2018. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
12. Evaluation of the Powertrain Condition Based on the Car Acceleration and Coasting Data / E. Rabinovich, I.V. Gritsuk, V. Zuiev, E. Zenkin, A. Golovan, Y. Zybtssev, V. Volkov, J. Gerlici, K. Kravchenko, O. Volska, N. Rudnichenko. *SAE Technical Paper*. 2018. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1771>.

References:

1. Govorushchenko N.Ia., Varfolomiiv V.M. *Technical cybernetics of transport: a study guide*. Kharkiv, KhDADTU Publ., 2001. 271 p. (Ukr.)
2. Zakalov O.V., Zakalov I.O. *Basics of friction and wear in machines: a study guide*. Ternopil, Publishing house of TNTU named after I. Pulyuya, 2011. 322 p. (Ukr.)
3. Mateychik V.P., Volkov V.P., Komov P.B., Komov A.B., Gritsuk I.V. Use of intelligent information technology position control system combined heat settings warm ice vehicle. *The Journal of ZSTU / Engineering*, 2012, № 3(62), pp. 136-141. (Ukr.)
4. Kadil'nikova T.M. Monitoring of the technological state as a factor in ensuring trouble-free operation. *Bulletin of the Donbas Academy of Construction and Architecture. Technology, organization, mechanization and geodetic support of construction*, 2002, № 5(36), pp. 38-41. (Ukr.)
5. Khudiakov I.V. The possibility of applying different types of pressductors for workflow management in ICE. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 2014, № 1(10), pp. 255-262. (Ukr.)
6. Volkov V.P., Mateichyk V.P., Komov P.B. *Intelligent transport monitoring systems: monograph*. Kharkiv, NTMT Publ., 2015. 246 p. (Ukr.)
7. Gritsuk I., Gutarevych Y., Mateichyk V., Volkov V. Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator. *SAE Technical Paper*, 2016, pp. 1-9. doi: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
8. Mateichik V.P. A systematic approach to the analysis of structural schemes of vehicle power plants. *Bulletin of the National Technical University «KhPI»*, 2002, № 7, vol. 2, pp. 162-167. (Ukr.)
9. Khudiakov I.V., Amelin M.Iu., Rudakova G.V. Increasing the operational efficiency of ship diesel power plants. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 2016, № 2(15), pp. 152-157. (Ukr.)
10. Khudiakov I.V. Monitoring information system database models vehicle technical parameters. *Scientific Notes*, 2019, vol. 67, pp. 141-148. doi: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.67.22>. (Ukr.)
11. Vychuzhanin V., Rudnichenko N., Shybaiev D., Gritsuk I., Boyko V., Shybaieva N., Golovan A., Zaharchuk V., Rabinovich E., Savchuk V., Zenkin E. Cognitive Model of the Internal Combustion Engine. *SAE Technical Paper*, 2018, pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
12. Rabinovich E., Gritsuk I.V., Zuiev V., Zenkin E., Golovan A., Zybtssev Y., Volkov V., Gerlici J., Kravchenko K., Volska O., Rudnichenko N. Evaluation of the Powertrain Condition Based on the Car Acceleration and Coasting Data. *SAE Technical Paper*, 2018, pp. 1-12. doi: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1771>.

Рецензент: С.В. Білоусов
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 05.05.2023
Стаття прийнята 13.06.2023

© Погорлецький Д.С.¹, Грицук І.В.², Худяков І.В.³, Черненко В.В.⁴,
Поліщук О.В.⁵

ОСОБЛИВОСТІ ПРОТИДІЇ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНИЙ КОРОЗІЇ ГІЛЬЗИ ЦИЛІНДРІВ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ

В статті розглядаються особливості вирішення однієї з проблем суднових малооборотних двигунів, під час роботи яких на мінімальних і часткових режимах навантаження є виникнення низькотемпературної корозії втулок циліндрів. Проведено огляд систем охолодження суднових головних двигунів та розглянуто можливі перспективи вдосконалення систем охолодження суднових дизельних двигунів. Прیدілена увага причинам виникнення та способам боротьби з низькотемпературною корозією суднових головних двигунів. Розглянуто способи регулювання системи охолодження суднових дизельних двигунів, визначено, що сучасна концепція регулювання у системі охолодження має передбачати як автоматичне регулювання режимних показників за рахунок встановлення насосів системи охолодження з частотним регулюванням, так і регулювання водно-хімічних параметрів системи охолодження. Також було розглянуто способи регулювання робочих параметрів насосів в системі охолодження суднового головного двигуна, в яких використовується принцип частотного регулювання відцентрових насосів, для забезпечення режимів роботи з найбільшими ККД. Таким чином, частотне регулювання є енергетично ефективним способом регулювання відцентрових насосів при змінних витратах охолоджуючої рідини в системах охолодження суднових двигунів та одним зі способів підтримання оптимального температурного стану. Розглянуто можливість модернізації системи охолодження циліндрів малооборотних двигунів по принципу системи LDCL для зменшення впливу та виникнення низькотемпературної корозії.

Ключові слова: суднова енергетична установка, малооборотний двигун, низькотемпературна корозія, система охолодження, частотне регулювання.

D.S. Pohorletsky, I.V. Gritsuk, I.V. Khudiakov, V.V. Chernenko, A.V. Polishuk. Features of low-temperature corrosion protection of cylinder sleeves of ship low-speed engines. The article examines the specifics of solving one of the problems of low-speed marine engines, during which low-temperature corrosion of cylinder liners occurs during operation at minimum and partial load modes. An overview of the cooling systems of ship's main engines was conducted and possible prospects for improving the cooling systems of ship's diesel engines were considered. Attention is paid to the causes and methods of combating low-temperature corrosion of ship's main engines. The methods of regulating the cooling system of marine diesel engines were considered, and it was determined that the modern concept of regulation in the cooling system should include both automatic regulation of operational parameters due to the installation of frequency-regulated cooling system pumps, and regulation of the water-chemical parameters of the cooling system. Methods of regulating the operating parameters of the pumps in the cooling system of the ship's main engine were also considered, which use the principle of frequency regulation of

¹ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1256-8053, pohorletskyi.dmytro@ksma.ks.ua

² д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7065-6820, gritsuk_iv@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-8900-7879, khudiakov.ihor@ksma.ks.ua

⁴ ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-6639-1102, v.chernenko18@gmail.com

⁵ аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон

centrifugal pumps to ensure the modes of operation with the highest efficiency. Thus, frequency regulation is an energy-efficient way of regulating centrifugal pumps with variable coolant flows in ship engine cooling systems and one of the ways to maintain an optimal temperature state. The possibility of modernizing the cooling system of cylinders of low-speed engines according to the principle of the LDCL system to reduce the impact and occurrence of low-temperature corrosion was considered.

Key words: *ship power plant, low-speed engine, low-temperature corrosion, cooling system, frequency control.*

Постановка проблеми. Система охолодження (СО) є об'єктом, ресурси якої задля забезпечення надійної, економічної роботи суднового двигуна з задовільними екологічними показниками мало використані. Робочий процес двигуна є, з одного боку, переміщення поршня по циліндру, з другого — безперервна зміна стану робочого тіла, характеризується температурою та тиском. Два цих одночасно протікаючих процеси супроводжуються такими явищами, як: вібрації циліндрових втулок, кавітаційно-корозійні руйнування поверхонь, що охолоджуються, накипоутворення, теплообмін між деталями двигуна і теплоносієм [1].

Цілеспрямований вплив на процеси теплообміну в порожнинах охолодження дозволяє скоротити теплові втрати з рідиною, що охолоджує, і за рахунок цього підвищити індикаторний ККД двигуна і поліпшити його паливну економічність. Додаткове підвищення ефективного ККД може бути досягнуто за рахунок зниження механічних втрат, пов'язаних з прокачуванням теплоносія (охолоджуючої рідини) замкнутими контурами систем охолодження. Збільшення ресурсу деталей двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ), зниження витрати палива в процесі експлуатації підтверджують ефективність рішень, спрямованих на ресурсо- та енергозбереження. Підвищення температурного рівня деталей циліндро-поршневої групи (ЦПГ) сприяє скороченню періоду затримки займання, що позитивно впливає на екологічні характеристики двигуна. Якщо двигун працює неефективно на низьких обертах, особливо це відноситься до двотактних малооборотних суднових двигунів, температура гільзи циліндру нижче точки роси (суміші сірчаної кислоти та води 120...160°C). Корозійні суміші будуть конденсуватися на стінках, визиваючи низькотемпературну корозію стінок циліндру. У паливі з низьким вмістом сірки пізніше або повільніше згоряння палива збільшує теплове навантаження на деталі ЦПГ, що призведе до перегріву, проблем зі змащенням і низькотемпературною корозією.

Важке паливо, яке використовується для роботи суднових двигунів, негативно впливає на деталі двигуна (через присутні в ньому домішки), та через неповне згоряння. Корозія є основною проблемою на судах, коли йдеться про спалювання мазуту в суднових двигунах.

Далі його можна описати так:

- Високотемпературна корозія: виникає через присутність ванадію (Va) і натрію (Na) у важкому паливі і впливає на елементи вихлопної системи двигуна [1-3].
- Низькотемпературна корозія: виникає через наявність сірки у важкому паливі і впливає на стан гільзи циліндра та інші деталі камери згоряння.

Нові енергоефективні суднові двигуни з довгим ходом поршня і більш високим тиском згоряння створюють суворі умови експлуатації при спалюванні важкого палива з низьким вмістом сірки. Застосування режиму повільного підігрівання палива, а також невеликих робочих обертів та низької робочої температури двигуна, призвело до виникнення низькотемпературної корозії в двигуні. Тепловий стан суднового двигуна, що забезпечується ефективною роботою системи охолодження, надає визначальний вплив на його техніко-економічні показники, такі як надійність, паливна економічність та екологічна безпека [1-7]. Найважливіше значення має тепловий стан деталей циліндро-поршневої групи, який визначає якість протікання робочого циклу, умови змащування цих деталей, величину механічних втрат, витрату мастила на чад та інтенсивність зношування у поєднанні втулка циліндра – поршневий комплект, швидкість газової корозії та ресурс випускних клапанів, ймовірність тріщин у кришках і втулках циліндрів, днищах поршнів, інтенсивність ерозійно-корозійних руйнувань поверхонь, що омиваються охолоджувальною рідиною, втулок і блоків циліндрів та накипоутворення в сорочці охолодження. Відцентрові насоси, які застосовуються в системах охолодження головних двигунів, зазвичай працюють з максимальною продуктивністю 24 год. на добу. Тому перевагою буде застосування автоматичного регулювання продуктивності насоса у системі. Найкращим способом регулювання робочих

параметрів відцентрового насоса є метод регулювання швидкості. Цей метод регулювання переважно здійснюється за допомогою перетворювача частоти [1-7]. Регульовані насоси використовують лише кількість енергії, яка необхідна для виконання насосом певної роботи. У порівнянні з іншими методами регулювання швидкості забезпечує максимальний ККД і, таким чином, ефективніше використання енергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При розгляді теплового балансу двигуна встановлено, що частина тепла, що виділяється під час згоряння палива всередині циліндрів дизеля, перетворюється на індикаторну роботу (до 47 %). З тепла, що залишилося, приблизно 25 % виноситься з газами, а решту тепла (25...28 %) для запобігання перегріву деталей двигуна відводять охолоджувальною водою.

Система охолодження двигуна призначена для охолодження деталей (циліндрових втулок, кришок, поршнів, випускних колекторів та ін.) двигуна, забезпечуючи їм нормальні умови роботи. Водяна система охолодження є найбільш поширеною і, у свою чергу, поділяється на проточну (охолодження забортною водою) та замкнуту (охолодження прісною водою). У сучасних двигунах охолодження забортною водою майже не застосовують, у замкнутих системах прісна вода охолоджується забортною. На даний час застосовується трьох контурна система охолодження із центральним охолоджувачем прісної води, це обумовлено прагненням підвищити надійність всього обладнання, що охолоджується, де для відведення тепла використовується тільки прісна вода, яка має меншу корозійну активність. Наприклад, судно укомплектоване двигуном 5G50ME-B9, має два контури системи охолодження (низькотемпературний та виськотемпературний), контур прісної води складається з двох частин. Згідно технічної документації на двигун MAN B&W 5G50ME-B9 для охолодження втулок циліндра з метою зниження теплових втрат з охолоджувальною рідиною використовується прісна вода з температурою на вході в засорочковий простір 75°C та 85°C на виході з нього. Підвищення економічності суднової енергетичної установки (СЕУ) забезпечується, головним чином, за рахунок зниження питомої ефективної витрати палива головних та допоміжних двигунів шляхом підвищення тиску наддуву P_k (до 0,6 МПа) і середнього ефективного тиску робочого циклу P_e двигунів (до 3,0 МПа) [1-7], що призводить до підвищення теплових та механічних навантажень на деталі та вузли двигуна.

Система охолодження сучасних перспективних судових дизелів повинна забезпечувати оптимальний та стабільний тепловий стан деталей та вузлів. Оптимальним слід вважати такий температурний рівень, при якому матеріали деталей зберігають свої властивості міцності, моторні масла зберігають високу змащувальну і несучу здатність, а втрати теплоти через систему охолодження мінімальні. Іншою важливою причиною є те, що нові судові двигуни розроблені відповідно до правил Tier III NO_x та інструкцій EED. Щоб відповідати цим новим нормам, циліндри двигуна повинні працювати під підвищеним тиском і зниженими робочими температурами (для зменшення викидів NO_x), створюючи таким чином умови роботи нижче точки роси, за рахунок цього вода конденсується на стінках циліндра. Потім з'єднується з сіркою в процесі згоряння, утворюючи H_2SO_4 , це призводить до низькотемпературної корозії. Постійна теплова напруга та постійний тиск, які можуть призвести до ризику виникнення низькотемпературної корозії, є більш серйозними в довгоходових малооборотних двигунах.

Двигуни старої модифікації, які встановлені на судах, часто модернізують для їх роботи на низьких обертах і малому навантаженні. Додатково встановлюються такі системи, як VTA, газові перепускні клапани, байпасні системи охолодження стінок сорочки двигуна, системи охолодження з регулюванням температури за рахунок використання насосів з частотним регулюванням [1-7]. У старих модифікація низькооборотних двигунів передбачено модифікацію для роботи під час низьких навантажень, але не передбачено ніяких додаткових систем для боротьби з низькотемпературною корозією. Використання регульованих насосів у системах охолодження забезпечує споживачеві високий рівень зручності обслуговування, автоматичне регулювання тиску та плавний пуск насосів, що дозволяє уникнути гідравлічного удару та шуму; в циркуляційних системах насоси, що регулюються, підтримують постійний перепад тиску, що дозволяє мінімізувати рівень шуму в системі. Насоси, що регулюються, можуть знижувати потребу в регулюючих вентилях в системі охолодження і, відповідно, знижувати її вартість.

Метою дослідження є обґрунтування способів модернізації системи охолодження судового головного двигуна та демонстрація можливості застосування принципу керування терморегулюючими пристроями і частотного приводу насосів системи охолодження двигуна MAN-B&W

6S60MC для підтримання оптимального температурного стану двигуна та системи охолодження. Розглянути можливість застосування технології фірми MAN-B&W для збільшення температури охолоджуючої рідини сорочки системи охолодження циліндрових втулок, задля ліквідування і зменшення виникнення низькотемпературної корозії на циліндрових втулках [3-5].

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній час причини виникнення низькотемпературної корозії мають велике значення для двотактних двигунів фірми MAN-B&W за умов роботи на таких сортах палив, як паливо з наднизьким вмістом сірки (ULSFO), не більше 0,10%; паливо з дуже низьким вмістом сірки (VLSFO), не більше ніж 0,50%; мазут, вміст сірки трохи більше 3,50%. Правила ІМО 2020 року диктують використання палива з максимумом 0,5% сірки, коли не застосовується скруббер. Робота на паливі з низьким вмістом сірки зменшує корозійний знос до ступеня, коли знос легко контролювати без підвищення температури охолоджуючої рідини. У документі SL2019-671 рекомендовано деактивувати систему JBB при використанні до 0,50% SVLSFO. У цьому листі описано, як деактивувати систему JBB для системи JBB і системи охолодження гільзи циліндрів (LDCL), робота якої залежить від навантаження на двигун, зазначено, що закриття системи LDCL та деактивації будь-якої системи JBB рекомендується при використанні палива до 0,50% SVLSFO [3-5]. На рис. 1 показана система байпасування охолоджуючої води в сорочці охолодження, кількість охолоджуючої рідини, яку потрібно перекачати, визначена на стадія проектування та розрахунку самої системи.

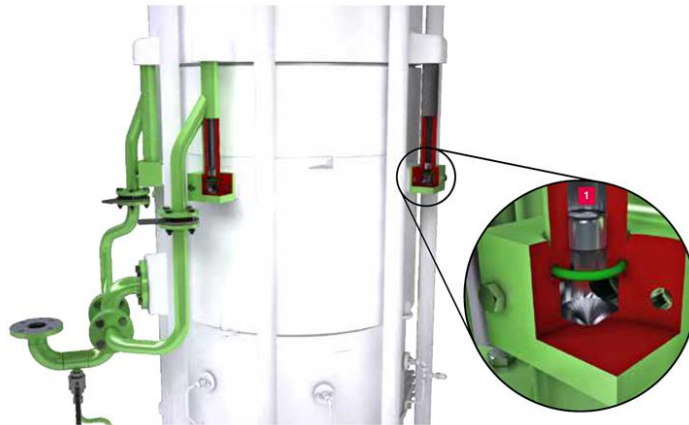


Рис. 1 – Система охолодження сорочки циліндрової втулки Basic (JBB)

Обхід 85% охолоджуючої рідини в сорочці підвищить температуру стінки гільзи приблизно на 15°C. Крім того, температура охолоджуючої рідини в сорочці збільшується до 90°C. Разом досягається підвищення температури стінки гільзи приблизно на 20°C. Тести показали, що можна байпасувати ще більшу кількість охолоджуючої рідини. Крім того, керована версія системи JBB називається JBC, у цій системі термостатичний клапан контролює кількість байпасованої охолоджуючої рідини таким чином, що при низькому навантаженні на двигун пропускається велика кількість води, а при більш високому – менше. Системи JBB і JBC можуть бути обидві легко встановлені на двигуни фірми MAN-B&W, які вже знаходяться в експлуатації [3-5]. Для новітніх двигунів використовується більш активна система байпасування охолоджуючої рідини. На даний момент ця система є стандартною для нових двигунів MAN-B&W серії S і G 80, 90 і 95. Крім того, було вирішено впровадити систему на майбутніх типах двигунів G50, G60 і G70. Система складається з двох додаткових труб охолоджуючої рідини вздовж двигуна, додаткового насоса та додаткового регулюючого клапану, вони забезпечують до 130°C охолоджуючої рідини для гільз циліндрів при підтримці 80...90°C на кришці і випускному клапані. Висока температура на гільзі циліндра підтримується до 90% навантаження головного двигуна [1-7]. Система LDCL не означає зміну підключення до системи охолодження судна та суднового двигуна. Система LDCL розроблена з додатковим контуром змішування на двигуні, що включає насос, триходовий клапан та систему керування. Температуру води в сорочці гільзи циліндра можливо контролювати відповідно до діаграми на рис. 2. Один зі способів боротьби з низькотемпературною корозією це розробка нових конструкцій гільз циліндрів та впровадження їх під

час модернізації та виробництва нових двигунів [1-7]. Метою цих заходів є взагалі підвищення температури стінки гільзи на досить великій площі у верхній частині гільзи. Завдяки цьому зменшується число циліндрового масла BN і може бути встановлена нижча необхідна швидкість подачі циліндрового масла. Для того, щоб економно збільшити термін служби гільзи циліндру, дані способи модернізації гільзи циліндрів із гарячою заміною спрямовані на використання в існуючих двигунах. Крім того, фірма MAN-B&W представила гільзи циліндрів різних конструкцій на основі рейтингу використання двигунів, двигуни зі зниженими характеристиками можуть бути оснащені гільзами циліндрів з нижчою інтенсивністю охолодження без перевищення максимально допустимої температури гільзи циліндрів під час роботи на максимальній потужності [1-7].

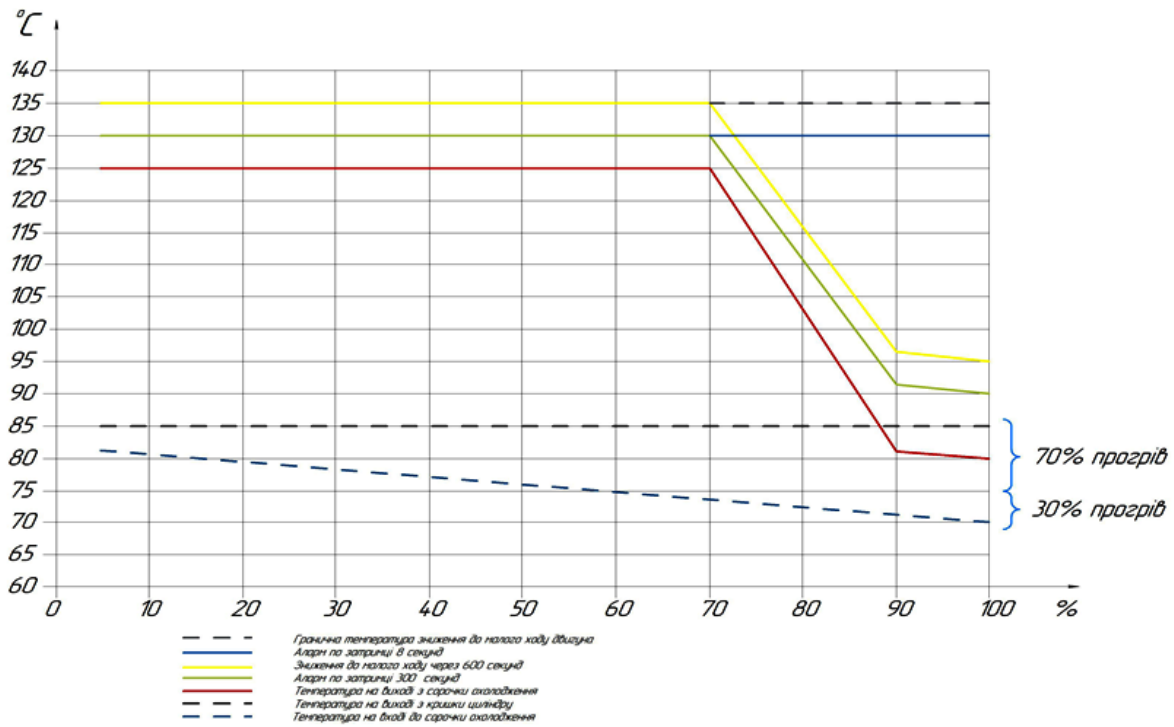


Рис. 2 – Залежність заданої температури LDCL від навантаження двигуна, S80ME-C

Виявлено ряд факторів, які впливають на ступінь виникнення низькотемпературної корозії у двотактних двигунах фірми MAN-B&W:

- Робота двигуна на низьких та часткових навантаженнях;
- Відключення роботи газотурбонагнітача при роботі на низьких навантаженнях на двигун;
- Максимальний рівень тиску;
- Застосування рециркуляції повітря у двигуні;
- Зниження температури поданого повітря;
- Нові двигуни з більш високим тиском при роботі на низьких та часткових навантаженнях.

Оптимізація роботи двигуна на низьких та часткових навантаженнях, збільшує тиск в циліндрах при менших навантаженнях, що також сприяє підвищенню виникнення низькотемпературної корозії.

Для запобігання виникненню низькотемпературної корозії розроблено ряд контрзаходів:

- обвідна сорочка охолоджувальної води втулки циліндрів, базова (JBB);
- система LDCL з додатковим контуром змішування;
- застосування нової конструкції циліндрової втулки (RDL).

Таким чином, низькотемпературній корозії гільзи циліндрів протидіють підвищенням температури відкритих частин гільзи циліндрів у допустимих межах шляхом внесення змін до конструкції гільзи циліндрів та внесення змін в систему охолодження циліндрової втулки [1-7].

Принцип роботи системи LDCL полягає в тому, щоб отримати змінну температуру сорочки охолодження циліндрової втулки залежно від навантаження двигуна шляхом введення циркуляційного контуру до системи охолодження сорочки. Цей циркуляційний контур має змінну температуру (до 130°C), яка контролюється заданим значенням для змінного триходового клапана. Уставка визначається навантаженням двигуна. Це означає, що коли двигун працює при низьких навантаженнях чи при високих навантаженнях двигуна, температура буде нормальною. Принципова схема роботи LDCL зображена на рис. 3 [3-5]. На судні «Bering Sea» встановлено двигун MAN-B&W 6S50MC, пропонується розглянути можливість виконання модернізації системи охолодження циліндрів за принципом системи LDCL для зменшення впливу та виникнення низькотемпературної корозії, але одним недоліком роботи даної системи охолодження та регулювання температури є постійно працюючий циркуляційний відцентровий насос з постійною продуктивністю. Регулювання продуктивності даного насосного агрегату виконується шляхом дрослювання за рахунок автоматичної засувки. Даний принцип регулювання температури системи охолодження циліндрів не є економічно доцільним, так як набагато простіше виконувати температурне регулювання за рахунок зміни частоти обертання електродвигуна циркуляційного насосу, встановивши на нього частотний перетворювач.

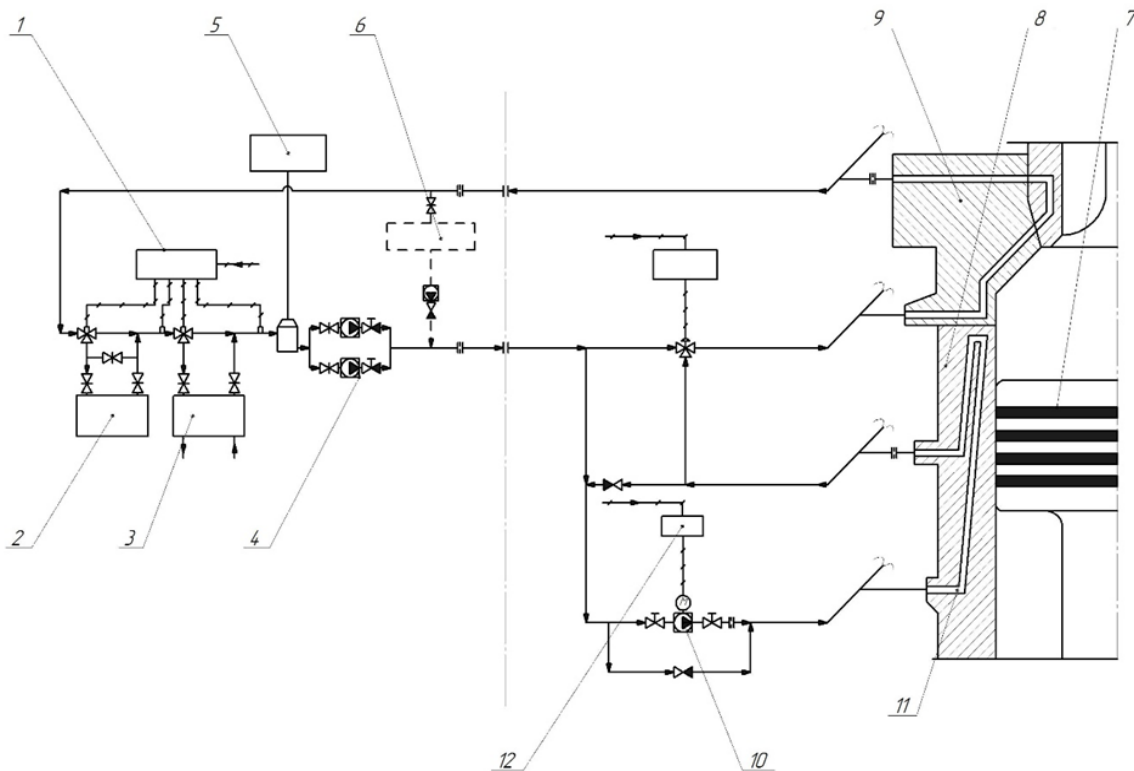


Рис. 3 – Принципова схема роботи LDCL: 1 – клапанний контролер; 2 – водоопрієнювальна установка; 3 – теплообмінний апарат; 4 – циркуляційний насос системи охолодження; 5 – розширювальний бак; 6 – підігрівач; 7 – поршень; 8 – циліндрова втулка; 9 – циліндрова кришка; 10 – циркуляційний насос системи LDCL; 11 – канал охолодження циліндрової втулки; 12 – перетворювач частоти обертання насосу

Для цього проведено розрахунки перевірки відповідності встановленого відцентрового насосу марки (Desmi RSV 400...280) та його характеристик для забезпечення теплообміну системи охолодження і розраховано необхідну продуктивність відцентрового насосу у відповідності до навантаження головного двигуна від 50% до 100%, результати представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати розрахунків потужності електродвигуна в залежності від продуктивності насоса

Потужність ГД, %	N_{er} , кВт	$W_{п}$, м ³ /год	$N_{ел.}$, кВт
1	2	3	4
100	8310	86,6	33,1
95	7895	82,3	29,8
90	7479	78	26,8
85	7064	73,6	23,9
80	6648	69,3	21,1
75	6233	65	18,6
70	5817	60,6	16,2
65	5402	56,3	13,9
60	4986	52	11,9
55	4571	47,6	10
50	4155	43,3	8,2

Результати розрахунків потужності електродвигуна системи охолодження суднового двигуна в залежності від продуктивності представлено в графічному вигляді на рис. 4. За допомогою частотно-регульованого приводу насоса можна реалізувати схему без застосування клапана (автоматичної засувки), що, без всяких сумнівів, зробить систему більш економічною. Однак слід пам'ятати, що для нормальної роботи системи регулювання велике значення має швидкість забортової води, що прокачується через холодильник. На всіх режимах роботи енергетичної установки судна повинна забезпечуватись швидкість, що перешкоджає інтенсивному відкладенню солей у каналах холодильника. Для вирішення цієї проблеми можна регулювати швидкість насосів і в системі охолодження прісної води, але при цьому необхідно пам'ятати про вимоги до систем [3-6].

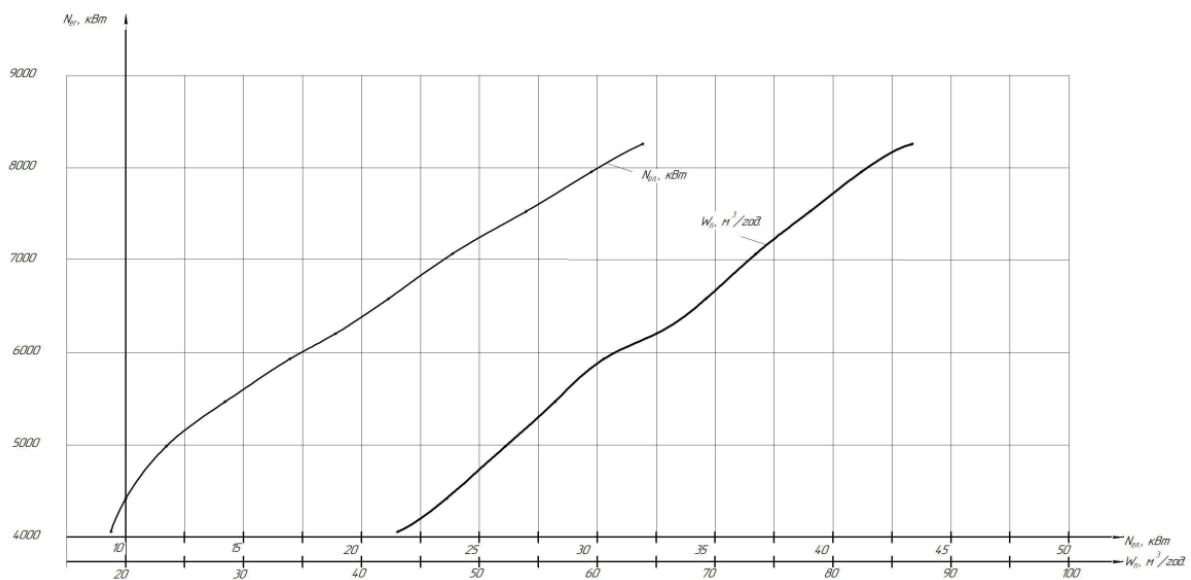


Рис. 4 – Результат розрахунків потужності електродвигуна в залежності від продуктивності

При цьому форма цієї характеристики повинна бути такою, щоб на будь-якому режимі роботи двигуна дотримувалися такі умови:

– температура дзеркала втулки циліндра, навпроти верхнього компресійного кільця при положенні поршня у верхній мертвій точці за умови збереження масляної плівки та забезпечення

нормальних умов мащення, не повинна перевищувати 180°C. Перевищення температури 200°C поверхні тертя призводить до різкого наростання швидкості механічного зносу;

- інтенсивне нагароутворення відбувається, якщо паливо потрапляє на стінку камери згоряння, температура якої нижче 500°C;

- у разі експлуатації двигуна на важких сортах палива визначальною має бути точка роси парів води. Її вважають нижчою допустимою межею температури дзеркала циліндра;

- щоб уникнути фазового перетворення, вибирають такі режими та способи охолодження, при яких забезпечується температура стінки на 10...15°C нижче температури фазових змін теплоносія.

Можна припустити, що одночасна заміна терморегулюючого пристрою клапанного типу (автоматичної засувки) на частотно-керовані електроприводи насосів та принципу регулювання керованої величини (з регулювання за принципом відхилення на регулювання за принципом обурення або на комбінований принцип регулювання) дозволить підвищити як економічність системи охолодження суднового ДВЗ, так і енергоефективність СЕУ.

Висновки

Розглянута можливість комплексної модернізації системи охолодження головного суднового двигуна MAN-B&W 6S50MC, а саме виконання модернізації системи охолодження циліндрів по принципу системи LDCL для зменшення впливу та виникнення низькотемпературної корозії. Таким чином, низькотемпературній корозії гільзи циліндрів протидіють підвищенням температури відкритих частин гільзи циліндрів у допустимих межах шляхом внесення змін до конструкції гільзи циліндрів та внесення змін в систему охолодження циліндрової втулки. Також розглянуто можливість встановлення насосів з частотним регулюванням до системи охолодження головного суднового двигуна, застосування перетворювача частоти в судновій техніці обумовлено реальною економічною доцільністю, з боку економії витрати палива дизель-генераторних установок та економії електроенергії на судні.

Перелік використаних джерел:

1. Koch F.W., Haubner F.G. Cooling System Development and Optimization for DI Engines. *SAE Technical Paper Series*. 2000. Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0283>.
2. Low-heat rejection engines – a concept review / R.A. Churchill, J.E. Smith, N.N. Clarc, R.A. Turton. *SAE Technical Paper Series*. 1989. Pp. 25-36.
3. Костишин В.С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогідрравлічної аналогії. Івано-Франківськ, 2000. 163 с.
4. Service letter SL2019-671/JAP. URL: <https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019-671.pdf>.
5. Service Letter SL2019-687/NHN. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019_687.pdf?sfvrsn=4fba319_6.
6. Service Experience - MAN B&W Two-stroke Engines. URL: <https://maritimeexpert.files.wordpress.com/2016/service-experience.pdf>.
7. Погорлецький Д.С., Грицук І.В., Худяков І.В. Особливості експлуатації лубрикаторної системи мащення суднового двигуна MAN - B&W 5S70ME-C. *Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування*: матеріали 14-ї Міжнародної науково-практичної конференції, м. Херсон, 16-18 березня 2023 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2023. – С. 402.

References:

1. Koch F.W., Haubner F.G. Cooling System Development and Optimization for DI Engines. *SAE Technical Paper Series*, 2000, pp. 1-16. doi: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0283>.
2. Churchill R.A., Smith J.E., Clarc N.N., Turton R.A. Low-heat rejection engines – a concept review. *SAE Technical Paper Series*, 1989, pp. 25-36.
3. Kostyshyn V.S. *Modeling of operating modes of centrifugal pumps based on electro-hydraulic analogy*. Ivano-Frankivsk, 2000. 163 p. (Ukr.)
4. Service letter SL2019-671/JAP Available at: <https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019-671.pdf>. Last accessed 2023/08/11 (accessed 25 November 2022).

5. Service Letter SL2019-687/NHN Available at: https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019_687.pdf?sfvrsn=4fba319_6 (accessed 25 November 2022).
6. Service Experience - MAN B&W Two-stroke Engines Available at: https://maritimeexpert.files.wordpress.com/2016/service_experience.pdf (accessed 01 February 2023).
7. Pohorletsy D.S., Khudiakov I.V., Gritsuk I.V. Features of operation of the MAN - B&W 5S70ME-C marine engine lubrication system. Modern power plants in transport and technologies and equipment for their maintenance: proceedings of the 14-th Int. sci.-pract. conf. Kherson, 2023, pp. 402. (Ukr.)

Рецензент: Є.В. Білоусов
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 05.05.2023

Стаття прийнята 13.06.2023

УДК 656.621

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288182

© Дубинець О.І.*

РОЗРОБКА ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ФОРМАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРАЦІЇ НАВІГАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПІДВОДНОГО РОБОТА НА МАЛИХ ГЛИБИНАХ

Метою статті є підвищення ефективності вирішення завдань стабілізації підводних робіт на невеликих глибинах на основі комплексної обробки навігаційної інформації та її фільтрації з використанням теорії Калмана. Поставлена мета досягається шляхом визначення набору математичних залежностей для формалізації процесу фільтрації навігаційної інформації підводних робіт на основі комплексної обробки даних. У даному випадку фільтрація здійснюється за допомогою розподіленого набору фільтрів Калмана різної структури, які були підібрані з урахуванням характеристик оцінюваних даних. Встановлено, що на теперішній час підводні роботи на невеликих глибинах широко використовуються по всьому світу для різноманітних завдань, у тому числі пошукові операції та перевірки під водою. Однак експлуатація цих робіт характеризується складними умовами. Серед таких умов можна виділити невідомі параметри підводної навігації, вплив зовнішніх збурень, зміни маси, розмірів та гідродинамічних характеристик робіт під час роботи у воді. На теперішній час перспективним підходом до автоматизації управління рухомими об'єктами вважається концепція управління, що базується на інтелектуальних методах. Однак застосування таких регуляторів для підводних робіт разом із проблемами отримання актуальної навігаційної інформації ще не досягло достатньої ефективності. До того ж питання, пов'язані з розробкою системи обробки навігаційної інформації з використанням нелінійних фільтрів і створенням інтелектуальних регуляторів для підводних робіт, досі недостатньо висвітлені в науково-технічній літературі. Найбільш суттєвим результатом є отримання набору математичних залежностей для формалізації процесу фільтрації навігаційної інформації підводних робіт за допомогою набору розподілених фільтрів Калмана різної структури. Такі набори тісно корелюються з відповідними характеристиками оцінюваних даних. У цьому контексті інерційний модуль з алгоритмами фільтрації Калмана може використовуватись для вимірювання кутових параметрів руху та вирішення завдань стабілізації крену, диференту і рискання. У зв'язку з низькими швидкостями руху підводних робіт на невеликих глибинах і відсутністю високочастотних перешкод

* д-р технічних наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-3270-1218

у вимірах датчика тиску, дані від нього можуть бути використані для визначення вертикальної швидкості.

Ключові слова: підводний робот, роботизований комплекс, малі глибини, навігаційна інформація, стабілізація, формалізація, фільтрація, теорія Калмана.

O. Dubynets. Development of proposals for formalising the process of filtering navigation information of an underwater robot at shallow depths. The purpose of the article is to increase the efficiency of solving the problems of stabilising underwater robots at shallow depths based on complex processing of navigation information and its filtering using the Kalman theory. This goal is achieved by defining a set of mathematical dependencies for formalising the process of filtering navigation information of underwater robots based on complex data processing. In this case, the filtering is carried out using a distributed set of Kalman filters of different structures, which were selected considering the characteristics of the data being evaluated. It has been established that at present, underwater robots at shallow depths are widely used around the world for various tasks, including search operations and underwater inspections. However, the operation of these robots is characterised by difficult conditions. These conditions include unknown parameters of underwater navigation, the impact of external disturbances, changes in the mass, size and hydrodynamic characteristics of robots while operating in water. Currently, the concept of control based on intelligent methods is considered a promising approach to automating the control of moving objects. However, the use of such controllers for underwater robots, together with the problems of obtaining up-to-date navigation information, has not yet achieved sufficient efficiency. In addition, the issues related to the development of a navigation information processing system using nonlinear filters and the creation of intelligent controllers for underwater robots are still insufficiently covered in the scientific and technical literature. The most significant result is a set of mathematical dependencies for formalising the process of filtering navigation information of underwater robots using a set of distributed Kalman filters of different structures. Such sets are closely correlated with the relevant characteristics of the data being evaluated. In this context, the inertial module with Kalman filtering algorithms can be used to measure angular motion parameters and solve the problems of roll, pitch and yaw stabilisation. Due to the low speeds of underwater robots at shallow depths and the absence of high-frequency interference in the pressure sensor measurements, the data from the pressure sensor can be used to determine the vertical speed.

Key words: underwater robot, robotic complex, shallow depths, navigation information, stabilisation, formalisation, filtering, Kalman theory.

Постановка проблеми. У теперішній час підводні роботи на невеликих глибинах (ПРНГ) широко використовуються у світі для різних завдань, таких як пошукові операції та перевірки під водою. Однак практичне застосування цих роботів супроводжується складними умовами експлуатації. До таких умов відносяться невідомі умови підводної навігації, вплив зовнішніх збурень, зміни маси і габаритів і гідродинамічних параметрів роботів у процесі роботи під водою.

У теперішній час перспективним підходом до автоматизації управління рухомими об'єктами є концепція управління, заснована на інтелектуальних методах. Однак можливості використання таких регуляторів для підводних роботів разом з проблемами отримання актуальної навігаційної інформації ще є недостатньо ефективними. При цьому питання, пов'язані з розробкою системи обробки навігаційної інформації з використанням нелінійних фільтрів і створенням інтелектуальних регуляторів для підводних роботів, ще недостатньо висвітлені у науково-технічній літературі. Тому дана тема статті є актуальною і вимагає подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато вчених досліджують шляхи підвищення ефективності управління підводними роботами, наприклад, які визначені в роботах [1-10].

Так, конструкція підводного робота, на відміну від інших типів апаратів, пов'язана з критичними проблемами управління через складне нелінійне управління силою і поворотами. У статті [1] був запропонований надійний підхід для ефективного управління поведінкою підводного робота з п'ятьма ступенями свободи. Крім того, розробляючи новий тип пари двигунів з можливістю обертання на 360 градусів разом із масовим перемикачем, це дає можливість роботу, який легко і

з мінімальними енергетичними витратами швидко змінює свою глибину, максимально зберігати свою рівновагу.

У статті [2] наведена ефективна система управління конструкцією автономних підводних роботів. Цей підхід використовує вбудовану оперативну пам'ять, а не бічну систему управління для більшої надійності, і нечіткий логічний контролер на основі мікроконтролера для кращої стабілізації балансування робота в міру його руху вперед. Цей підхід був реалізований разом з нечітким пропорційним інтегральним контролером в якості супервайзера і продемонстрований експериментально.

У роботі [3] розглядається BYSQ-2 – амфібійний сферичний дослідницький робот, здатний гнучко пересуватися у воді і по суші, має хорошу стійкість до тиску води і може здійснювати обертальні рухи з нульовим радіусом повороту. Але реальні результати експерименту показують, що недоліком робота є низька максимальна швидкість стрибка напруги. Основною метою даної статті є поліпшення максимальної швидкості стрибків напруги і зменшення коливань важкого маятника.

У статті [4] описана математична модель гідродинамічної сили для моделювання впливу стінки на здійснення точного управління і маневреності підводного робота складної форми. Представлена гідродинамічна модель робота для використання в басейні ядерної реакції, що містить не тільки гідродинамічні коефіцієнти, але і член гідродинамічної сили стінки, що часто ігнорувалося для роботів, що використовуються в морі. По-перше, гідродинамічні коефіцієнти в моделі, включаючи в'язкий та інерційний коефіцієнти, були вирішені шляхом моделювання стаціонарного і нестационарного руху з використанням обчислювальної гідродинаміки. Далі за допомогою обчислювальної гідродинаміки рідини була розрахована гідродинамічна сила стінки для різних швидкостей і відстаней від стіни, а також визначена сфера впливу стінки. Нарешті, гідродинамічні коефіцієнти були експериментально виміряні без настінного ефекту і з урахуванням настінної гідродинамічної сили при різних умовах в резервуарі з циркулюючою водою. Результат продемонстрував точність гідродинамічного розрахунку з використанням обчислювальної гідродинаміки та підтвердив надійність гідродинамічної математичної моделі.

Метою статті [5] є огляд сучасних розробок в області підводної робототехніки щодо використання штучного інтелекту, особливо в навчанні моделей, управлінні роботами, сприйнятті і навігації, маніпулюванні ними.

У роботі [6] наведений огляд актуальних проблем підводної робототехніки в різних аспектах (проектування систем, комунікації, машинне навчання, картографування і координатія, адаптивне планування місій), а також інформація про наступне покоління підводних роботів.

Але всі наведені джерела не містять підходів щодо комплексної обробки навігаційної інформації та її фільтрації з використанням теорії Калмана для підвищення ефективності вирішення завдань стабілізації підводних роботів на невеликих глибинах.

Метою статті є підвищення ефективності вирішення завдань стабілізації підводних роботів на невеликих глибинах на основі комплексної обробки навігаційної інформації та її фільтрації з використанням теорії Калмана.

Виклад основного матеріалу. ПРНГ, що досліджується в статті, призначений для виконання пошукових і дослідницьких операцій під водою на невеликих глибинах. Управління ПРНГ здійснюється за допомогою двох пар гвинтів, розташованих уздовж поздовжньої і вертикальної осей. Така система управління дозволяє стабілізувати вертикальне переміщення і підтримувати заданий курс, але вона обмежена в можливості вирішення завдань позиціонування. Для виконання маневрів або руху по заданій траєкторії потрібні спеціалізовані алгоритми управління.

Узагальнена архітектура ПРНГ наведена на рис. 1.

Введемо такі обмеження та припущення:

- розташування гвинтів, світлодіодів й обладнання всередині корпусу забезпечує практично однакове вертикальне розташування центрів ваги і тиску ПРНГ;
- робот має хороший баланс і відсутність статичного крену і диференту;
- швидкості робота за поздовжньою і вертикальною осями є незначними;
- з огляду на невелику робочу глибину можна знехтувати збуреннями у вертикальній площині для ПРНГ.

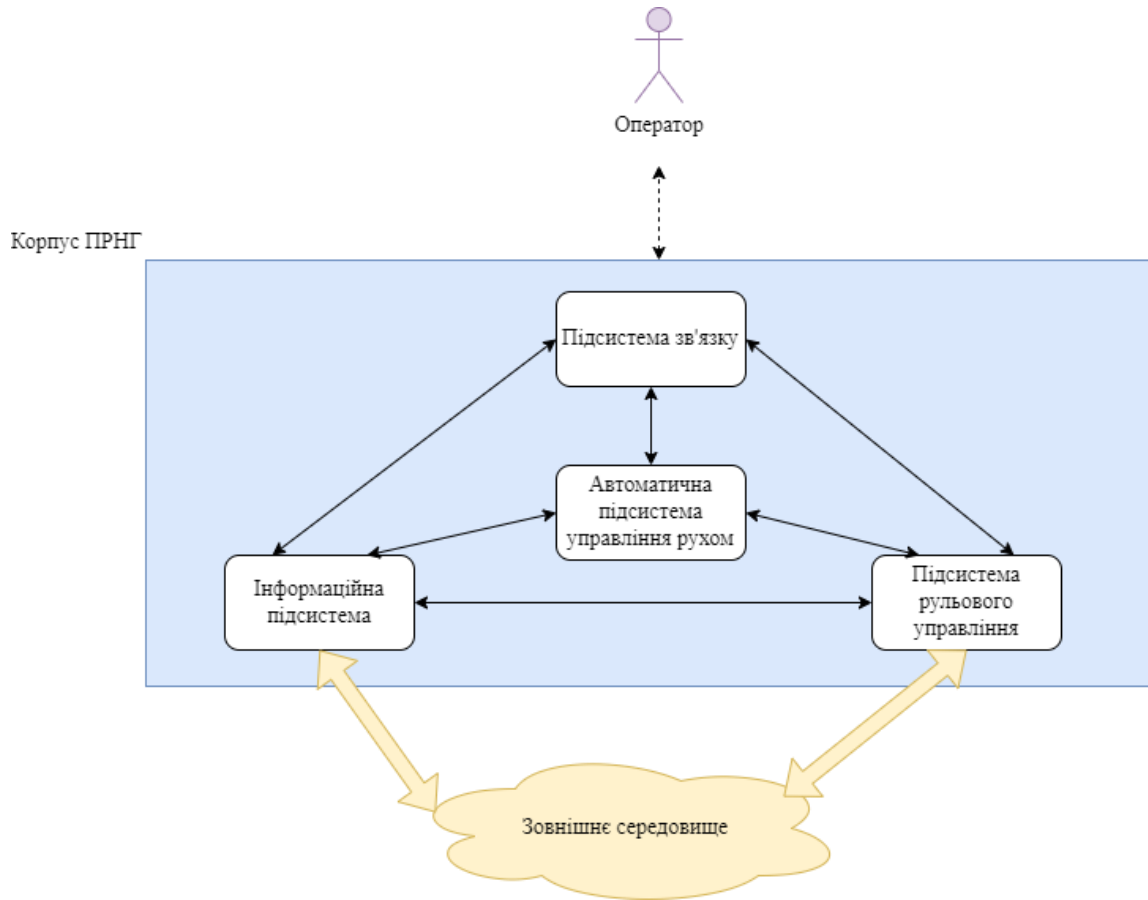


Рис. 1 – Узагальнена архітектура ПРНГ

Інформаційна система ПРНГ (див. рис. 1) має у своєму складі набір навігаційних датчиків і відеокамеру. Основним засобом отримання навігаційної інформації є модуль, що складається з мікромеханічних акселерометрів, гіроскопів і магнітометрів. Крім того, малогабаритний підводний робот має датчик тиску для вимірювання глибини занурення. У зв'язку з цим виникає завдання комплексної обробки вимірювань з метою отримання оцінок кутових переміщень і лінійних швидкостей для застосування алгоритмів керування. Основним недоліком інерціальної навігації є накопичення похибок вимірювань з плином часу. Основними джерелами цих похибок є похибки в гіроскопах і акселерометрах.

Основна концепція системи обробки інформації полягає в поділі складної системи на окремі канали або шляхи з паралельною оцінкою кутів Ейлера і кутових швидкостей. Отримані оцінки будуть використані для уточнення уявного прискорення ПРНГ, що дозволить отримати оцінки лінійних швидкостей.

Розрахункові кути, отримані з акселерометрів, і кутові швидкості, виміряні гіроскопами, використовуються для обробки даних за окремими траєкторіями.

Вхідні дані з акселерометрів характеризуються наявністю високочастотних перешкод. Гіроскопи, в свою чергу, мають деякі постійні зсуви через дрейф. Для спільної обробки цих даних розглядаються фільтри Калмана різної структури.

Пропонуємо використовувати спрощений фільтр другого порядку, заснований на принципі розподілу інформації. Для цього дані, отримані з акселерометра, коригуються за допомогою вимірювань, отриманих з гіроскопа, а також оцінюється зміщення гіроскопа. Математичні вирази для обчислення цього фільтра є такими:

$$\begin{bmatrix} \overline{P_{11}} & \overline{P_{12}} \\ \overline{P_{21}} & \overline{P_{22}} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} P_{11} + h(P_{22}h - P_{12} - P_{21} + Q_{\omega}^2 h) & P_{12} - P_{22}h \\ P_{21} - P_{22}h & P_{22} \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{\overline{P_{11}}}{\overline{P_{11}} + R_\theta}; \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{\overline{P_{21}}}{\overline{P_{11}} + R_\theta}, \quad (3)$$

де $P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$ – елементи коваріаційної матриці оцінок;

K_1, K_2 – посилення фільтра Калмана;

h – період відбору проб;

Q_ω, R_θ – дисперсія вимірювання кутової швидкості та кута.

Для розрахунку кута крену і оцінок переміщення, реконструйованих за допомогою фільтра Калмана, використовують такий порядок розрахунку:

$$\overline{\hat{\theta}_{k+1}} = \overline{\hat{\theta}_k} + h(\omega_{x_k} - \widehat{\omega}_{xb_k}); \quad (4)$$

$$\hat{\theta}_{k+1} = \overline{\hat{\theta}_{k+1}} + K_1(\theta_{k+1} - \overline{\hat{\theta}_{k+1}}); \quad (5)$$

$$\widehat{\omega}_{xb_{k+1}} = \widehat{\omega}_{xb_{k+1}} + K_2(\theta_{k+1} - \overline{\hat{\theta}_{k+1}}), \quad (6)$$

де $\hat{\theta}$ – оцінка кута крену;

$\widehat{\omega}_{xb}$ – оцінка змішування гіроскопа;

ω_x – кутова швидкість, виміряна гіроскопом;

θ – кут крену, розрахований за даними акселерометра.

Коваріаційна матриця оцінок розраховується так:

$$\begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \overline{P_{11}}(1 - K_1) & \overline{P_{12}}(1 - K_1) \\ \overline{P_{21}} - K_2\overline{P_{11}} & \overline{P_{22}} - K_2\overline{P_{21}} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Запропонований фільтр показав ефективність зменшення кута крену і диференту. Однак у випадку з кутом рискання траєкторії похибки збільшувалися через наявність низькочастотного порушення, такого як витрата. В якості альтернативи розглядався розширений фільтр Калмана третього порядку, який містив додаткову оцінку збурень. Математичні вирази для обчислення цього фільтра є такими:

$$\begin{bmatrix} \overline{P_{11}} & \overline{P_{12}} & \overline{P_{13}} \\ \overline{P_{21}} & \overline{P_{22}} & \overline{P_{23}} \\ \overline{P_{31}} & \overline{P_{32}} & \overline{P_{33}} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} P_{11} + hP_{21} + h(P_{12} + hP_{22}) & P_{12} + hP_{22} + h(P_{13} + hP_{23}) & P_{13} + hP_{23} \\ P_{21} + hP_{31} + h(hP_{32} + P_{22}) & P_{22} + hP_{32} + h(hP_{33} + P_{23}) & P_{23} + hP_{33} \\ P_{31} + hP_{32} & P_{32} + hP_{33} & P_{33} + (Q_\omega h)^2 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} \overline{P_{22}} + R_\omega & -\overline{P_{12}} \\ -\overline{P_{21}} & \overline{P_{11}} + R_\varphi \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \\ K_{31} & K_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{P_{11}}Y_{22} + \overline{P_{12}}Y_{21} & \overline{P_{12}}Y_{11} + \overline{P_{11}}Y_{12} \\ \overline{P_{21}}Y_{22} + \overline{P_{22}}Y_{21} & \overline{P_{22}}Y_{11} + \overline{P_{21}}Y_{12} \\ \overline{P_{31}}Y_{22} + \overline{P_{32}}Y_{21} & \overline{P_{32}}Y_{11} + \overline{P_{31}}Y_{12} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Для розрахунку оцінки кута рискання, реконструйованої за допомогою фільтра Кальмана, використовується такий розрахунковий підхід:

$$\hat{\varphi}_{k+1} = \hat{\varphi}_k + h\hat{\omega}_{y_k}; \quad (11)$$

$$\overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}} = \overline{\hat{\omega}_{y_k}} + h\hat{\mu}_k; \quad (12)$$

$$\overline{\hat{\mu}_{y_{k+1}}} = \overline{\hat{\mu}_{y_k}} + h\omega_k; \quad (13)$$

$$\hat{\varphi}_{k+1} = \overline{\hat{\varphi}_{k+1}} + K_{11}(\varphi_{k+1} - \overline{\hat{\varphi}_{k+1}}) + K_{12}(\omega_{y_{k+1}} - \overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}}); \quad (14)$$

$$\hat{\omega}_{y_{k+1}} = \overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}} + K_{21}(\varphi_{k+1} - \overline{\hat{\varphi}_{k+1}}) + K_{22}(\omega_{y_{k+1}} - \overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}}); \quad (15)$$

$$\hat{\mu}_{y_{k+1}} = \overline{\hat{\mu}_{y_{k+1}}} + K_{31}(\varphi_{k+1} - \overline{\hat{\varphi}_{k+1}}) + K_{32}(\omega_{y_{k+1}} - \overline{\hat{\omega}_{y_{k+1}}}), \quad (16)$$

де φ – кут рискання;

μ – марковський процес, який оцінює зменшене низькочастотне обурення;

K_{ij} – елементи вектора коефіцієнтів;

R_ω та R_φ – дисперсія шуму, вимірювання кута рискання і кутової швидкості.

Результатом формалізації відповідно до виразів (8)–(16) є коваріаційна матриця оцінок.

Результати випробувань показали, що використання розширеного фільтра Калмана призводить до більш точних оцінок кута повороту модуля ПРНГ. Введення додаткового коефіцієнта зворотного зв'язку дозволяє поліпшити швидкість реакції фільтра. Однак розширений фільтр вимагає більш ретельного налаштування. Для ефективної роботи в умовах хвильових збурень необхідно динамічно регулювати коваріацію збурення, що призводить до додаткового обчислювального навантаження на контролер ПРНГ. В таких умовах більш ефективні фільтри другого порядку. Також слід зазначити, що хвильове обурення впливає на рух ПРНГ тільки у приповерхневому шарі. Для досягнення точних оцінок лінійних швидкостей особлива увага приділяється високій частоті збору даних з гіроскопів і акселерометрів. З метою прискорення обробки даних були проведені оцінки лінійної швидкості для різних частот.

Висновки

Таким чином, у даній статті запропоновано набір математичних залежностей, який формалізує процес фільтрації навігаційної інформації для ПРНГ за допомогою комплексної обробки даних. Фільтрація здійснюється за допомогою набору розподілених фільтрів Калмана різної структури, які були підібрані відповідно до характеристик оцінюваних даних. При цьому інерційний модуль з алгоритмами фільтрації Калмана може бути використаний для вимірювання кутових параметрів руху і вирішення завдань стабілізації крену, диференту і рискання. Завдяки відсутності високочастотних перешкод у вимірах датчика тиску і низьких швидкостей руху ПРНГ, дані датчика можуть бути використані для визначення вертикальної швидкості.

Перелік використаних джерел:

1. Jebelli A., Yagoub M.C.E., Dhillon B.S. Design and Control of Underwater Robots with Rotating Thrusters. *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*. 2016. Vol. 5, № 4. Pp. 284-294. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijra.v5i4.pp284-294>.
2. Design and construction of an underwater robot based fuzzy logic controller / A. Jebelli, M.C.E. Yagoub, R.H.J. Abdul Rahim, H. Kazemi. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2013. Vol. 7(1). Pp. 147-153.
3. Liu Z., Zhou X. Hydrodynamic Analysis and Structural Optimization of an Underwater Robot. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 649(1). Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/649/1/012017>.
4. Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamics and prototype test / Z. Li, J. Tao, H. Sun, Y. Luo, L. Ding, Z. Deng. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017. Vol. 9(11). Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1177/1687814017734500>.

5. Recent Advances in AI for Navigation and Control of Underwater Robots / L. Christensen, J. de Gea Fernández, M. Hildebrandt, C.E. Siegfried Koch, B. Wehbe. *Current Robotics Reports*. 2022. Vol. 3. Pp. 165-175. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00088-3>.
6. AI technology for underwater robots / F. Kirchner, S. Straube, D. Kühn, N. Hoyer. Springer, 2020. 193 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30683-0>.
7. Roehr T.M., Kirchner F. Spatio-temporal planning for a reconfigurable multi-robot system. *Proceedings of the 4th workshop on planning and robotics (PlanRob)*. London, 2016. Pp. 135-146.
8. ROSPlan: Planning in the robot operating system / M. Cashmore, M. Fox, D. Long, D. Magazzeni, B. Ridder, A. Carrera, N. Palomeras, N. Hurtos, M. Carreras. *Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling*. 2015. Vol 25. Pp 333-341. DOI: <https://doi.org/10.1609/icaps.v25i1.13699>.
9. Braginsky B., Guterman H. Obstacle avoidance approaches for autonomous underwater vehicle: simulation and experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2016. Vol. 41(4). Pp. 882-92. DOI: <https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2506204>.
10. Deep learning on underwater marine object detection: a survey / M. Moniruzzaman, S.M.S. Islam, M. Bennamoun, P. Lavery. *International conference on advanced concepts for intelligent vision systems*. 2017. Pp. 150-160. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70353-4_13.

References:

1. Jebelli A., Yagoub M.C.E., Dhillon B.S. Design and Control of Underwater Robots with Rotating Thrusters. *International Journal of Robotics and Automation (IJRA)*, 2016, vol. 5, № 4, pp. 284-294. doi: <https://doi.org/10.11591/ijra.v5i4.pp284-294>.
2. Jebelli A., Yagoub M.C.E., Abdul Rahim R.H.J., Kazemi H. Design and construction of an underwater robot based fuzzy logic controller. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 2013, vol. 7(1), pp. 147-153.
3. Liu Z., Zhou X. Hydrodynamic Analysis and Structural Optimization of an Underwater Robot. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 649(1), pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/649/1/012017>.
4. Li Z., Tao J., Sun H., Luo Y., Ding L., Deng Z. Hydrodynamic calculation and analysis of a complex-shaped underwater robot based on computational fluid dynamics and prototype test. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, vol. 9(11), pp. 1-10. doi: <https://doi.org/10.1177/1687814017734500>.
5. Christensen L., de Gea Fernández J., Hildebrandt M., Siegfried Koch C.E., Wehbe B. Recent Advances in AI for Navigation and Control of Underwater Robots. *Current Robotics Reports*, 2022, vol. 3, pp. 165-175. doi: <https://doi.org/10.1007/s43154-022-00088-3>.
6. Kirchner F., Straube S., Kühn D., Hoyer N. *AI technology for underwater robots*. Springer, 2020. 193 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-30683-0>.
7. Roehr T.M., Kirchner F. Spatio-temporal planning for a reconfigurable multi-robot system. *Proceedings of the 4th workshop on planning and robotics (PlanRob)*, London, 2016, pp. 135-146.
8. Cashmore M., Fox M., Long D., Magazzeni D., Ridder B., Carrera A., Palomeras N., Hurtos N., Carreras M. ROSPlan: Planning in the robot operating system. *Proceedings of the international conference on automated planning and scheduling*, 2015, vol 25, pp 333-341. doi: <https://doi.org/10.1609/icaps.v25i1.13699>.
9. Braginsky B., Guterman H. Obstacle avoidance approaches for autonomous underwater vehicle: simulation and experimental results. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2016, vol. 41(4), pp. 882-92. doi: <https://doi.org/10.1109/JOE.2015.2506204>.
10. Moniruzzaman M., Islam S.M.S., Bennamoun M., Lavery P. Deep learning on underwater marine object detection: a survey. *International conference on advanced concepts for intelligent vision systems*, 2017, pp. 150-160. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70353-4_13.

Рецензент: О.М. Тимошук
д-р техн. наук, проф., ДУІТ

Стаття надійшла 05.03.2023
Стаття прийнята 13.05.2023

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ УПРАВЛІННЯ ПОШУКОМ НАДВОДНИХ ТА ПІДВОДНИХ ОБ'ЄКТІВ ГІБРИДНИМ РОБОТИЗОВАНИМ КОМПЛЕКСОМ

Одним з важливих наукових завдань організації управління пошуком надводних та підводних об'єктів є забезпечення оперативності та безаварійного руху гібридного роботизованого комплексу в режимах переходу та виконання пошукової операції. Аналіз сучасних методів управління пошуком надводних та підводних об'єктів роботизованими апаратами в пошукових роботах, наукових та природоохоронних дослідженнях, моніторингу, інспекційних та воєнних підводних роботах показує необхідність застосування гібридних роботизованих комплексів. У рамках інтелектуалізації процесу планування маршруту актуальним є вирішення завдання синтезу оптимальної траєкторії руху для забезпечення виконання пошуку у всіх визначених районах проведення операції. У роботі вирішено завдання організації управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом, а саме, побудова маршруту в області інтересу як оптимальної сплайн-траєкторії об'єкта, що рухається. Визначено можливість побудови навігаційної функції за рахунок ефективного використання кривизни сплайн-траєкторії як репродуктивного шаблону для побудови аксонометричної проекції. Для виконання поставленого завдання в роботі удосконалено метод управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом шляхом формалізації процесів планування маршруту руху гібридного роботизованого комплексу та процесів обробки інформації, прогнозування навігаційної обстановки та вибору стратегії запобігання небезпечних ситуацій, за рахунок поєднання інтелектуальних та численних методів. Розроблений алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу дозволяє автоматизоване формування сплайн-траєкторій у режимі реального часу із синхронним поданням інформації про параметри маршруту руху в систему управління гібридним роботизованим комплексом. Даний підхід дозволяє автоматизувати процес пошукової операції та застосовувати його в концепції CoCoRo та e-Navigation.

Ключові слова: пошук на морі, надводний об'єкт, підводний об'єкт, гібридний роботизований комплекс, автономний ненаселений підводний апарат, безекіпажне пошукове судно.

O.V. Levchenko, M.V. Borina. Improving the method of controlling the search for surface and underwater objects by a hybrid robotic complex. One of the important scientific tasks of organising the control of searching for surface and underwater objects is to ensure the efficiency and trouble-free movement of a hybrid robotic complex in the modes of transition and search operation. An analysis of modern methods of controlling the search for surface and underwater objects by robotic vehicles in search operations, scientific and environmental research, monitoring, inspection and military underwater operations shows the need to use hybrid robotic systems. As part of the intellectualisation of the route planning process, it is relevant to solve the problem of synthesising an optimal trajectory to ensure that the search is carried out in all designated areas of the operation. The paper solves the problem of organising the management of searching for surface and underwater objects by a hybrid robotic complex, namely, building a route in the area of interest as an

¹ канд. екон. наук, доцент, здобувачка ступеня Phd, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0001-7659-347X, olevchenko76@gmail.com

² здобувачка ступеня Phd, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0009-0007-4859-8477, margo_borina@ukr.net

optimal spline trajectory of a moving object. The possibility of constructing a navigation function through the effective use of the curvature of the spline trajectory as a reproductive template for constructing an axonometric projection is determined. To accomplish this task, the paper improves the method of controlling the search for surface and underwater objects by a hybrid robotic complex by formalising the processes of planning the route of the hybrid robotic complex and the processes of information processing, forecasting the navigation situation and choosing a strategy for preventing dangerous situations by combining intelligent and numerical methods. The developed algorithm for constructing a search route for a hybrid robotic complex allows automated formation of spline trajectories in real time with synchronous submission of information about the parameters of the route to the control system of the hybrid robotic complex. This approach makes it possible to automate the search operation process and apply it in the CoCoRo and e-Navigation concepts.

Key words: search at sea, surface object, underwater object, hybrid robotic complex, autonomous unmanned underwater vehicle, unmanned search vessel.

Постановка проблеми. Роботизовані комплекси стають важливим інструментом для морських операцій з пошуку надводних та/або підводних об'єктів [1]. Аналіз проведених пошукових операцій показує, що для досягнення високої продуктивності виконання надводних та підводних робіт необхідне групове застосування автономних ненаселених підводних апаратів (АНПА), безкіпажних пошукових суден (БПС) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Тому основним напрямком підвищення продуктивності пошуку надводних та/або підводних об'єктів є створення гібридних роботизованих комплексів. У даному комплексі здійснюється групове застосування АНПА, БПС та БПЛА, які одночасно виконують спільну місію. Особливо ефективним таке застосування є для пошукових робіт, до яких висуваються жорсткі обмеження за часом виконання місії. Варіант схеми гібридного роботизованого комплексу зображено на рис. 1.

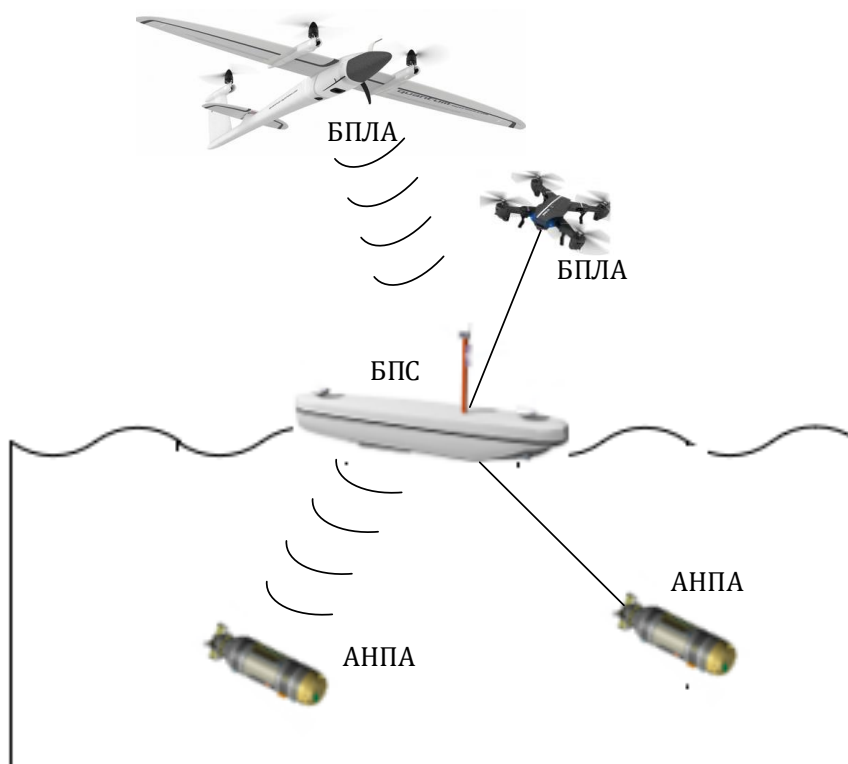


Рис. 1 – Варіант схеми гібридного роботизованого комплексу

До головних переваг гібридного роботизованого комплексу слід віднести:

- високу продуктивність надводних та підводних пошукових робіт, оскільки вони виконуються на великих за площею акваторіях із залученням роботизованих апаратів, причому їх кількість може змінюватись у залежності від вимог до загальної тривалості пошукової операції;
- низькі фінансові витрати на проведення морських операцій, оскільки для їх проведення застосовують дешеві АНПА, собівартість створення яких на 2-3 порядки нижча за собівартість традиційних АНПА малого класу.

До основних недоліків застосування гібридного роботизованого комплексу можна віднести:

- складність автоматизації узгодженої роботи апаратів, що входять до складу гібридного роботизованого комплексу при виконанні спільної пошукової операції;
- складність розробки системи автоматичного попередження аварійних ситуацій в умовах складної навігаційної обстановки;
- складність організації системи зв'язку між елементами комплексу та береговим центрами керування пошуковою операцією;
- ризики втрати частини апаратів гібридного роботизованого комплексу внаслідок впливу факторів навігаційної обстановки, збоїв програмного забезпечення системи автоматизованого управління чи технічних відмов окремих апаратів.

Складність управління гібридним роботизованим комплексом полягає в оперативному плануванні безпечного маршруту руху у процесі пошуку надводних та/або підводних об'єктів. Це накладає необхідність врахування множини параметрів при побудові маршруту зі зміною районів пошуку, із забезпеченням оперативності та безпеки пошукової операції. Відомі методи планування маршруту або мають високу обчислювальну складність, або не дозволяють знайти траєкторію, оптимальну за довжиною шляху. Це не дозволяє використовувати їх в системах, де необхідно планування маршруту в режимі реального часу з умовою мінімізації переміщення.

Для формальної постановки задачі планування маршруту гібридного роботизованого комплексу в пошуковій операції надводних та підводних об'єктів в роботі введено позначення, наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Позначення для формальної постановки задачі планування

Позначення	Значення
$\{x_0, x_n, x_f\} \in X$ $\{y_0, y_n, y_f\} \in Y$	Координати початкової, проміжних та кінцевої точок, які мають належати множині всіх точок маршруту пошуку
$x_i \in X, y_i \in Y$	Координати маршруту пошуку в момент часу $t_i \in T^{route}$
$U = f(x, y)$	Навігаційна функція для побудови маршруту руху гібридного роботизованого комплексу
$x^{obs} \in Z_{int}, y^{obs} \in Z_{int}, D_{obs}^{safe}$	Координати навігаційних перешкод та дистанція безпечного розходження, що знаходяться в області інтересу в операції пошуку
Z_{int}	Область інтересу в операції пошуку
$R_i^Z \in Z_{int}$	Район проведення пошуку
p^{route}	Курсовий параметр проходу маршруту повз перешкоду

Під інтелектуальним плануванням маршруту розуміється синтез переведення роботизованого апарату з деякого вихідного стану до функціонально-цільового шляхом фіксування його координат у кінцевому навігаційному просторі. Планом маршруту гібридного роботизованого комплексу є така навігаційна функція $U = f(x, y)$, яка дозволяє здійснити рух з початкової точки $x_0 \in X$ в кінцеву точку $x_f \in X$ та проходить через всі визначені проміжні точки $x_n \in X$, причому

точки $x^{obs} \notin X$, $y^{obs} \notin Y$ та $p^{route} \geq D_{obs}^{safe}$. Для синтезу маршруту гібридного роботизованого комплексу необхідно знайти таку:

$$U = f(x, y), \quad (1)$$

за умов

$$\begin{cases} x_0, x_f, x_n \in X \\ y_0, y_n, y_f \in Y \\ x^{obs} \notin X, y^{obs} \notin Y \\ p^{route} \geq D_{obs}^{safe} \end{cases}, \quad (2)$$

при якій

$$\begin{cases} T^{route} \rightarrow \min \\ P_{safe}^{route} \rightarrow \max \end{cases}, \quad (3)$$

де T^{route} – загальний час проходження маршруту; P_{safe}^{route} – ймовірність безаварійного проходження маршруту.

Для розв'язання поставленої задачі необхідна розробка низьковитратного за обчислювальними ресурсами алгоритму, який дозволить планування маршруту руху гібридного роботизованого комплексу в режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішенню науковій проблематики автоматичного групового керування роботизованими комплексами та застосування їх для пошуку підводних та надводних об'єктів присвячено значну кількість досліджень.

Так, робота [2] присвячена вирішенню завдань організації сумісних узгоджених дій групи АНПА. У роботі запропоновано узагальнений підхід до виконання спільних дій різними роботизованими апаратами. У роботі [3] викладені результати, що були отримані під час виконання європейського проекту «GREX», який спільно виконувався університетами та робототехнічними фірмами Євросоюзу, які є важливим внеском в теорію та практику морської робототехніки. Методам автоматизації групового керування автономними не населеними підводними апаратами пошукового типу присвячена робота [4], в якій автор на основі реалізації принципів адгезії, когезії та вирівнювання розробив систему автоматичного керування веденим АНПА як «агентом» групи шляхом введення нечітких регуляторів, що виключає аварійне зіткнення з сусідніми АНПА групи та розпад групи через втрату сенсорного контакту між ними. Аналіз можливості висвітлення надводної обстановки в Азовському морі за допомогою використання безекіпажних морських роботизованих систем (комплексів) наведено в роботі [5]. Властивості морських ссавців, які знайшли та можуть знайти застосування в майбутньому, під час створення надводних і підводних роботизованих апаратів і морських озброєнь, визначені та проаналізовані у роботі [6]. У роботі [7] наведено розроблену узагальнену структуру систему автоматичного керування самохідним прив'язним підводним апаратом, яка дасть змогу зменшити навантаження на оператора та підвищити ефективність технології моніторингу. Проблеми створення систем керування морськими роботизованими комплексами вирішуються у роботах [8, 9]. Завдання локалізації, навігації та комунікації при сумісних діях морських роботизованих комплексів розглянуті у роботах [10-11]. Питання формування та утримання групи роботизованих апаратів у процесі сумісного виконання завдання розглянуто у роботі [12].

Проте, у наведених роботах не в повній мірі розкриті питання автоматизації управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом.

Мета дослідження полягає в удосконаленні методу управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом в умовах близькості навігаційних небезпек для підвищення оперативності та безпеки при виконанні ними спільної пошукової операції.

Виклад основного матеріалу. Процес вирішення завдань пошуку надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом, складається з таких етапів:

- Етап 1. Отримання та аналіз умов завдання на пошук надводного або підводного об'єкта.
- Етап 2. Визначення областей пошуку.
- Етап 3. Розподіл групи АПА на підгрупи та постановка часткових завдань.

Етап 4. Планування узгоджених маршрутів руху до областей інтересу кожній підгрупі АПА.

Етап 5. Реалізація управлінь узгодженими діями підгруп АПА до областей пошуку з обходом перешкод та запобіганням можливим зіткненням зі стаціонарними та мобільними об'єктами.

Етап 6. Виконання завдання в області пошуку.

Етап 7. Вихід та рух в район збору з обходом перешкод та запобіганням зіткненням.

Згідно до етапів процесу вирішення завдань пошуку надводних та підводних об'єктів було розроблено метод управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом (рис. 2).

Завдання на пошук, що передається групі засобів пошуку гібридного роботизованого комплексу, подається у формалізованому вигляді, що дозволяє в бортових системах планувати та реалізувати подальші дії групи, підгруп та окремих АПА та БПС. Було сформовано склад опису типових цільових завдань пошуку:

- вид необхідного пошуку: на площі, лінії, вторинний пошук (пошук за викликом), моніторинг;
- опис об'єктів пошуку;
- опис області пошуку;
- вимоги щодо оцінки ефективності пошуку.

Відповідно до опису цільової задачі формується область інтересу пошукової операції та райони пошуку надводних та/або підводних об'єктів.



Рис. 2 – Удосконалений метод управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом (джерело: розроблено автором)

Основним етапом в процесі управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом є планування маршруту пошуку для підгрупи в області інтересу, оскільки від нього залежить оперативність, ефективність та безпека пошукової операції. Для планування маршруту пошуку для підгрупи в області інтересу запропоновано алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу. Схема алгоритму наведена на рис. 3.

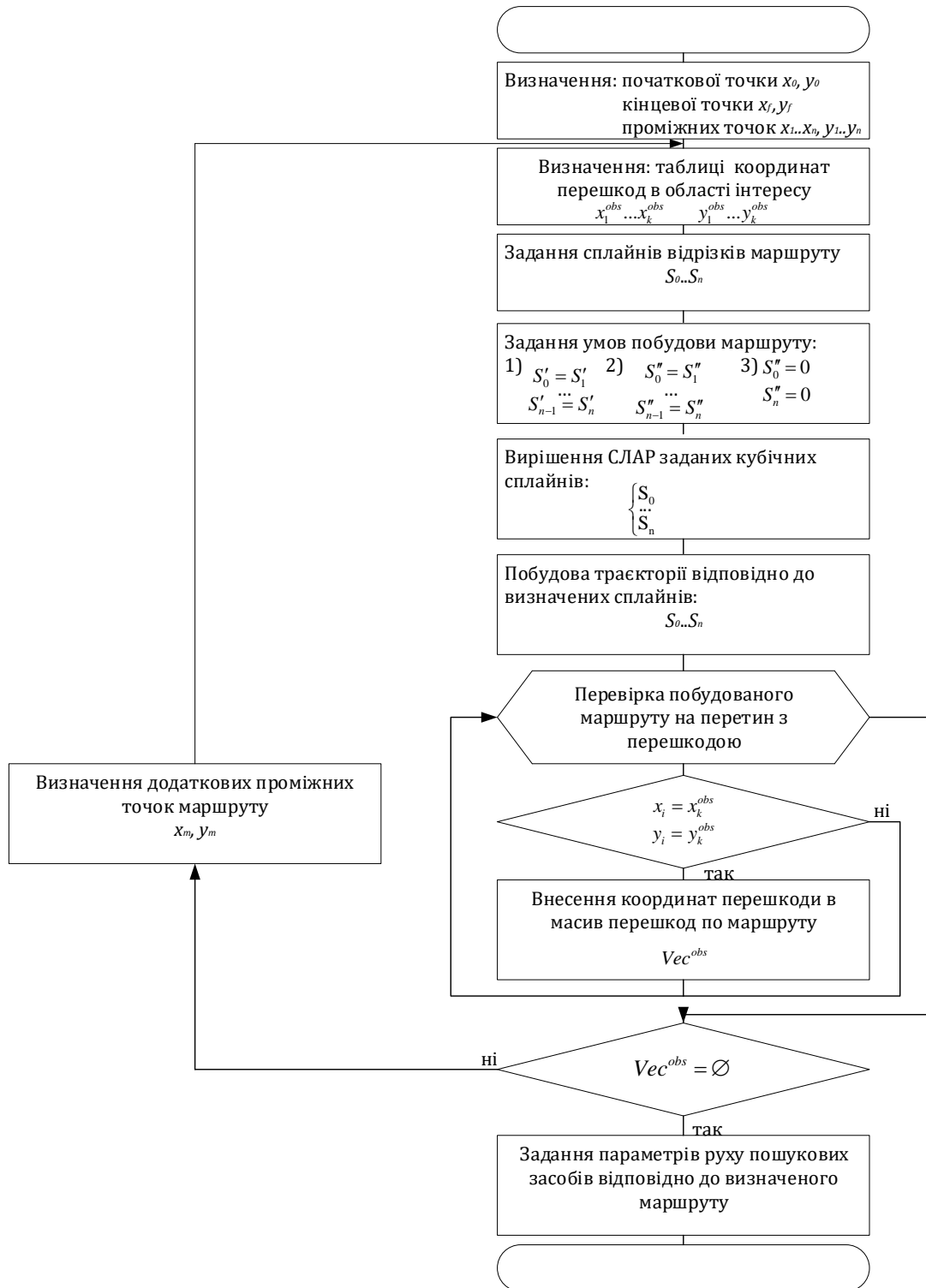


Рис. 3 – Схема алгоритму побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу (джерело: розроблено автором)

Для формування маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу застосовано підхід на основі інтерполяції кубічними сплайнами [13]. На першому етапі визначаються координати початкової точки початку та кінця маршруту. Координати проміжних точок визначаються відповідно до районів пошуку (РП). А саме вибираються точки входу та виходу з району пошуку. Черговість обходу районів пошуку визначається згідно ймовірності знаходження та важливості об'єктів пошуку в цих районах (рис. 4).

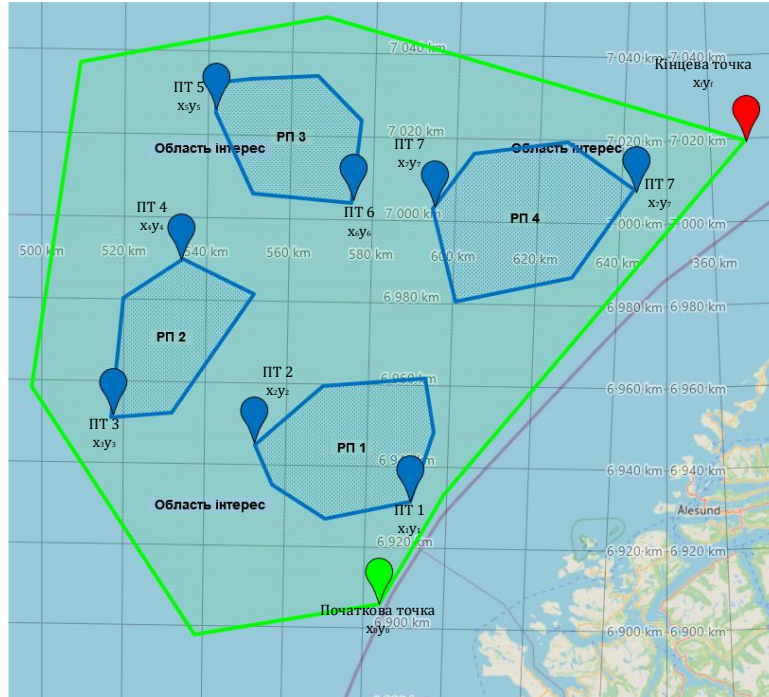


Рис. 4 – Схема області інтересу та районів пошуку та визначення початкової, кінцевої та проміжних точок маршруту (джерело: розроблено автором)

На наступному етапі виконується задання сплайнів відрізків маршруту відповідно до визначених початкової, кінцевої та проміжних точок за виразом:

$$\begin{aligned}
 S_0 &= a_0 + b_0(x - x_0) + c_0(x - x_0)^2 + d_0(x - x_0)^3 \\
 S_1 &= a_1 + b_1(x - x_1) + c_1(x - x_1)^2 + d_1(x - x_1)^3 \\
 &\dots \\
 S_n &= a_n + b_n(x - x_n) + c_n(x - x_n)^2 + d_n(x - x_n)^3
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

де S_0, S_1, \dots, S_n – сплайни відрізків маршруту відповідно до точок маршруту;

x_0, x_1, \dots, x_n – координати початкової точки відрізка;

x – координата кінцевої точки відрізка;

a, b, c, d – коефіцієнти сплайна.

Для формування маршруту необхідно задати граничні умови, що формують кривизну та початок і кінець маршруту. Умови визначаються виразами:

1) Для визначення кута входу в точку маршруту:

$$\begin{aligned}
 S'_0 &= S'_1 \\
 S'_{n-1} &= S'_n
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

2) Для визначення кривизни проходу в точки маршруту:

$$\begin{aligned} S_0'' &= S_1'' \\ S_{n-1}'' &= S_n'' \end{aligned} \quad (6)$$

3) Для визначення умови початку та кінця маршруту:

$$\begin{aligned} S_0'' &= 0 \\ S_n'' &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

В результаті формується система лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} S_0 = a_0 + b_0(x - x_0) + c_0(x - x_0) + d_0(x - x_0) \\ S_1 = a_1 + b_1(x - x_1) + c_1(x - x_1) + d_0(x - x_1) \\ \dots \\ S_n = a_n + b_n(x - x_n) + c_n(x - x_n) + d_n(x - x_n) \\ S_0' = b_0 + 2c_0(x - x_0) + 3d_0(x - x_0)^2 \\ \dots \\ S_{n-1}' = b_{n-1} + 2c_{n-1}(x - x_{n-1}) + 3d_{n-1}(x - x_{n-1})^2 \\ S_0'' = 2c_0 + 6d_0(x - x_0) \\ \dots \\ S_{n-1}'' = 2c_{n-1} + 6d_{n-1}(x - x_{n-1}) \\ S_0'' = 0 \\ S_n'' = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Вирішення системи лінійних рівнянь (8) дозволяє визначити коефіцієнти сплайнів та підставити їх у навігаційну функцію:

$$U = f(x, y), \quad (9)$$

для кожного відрізка маршруту. Інтерполяція навігаційної функції U виконується множенням значень x , де $x \in [x_0, x_f]$ на розрахункові сплайнові скалярні коефіцієнти a, b, c, d при фінальному підсумовуванні отриманих алгебраїчних елементів в кожному відрізку, що заданий відповідним сплайном.

$$U = \begin{cases} y_0 = a_0 + b_0(x) + c_0(x)^2 + d_0(x)^3, \text{ де } x \in [x_0, x_1] \\ y_1 = a_1 + b_1(x) + c_1(x)^2 + d_0(x)^3, \text{ де } x \in [x_1, x_2] \\ \dots \\ y_n = a_n + b_n(x) + c_n(x)^2 + d_n(x)^3, \text{ де } x \in [x_n, x_f] \end{cases} \quad (10)$$

Геометрична інтерпретація синтезу маршруту руху гібридного роботизованого комплексу на основі підходу інтерполяції кубічними сплайнами показана на рис. 5.

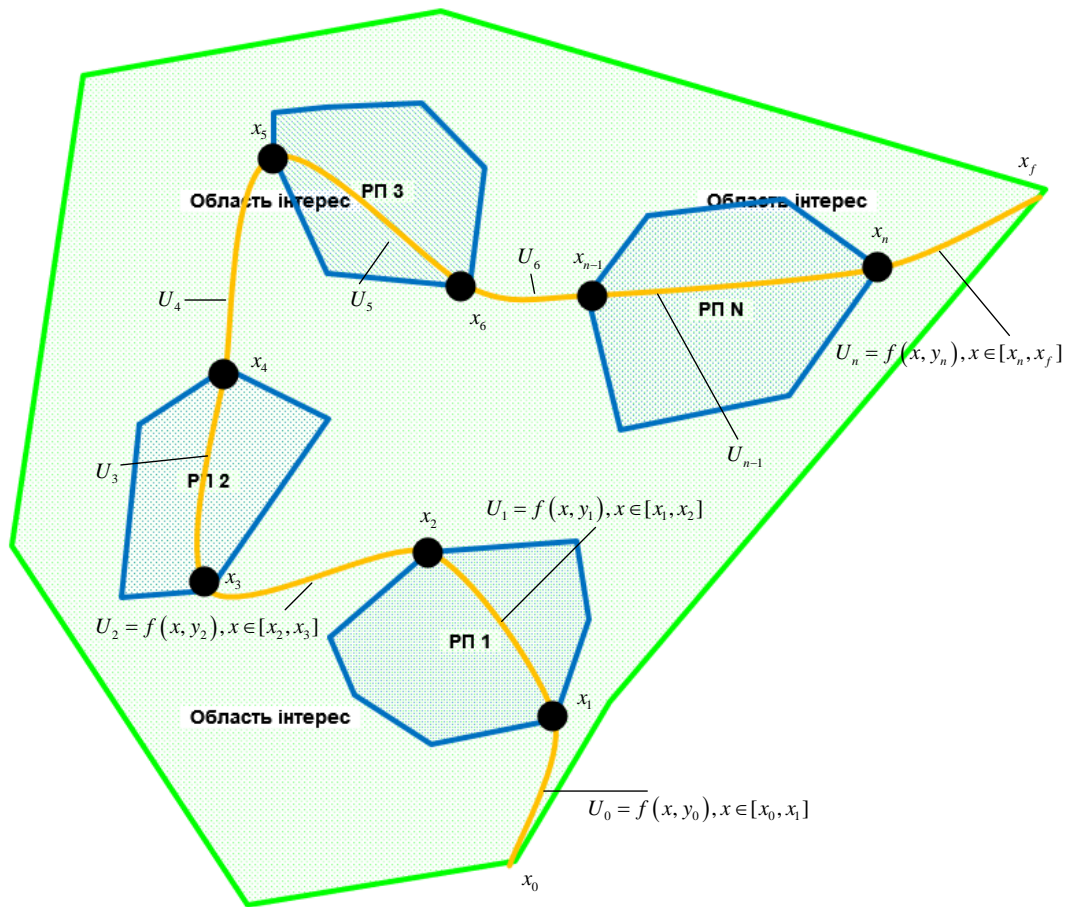


Рис. 5 – Геометрична інтерпретація синтезу маршруту руху гібридного роботизованого комплексу (джерело: розроблено автором)

Після синтезу маршруту руху гібридного роботизованого комплексу виконується перевірка на безпечність маршруту відносно ситуацій небезпечного зближення зіткнення з навігаційними перешкодами. Маршрут перетинає навігаційну перешкоду, якщо виконуються умови:

$$\begin{cases} x^{obs} = x_i, y^{obs} = y_i \\ \text{and / or} \\ p^{route} \leq D_{safe}^{obs} \end{cases} \quad (11)$$

де x^{obs}, y^{obs} – координати навігаційної перешкоди;

p^{route} – курсовий параметр проходу маршруту повз навігаційну перешкоду;

D_{obs}^{safe} – безпечна дистанція розходження з навігаційною перешкодою.

При виконанні умови навігаційна перешкода заноситься у масив перешкод Vec^{obs} у формі:

$$Vec^{obs} = \left\{ \left\{ x_1^{obs}, y_1^{obs}, D_1^{obs}, par_1^{obs} \right\}, \left\{ x_2^{obs}, y_2^{obs}, D_2^{obs}, par_2^{obs} \right\}, \dots, \left\{ x_k^{obs}, y_k^{obs}, D_k^{obs}, par_k^{obs} \right\} \right\}, \quad (12)$$

де par^{obs} – параметр, що вказує на напрямок обходу навігаційної перешкоди (ліворуч або праворуч).

Якщо $Vec^{obs} = \emptyset$, то результат роботи алгоритму передається групі засобів пошуку гібридного роботизованого комплексу. У випадку, коли $Vec^{obs} \neq \emptyset$, тоді визначаються нові проміжні точки маршруту, на основі яких будується траєкторія обходу навігаційної перешкоди за виразом:

$$\begin{cases} x_{i+1}^{route} = x^{obs} \pm \Delta x \\ y_{i+1}^{route} = y^{obs} \pm \Delta y \end{cases}, \quad (13)$$

при

$$\begin{cases} \Delta x = D_{safe}^{obs} \cdot \cos \alpha \\ \Delta y = D_{safe}^{obs} \cdot \sin \alpha \end{cases}. \quad (14)$$

де α – кут між p^{route} та напрямком осі координат.

Знак " \pm " визначається відповідно до значення par^{obs} та напрямком руху гібридного роботизованого комплексу. В результаті визначаються нові проміжні точки маршруту і алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу повторюється. Геометричну інтерпретацію синтезу нового маршруту з урахуванням перешкод наведено на рис. 6.

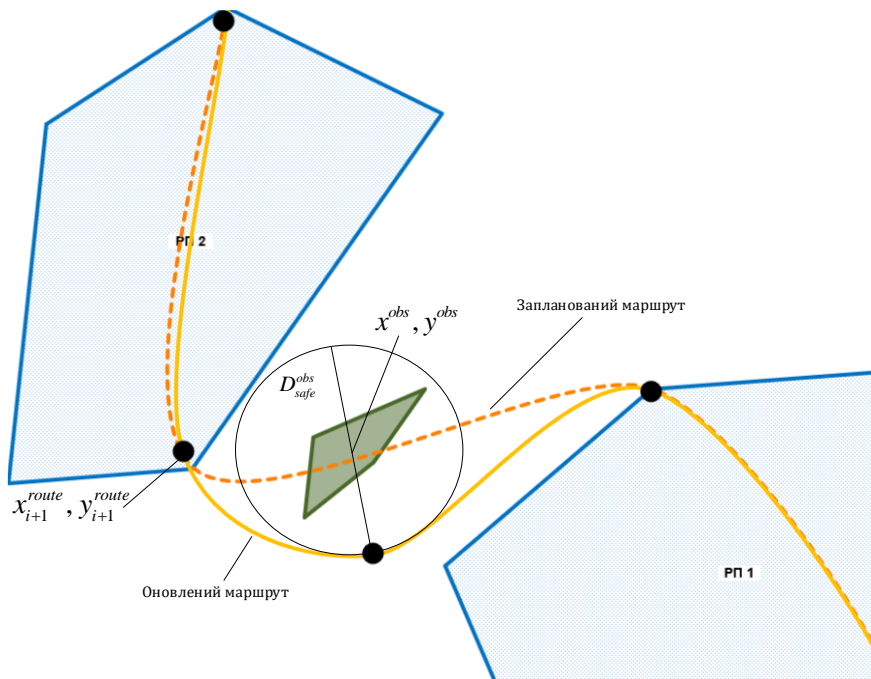


Рис. 6 – Геометрична інтерпретація синтезу нового маршруту з урахуванням перешкод (джерело: розроблено автором)

Вироблення маршруту руху гібридного роботизованого комплексу на основі інтерполяції кубічними сплайнами може бути застосована як інтелектуальна підтримка прийняття рішення в пошуковій операції у рамках стратегічної технології e-Navigation. Алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу на основі інтерполяції кубічними сплайнами може бути застосований у спеціальному програмному забезпеченні планування маршруту, що розробляється на основі технології великих даних.

Висновки

Аналіз процесу проведення пошуку надводних та підводних об'єктів показує, що одним з перспективних напрямків підвищення ефективності та безпеки є групове застосування роботизованих апаратів різних типів (БПЛА, БПС, АНПА). На даний момент швидко розвивається

напряму робототехніки – «Collective Cognitive Robots, CoCoRo» (колективні когнітивні апарати-роботи), що потребує автоматизації на трьох основних рівнях:

- базовому (автоматизація окремого роботизованого апарату);
- локальному рівні (групове управління роботизованих апаратів);
- глобальному рівні (автоматизація пошукової операції).

Для реалізації принципів CoCoRo на глобальному рівні необхідним є застосування концепції e-Navigation для автоматизації процесу збору, обробки та видачі інформації в процесі пошукової операції, для підвищення оперативності та безпеки проведення робіт.

У статті удосконалено метод управління пошуком надводних та підводних об'єктів гібридним роботизованим комплексом, в якому формалізація етапів планування маршруту руху гібридного роботизованого комплексу та процесів обробки інформації, прогнозування навігаційної обстановки та вибору стратегії запобігання небезпечних ситуації дозволяє автоматизувати процес пошукової операції на всіх трьох рівнях CoCoRo. Розроблений алгоритм побудови маршруту пошуку для гібридного роботизованого комплексу на основі інтерполяції кубічними сплайнами дозволяє прецизійно оцінювати оптимізацію маршруту руху гібридного роботизованого комплексу у складній навігаційній обстановці за рахунок ефективного контролю відстані до навігаційних небезпек та точок маршруту.

Перелік використаних джерел:

1. Allard Y., Shahbazian E. Unmanned Underwater Vehicle (UUV) Information. Defense Research & Development Canada, Atlantic Research Centre, OODA Technologies Inc. 2014. 78 p.
2. Голембо В.А., Бочкар'єв О.Ю., Гребеняк А.В. Проблема організації узгоджених колективних дій автономних мобільних підводних апаратів. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютерні науки та інформаційні технології.* 2009. № 650. С. 167-173.
3. Kalwa J. Final Results of the European Project GREX: Coordination and control of cooperating marine robots. *IFAC Proceedings Volumes.* 2010. Vol. 43, iss. 16. Pp. 181-186. DOI: <https://doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2019.00033>.
4. Алоба Л.Т. Автоматизація групового керування автономними ненаселеними підводними апаратами пошукового типу: дис. ... канд. техн. наук : 05.13.03. Миколаїв, 2021. 203 с.
5. Фролов С.М., Сидоренко О.В. Безекіпажні морські роботизовані системи (комплекси) для висвітлення обстановки в Азовському морі. *Збірник наукових праць Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України ім. Івана Черняхівського.* 2019. № 3(67). С. 110-114. DOI: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-3-67/110-114>.
6. Марінічева К.В., Савінок О.М., Кобзар Т.А. Аналіз досвіду використання якостей морських ссавців під час створення роботизованих морських апаратів. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова.* 2020. № 4. С. 12-21. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2020.4\(482\).2](https://doi.org/10.15589/znp2020.4(482).2).
7. Блінцов О.В., Сірівчук А.С. Концепція роботизованого моніторингу підводного середовища на основі застосування прив'язних підводних апаратів. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий.* 2014. № 3(72). С. 18-21. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30871>.
8. Левченко О.В. Метод оцінки та прогнозування навігаційної ситуації під час руху судна. *Системи управління, навігації та зв'язку.* 2022. № 4(70). С. 4-9. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.004>.
9. Elangovan M., Balaji T. Basic Design for the development of Autonomous Underwater Vehicle. *International Research Journal on Advanced Science Hub.* 2020. № 2(11). С. 12-17.
10. Milošević Z. Guidance System For Autonomous Underwater Vehicles in Confined Environments: Ph.D. thesis. ... doctor of philosophy: automation and robotics. Madrid, 2020. 174 p.
11. Elangovan M. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions. *Applied sciences.* 2020. № 10(1256). Pp. 3-37. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10041256>.
12. Hadi B., Khosravi A., Sarhadi P. Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning. *IEEE Journal of Oceanic Engineering.* 2020. № 10(1256). Pp. 3-37. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10041256>.
13. Formation control of multiple autonomous underwater vehicles: a review / Y. Tao, T. Yan, Z. Xu,

S. Yang, A. Gadsden. *Intell Robot.* 2023. № 3(1). Pp. 23-45. DOI: <https://doi.org/10.20517/ir.2023.01>.

14. Сплайн-функції та їх застосування / Б.П. Довгий, А.В. Ловеїкін, Є.С. Вакал, Ю.Є. Вакал. Київ: Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2016. 117 с.

References:

1. Allard Y., Shahbazian E. *Unmanned Underwater Vehicle (UUV) Information*. Defense Research & Development Canada, Atlantic Research Centre, OODA Technologies Inc. Publ., 2014. 78 p.
2. Golembo V.A., Bochkar'ov O.Iu., Grebeniak A.V. The problem of organizing coordinated collective actions of autonomous mobile underwater vehicles. *The Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Computer sciences and information technologies*, 2009, № 650, pp. 167-173. (Ukr.)
3. Kalwa J. Final Results of the European Project GREX: Coordination and control of cooperating marine robots. *IFAC Proceedings Volumes*, 2010, vol. 43, iss. 16, pp. 181-186. doi: <https://doi.org/10.3182/20100906-3-IT-2019.00033>.
4. Alopa L.T. *Automation of group management of autonomous uninhabited search-type underwater vehicles*. Cand. tech. sci. diss. Mykolaiv, 2021. 203 p. (Ukr.)
5. Frolov S., Sydorenko O. Unmanned marine robotic systems for illuminating the situation in the Azov Sea. *Collection of Scientific Works of the Center for Military and Strategic Research of the National Defense University of Ukraine*, 2019, № 3(67), pp. 110-114. doi: <https://doi.org/10.33099/2304-2745/2019-3-67/110-114>. (Ukr.)
6. Marinicheva K.V., Savinok O.N., Kobzar T.A. Analysis of the experience of using the qualities of marine mammals in the creation of robotic marine vehicles. *Collection of Scientific Publications NUS*, 2020, № 4, pp. 12-21. doi: [https://doi.org/10.15589/znp2020.4\(482\).2](https://doi.org/10.15589/znp2020.4(482).2). (Ukr.)
7. Blintsov O.V., Sirivchuk A.S. The formation of the concept of robotic monitoring of an underwater environment based on the use of remotely operated vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, № 3(72), pp. 18-21. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.30871>. (Ukr.)
8. Levchenko O.V. Method of assessing and forecasting the navigation situation during ship motion. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2022, № 4(70), pp. 4-9. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.004>. (Ukr.)
9. Elangovan M., Balaji T. Basic Design for the development of Autonomous Underwater Vehicle. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 2020, № 2(11), pp. 12-17.
10. Milošević Z. *Guidance System For Autonomous Underwater Vehicles in Confined Environments*. Ph.D. thesis. Madrid, 2020. 174 p.
11. Elangovan M. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions. *Applied sciences*, 2020, № 10(1256), pp. 3-37. doi: <https://doi.org/10.3390/app10041256>.
12. Hadi B., Khosravi A., Sarhadi P. Adaptive formation motion planning and control of autonomous underwater vehicles using deep reinforcement learning. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2020, № 10(1256), pp. 3-37. doi: <https://doi.org/10.3390/app10041256>.
13. Tao Y., Yan T., Xu Z., Yang S., Gadsden A. Formation control of multiple autonomous underwater vehicles: a review. *Intell Robot*, 2023, № 3(1), pp. 23-45. doi: <https://doi.org/10.20517/ir.2023.01>.
14. Dovgii B.P., Loveikin A.V., Vakal E.S., Vakal Iu.E. *Spline functions and their application*. Kyiv, Kyivs'kii universitet Publ., 2016. 117 p. (Ukr.)

Рецензент: О.М. Тимошук
д-р техн. наук, проф., ДУІТ

Стаття надійшла 18.01.2023
Стаття прийнята 12.03.2023

ФОРМУВАННЯ ЦИФРОВИХ СТРАТЕГІЙ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН

В сучасному динамічному світі, морський транспорт, зокрема вантажні судна, відіграють невід'ємну роль у глобальних ланцюгах постачання та міжнародній торгівлі. Забезпечення надійності, ефективності та безпеки їхньої діяльності стає насуцними проблемами, оскільки невчасні поломки та недоліки в системах технічного обслуговування можуть призвести до серйозних втрат, великих затримок та загроз для екології. У зв'язку з цим, важливим завданням є розробка ефективних стратегій для підвищення якості та ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден. Цифрові технології та інноваційні підходи здатні вирішити ряд завдань, пов'язаних з прогнозуванням поломок, оптимізацією процесів обслуговування та моніторингом стану обладнання. Однак несвоєчасне впровадження таких стратегій може призвести до втрат конкурентоспроможності та невиправданих витрат. Метою даної статті є розробка концептуального рішення щодо підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій. Аналізуючи сучасні підходи, обґрунтовуючи їх переваги та недоліки, автор прагне визначити оптимальні методи та рішення, що сприятимуть поліпшенню ефективності обслуговування, зниженню витрат та забезпеченню безпеки судноплавства. Відчутна потреба в розробці цифрових стратегій для технічного обслуговування вантажних суден акцентує увагу на актуальності цього дослідження. Шляхом аналізу сучасного стану та найновіших досліджень у цій області, автор сподівається зробити свій внесок у підвищення ефективності водного транспорту та розв'язання важливих проблем транспортної галузі. Впровадження цифрових стратегій у технічне обслуговування вантажних суден призведе до підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. Завдяки цим інструментам, система стане більш адаптивною, передбачуваною та ресурсозберігаючою, що в кінцевому підсумку покращить якість технічного обслуговування та зменшить витрати.

Ключові слова: цифрові стратегії, процес технічного обслуговування, вантажні судна, предиктивна аналітика, прескриптивна аналітика, цифрова модель, цифрова тінь, цифровий двійник, ефективність технічного обслуговування.

A.I. Golovan. Formation of digital strategies for solving problems of increasing the efficiency of cargo ship maintenance systems. In today's ever-changing world, maritime transportation, and cargo ships, specifically, hold a crucial position in global supply chains and international trade. Guaranteeing the reliability, effectiveness, and safety of their operations is an increasingly urgent concern, as unexpected malfunctions and inadequacies in maintenance systems have the potential to cause significant losses, lengthy delays, and environmental hazards. In this regard, developing effective strategies to enhance the quality and efficiency of cargo ship maintenance systems is crucial. Digital technologies and innovative approaches can resolve various issues related to predicting breakdowns, optimizing maintenance processes, and monitoring equipment conditions. Nevertheless, delayed implementation of these strategies can result in loss of competitiveness and unnecessary expenses. The objective of this article is to devise a conceptual solution that enhances the efficiency of cargo ship maintenance systems through digital strategies. By assessing existing approaches, substantiating their pros and cons, the author endeavors to

* канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0001-6589-4381, g.onmu@ukr.net

recognize the most apt methodologies and resolutions that enhance maintenance productivity, curtail expenses, and guarantee safe navigation. The concrete necessity to design digital strategies for cargo ship maintenance highlights the importance of this study. By analyzing the current research in the field, this study aims to enhance waterborne transport efficiency and address key issues in the transportation sector. The implementation of digital strategies in cargo ship maintenance would enhance the efficiency of the maintenance system. Thanks to these tools, the system will become more adaptable, predictable, and resource-efficient, ultimately improving the quality of maintenance, and lowering costs.

Key words: *digital strategies, maintenance process, cargo ships, predictive analytics, prescriptive analytics, digital model, digital shadow, digital twin, maintenance efficiency.*

Постановка проблеми. В сучасних умовах і викликах функціонування морського транспорту виникає загострена потреба в оптимізації систем технічного обслуговування вантажних суден для забезпечення їх надійності, ефективності та безпеки плавання. Наявність низки факторів, таких як непланові поломки, затримки, великі витрати та недостатнє використання сучасних технологій, ставить під загрозу нормальний режим експлуатації суден та призводить до серйозних економічних втрат.

Ключові аспекти проблеми:

1. Непередбачуваність і втрати часу: Відсутність ефективної системи передбачення поломок та недостатнє планування ремонтів спричиняють нестабільність у роботі суден та незаплановані зупинки.

2. Високі витрати: Значні витрати на технічне обслуговування та ремонт, а також недостатньо оптимізоване використання ресурсів, призводять до непереборних фінансових втрат.

3. Застарілість систем: Відсутність цифрових стратегій та застарілі системи моніторингу та управління призводять до обмеженої можливості вчасно виявляти проблеми та реагувати на них.

4. Недостатня безпека: Ризики для безпеки плавання та навколишнього середовища зростають через неконтрольовані поломки та можливість витоків.

5. Потреба в оптимізації процесів: Недостатня інтеграція та координація між різними аспектами обслуговування суден вимагає впровадження нових підходів для оптимізації процесів.

Важливість вирішення проблеми: Ефективне технічне обслуговування вантажних суден є критичним для підтримання їх операційної діяльності, конкурентоспроможності та безпеки. Впровадження цифрових стратегій та оптимізованої структурно-логічної схеми може вирішити наведені вище проблеми та забезпечити більш плавний режим роботи суден, зниження витрат та покращення якості обслуговування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У розглянутих статтях йдеться про те, що сучасні цифрові інструменти і технології можуть оптимізувати процеси технічного обслуговування вантажних суден. Автори статті [1] розглядають використання нових інформаційних технологій, таких як хмарні обчислення і технологія RFID, для підвищення ефективності і зниження операційних витрат. Автори статті [2] припускають, що використання 3D наземного лазерного сканування і інструментів спільного управління життєвим циклом продукції може знизити витрати і підвищити продуктивність в процесах технічного обслуговування суден. Дослідження [3] пропонує платформу управління технічним обслуговуванням суден на основі хмарних обчислень для управління бізнес-інформацією, яка стане ядром управління інформацією про судна. Дослідження [4] пропонує застосування технології прогнозування і управління станом (РНМ) для поліпшення програм технічного обслуговування обладнання і графіків ремонту, з прикладом оптимізованої системи РНМ для енергетичної системи земснаряда Бюро водних шляхів. Загалом, у існуючих дослідженнях показано, що сучасні цифрові інструменти та технології можуть підвищити ефективність, надійність та економічну ефективність процесів технічного обслуговування вантажних суден.

Також у проаналізованих роботах припускається, що сучасні цифрові інструменти та технології можуть оптимізувати процеси технічного обслуговування вантажних суден. Дослідження [5] пропонує підхід до аналізу процесів для оцінки ефективності технічного обслуговування на борту судна і рекомендує вдосконалення для підвищення функціональності обраного програмного забезпечення з точки зору балансу робочого навантаження, розумного планування та

безпечного робочого середовища. Автор роботи [6] досліджує потенційні економічні вигоди від впровадження адитивного виробництва (3D-друк) і програмного забезпечення для спільного управління життєвим циклом продукції (CPLM) в діяльності військово-морських сил з технічного обслуговування і пропонує значне скорочення часу циклу і потенційну економію коштів у розмірі 1,49 мільярда доларів США на рік. Автори дослідження [7] представляють поточне і потенційне використання технології цифрових двійників (ЦД) в експлуатації і управлінні суднами і дає уявлення про те, як технологія ЦД створить можливості для розвитку судноплавного сектора. Дослідження [8] пропонує модель, засновану на процесах, для полегшення вибору відповідних цифрових допоміжних систем для підтримки операцій з технічного обслуговування у виробничих галузях, які можуть перетворити можливості діагностичного технічного обслуговування на прогнозоване і рекомендаційне технічне обслуговування.

Проведений аналіз показав, що існують деякі потенційні проблеми, які можуть бути вирішені шляхом підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій, а саме:

1. Скорочення затримки в обслуговуванні: Вантажні судна можуть часто зазнавати затримок через непланові поломки або необхідність ремонту. Це може викликати великі втрати як у вигляді часу, так і грошей.

2. Поліпшення ефективності планування технічного обслуговування: Відсутність оптимізованого планування обслуговування може призводити до зайвих витрат через неправильний розподіл ресурсів, простої та непланові зупинки.

3. Оптимізацію витрат на обслуговування: Технічне обслуговування суден може бути дорогим процесом, особливо коли потрібні запасні частини або дорогоцінні роботи.

4. Покращення передбачуваності ремонтів: Нездатність передбачити важливі ремонти може призвести до несподіваних зупинок, що впливає на графік доставки та ефективність операцій.

5. Впровадження централізованого моніторингу: Відсутність системи моніторингу стану обладнання на судні може спричинити втрати часу та ресурсів на виявлення та виправлення неполадок.

6. Спрощення і уніфікація обміну інформацією: Наявність багатьох застарілих систем та технологій може призвести до проблем з обміном інформацією між різними частинами обслуговування та управління судном.

7. Зниження ризиків для безпеки: Технічні неполадки можуть призвести до ситуацій, коли судно та екіпаж опиняються під загрозою, зокрема в небезпечних умовах чи під час плавання в важких умовах шторму.

8. Покращення впливу на навколишнє середовище: Неконтрольовані поломки або витіки можуть мати негативний вплив на навколишнє середовище через викиди токсичних речовин.

Означені проблеми та їх наслідки надають змогу визначити ключові аспекти, які потребують уваги при створенні структурно-логічної схеми для вирішення проблеми підвищення ефективності технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій.

Мета статті полягає у синтезі концептуального підходу, який базується на використанні сучасних цифрових інструментів та технологій для оптимізації процесів технічного обслуговування вантажних суден.

Виклад основного матеріалу. З метою досягнення поставленої мети у вигляді розробки структурно-логічної схеми вирішення проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден за допомогою цифрових стратегій було проведено докладний аналіз сучасних підходів до технічного обслуговування вантажних суден, вивчено принципи та важливість цифрових технологій у галузі морського транспорту, а також визначено ключові аспекти, які варто враховувати під час розробки цифрових стратегій.

Цифрові стратегії – це планові та організовані підходи до використання цифрових технологій з метою досягнення конкретних цілей або розв'язання конкретних завдань. Це може включати, але не обмежується:

1. Діджиталізація процесів: перехід від ручних методів до автоматизованих, що залучає цифрові технології.

2. Використання аналітики: збір та аналіз великих обсягів даних для підтримки прийняття рішень.

3. Моделювання та симуляція: використання цифрових двійників або інших цифрових моделей для прогнозування та оптимізації.

4. Цифрова взаємодія із стейкхолдерами: використання онлайн платформ, мобільних додатків тощо для покращення досвіду стейкхолдерів.

5. Інтеграція технологій: з'єднання різних систем та платформ для створення цілісних рішень.

У контексті технічного обслуговування вантажних суден, цифрові стратегії включають використання цифрових моделей, цифрових тіней, цифрових двійників (рис. 1) у поєднанні із аналітикою даних (рис. 2, рис. 3) для підвищення ефективності технічного обслуговування, прогнозування потреб та визначення оптимальних програм обслуговування та ремонту.

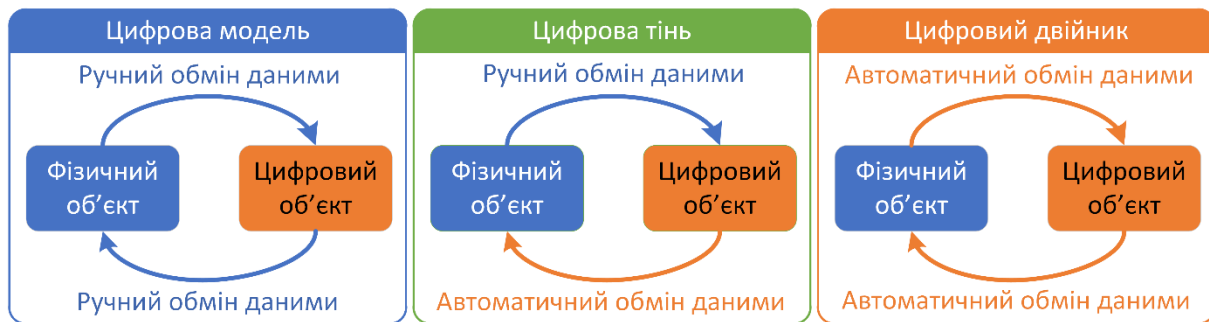


Рис. 1 – Відмінності в топології даних між цифровою моделлю, цифровою тінню та цифровим двійником

Цифрова модель: Автоматизований обмін даними між двома структурами відсутній. Внесення даних для синхронізації здійснюється вручну.

Цифрова тінь: Існує лише односторонній потік даних від фізичного об'єкта до цифрового аналога. Дані, що надходять від фізичного об'єкта, оновлюють цифровий об'єкт, але не навпаки. Це вимагає взаємодію між фізичним об'єктом і цифровою моделлю за принципом «людина в циклі» (Human-in-the-loop, HITL).

Цифровий двійник: Повністю інтегрований потік даних доступний там, де встановлено двосторонній автоматизований канал передачі даних. Обидва об'єкти перебувають у синхронізованому стані в режимі реального часу, і фізичний об'єкт може автоматично впливати на цифровий об'єкт.

Під час проведення дослідження було розроблено «Класифікацію методів предиктивної (прогностичної) аналітики», зображену на рис. 2, яка включає в себе три основні категорії методів: «Машинне навчання / Інтелектуальний аналіз даних», «Імовірнісні моделі» та «Статистичний аналіз». Ця класифікація стала важливим компонентом проведеного дослідження, який відображає різнобічні підходи та методи, що використовуються для передбачення та прогнозування подій у галузі технічного обслуговування вантажних суден.

1. Машинне навчання / Інтелектуальний аналіз даних: Ця категорія включає широкий спектр методів, що базуються на використанні алгоритмів машинного навчання та інтелектуального аналізу даних. Вона враховує використання нейронних мереж, методів класифікації та кластеризації, ансамблів моделей, а також аналізу текстових даних та зображень. Важливим аспектом є здатність цих методів до автоматичного виявлення складних закономірностей у великих обсягах даних та передбачення на їхній основі.

2. Імовірнісні моделі: Ця категорія враховує використання імовірнісних методів та моделей для передбачення подій. Сюди входять методи, такі як байєсівська статистика, методи прогнозування на основі розподілів імовірностей, а також Монте Карло марковських ланцюгів. Імовірнісні моделі дозволяють враховувати невизначеність та варіабельність даних, що є важливим аспектом при передбаченні невизначених подій.

3. Статистичний аналіз: Ця категорія включає методи статистичного аналізу даних для виявлення зв'язків та залежностей між різними параметрами. Вона враховує використання регресійного аналізу, аналізу варіантності, кореляційного аналізу та інших статистичних методів. Ці

методи дозволяють встановлювати та оцінювати статистичні взаємозв'язки між різними змінними.

Розроблена класифікація є цінним інструментом, що допомагає структурувати та узагальнити різні підходи до передбачення подій у контексті технічного обслуговування вантажних суден. Вона сприяє кращому розумінню основних категорій методів та допомагає вибирати оптимальний підхід для конкретних завдань.

Розроблена «Класифікація методів предиктивної (прогностичної) аналітики» є важливим внеском у галузь технічного обслуговування вантажних суден. Вона допоможе науковцям та практикам обирати та застосовувати ефективні методи передбачення подій на основі їх характеристик та специфіки.

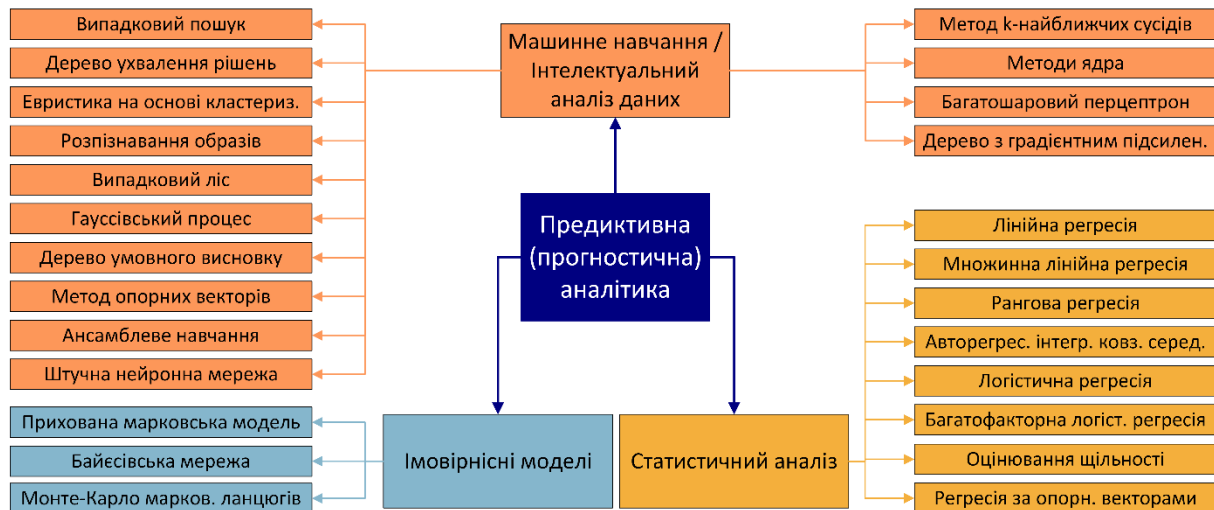


Рис. 2 – Класифікація методів предиктивної (прогностичної) аналітики

Було проаналізовано різноманітні підходи, що вже існують у галузі технічного обслуговування вантажних суден. Основний акцент було зроблено на визначенні основних недоліків та викликів цих підходів, таких як нестабільність графіку обслуговування, недостатня точність передбачення поломок та високі витрати.

Було проведено дослідження ролі та важливості цифрових технологій у галузі морського транспорту. Зокрема, було розглянуто застосування даних з сенсорів та платформ для моніторингу стану обладнання, аналізу даних для передбачення поломок, а також використання аналітики даних для оптимізації ресурсів та планування обслуговування.

Під час проведення дослідження також було розроблено «Класифікацію методів прескриптивної (рекомендаційної) аналітики», зображену на рис. 3, яка включає шість основних категорій методів. Ця класифікація є важливим кроком у систематизації та розумінні різних підходів до надання рекомендацій та вирішення прийняття рішень у галузі технічного обслуговування вантажних суден.

1. Машинне навчання / Інтелектуальний аналіз даних: Ця категорія об'єднує методи, що базуються на застосуванні алгоритмів машинного навчання та інтелектуального аналізу даних для генерації рекомендацій. Вона включає в себе використання нейронних мереж, методів класифікації та кластеризації, рекомендуючі системи, а також аналіз текстових даних та обробку зображень для отримання інформації.

2. Еволюційне обчислення: Ця категорія містить доступні до використання методи, які моделюють еволюційні процеси в технічному обслуговуванні для вирішення оптимізаційних задач. Методи, такі як генетичні алгоритми, різні види еволюційних стратегій, допомагають знаходити оптимальні рішення на основі пошукових процесів.

3. Імітаційне моделювання: Ця категорія містить доступні до використання імітаційні моделі та симуляції для створення віртуальних середовищ, де можна аналізувати різні сценарії та

вирішувати задачі оптимізації. Це може бути корисно для вирішення складних проблем, де важко використовувати аналітичні методи.

4. Імовірнісні моделі: Ця категорія враховує використання імовірнісних методів та моделей для надання рекомендацій. Це можуть бути методи, які враховують розподіл імовірностей для прийняття рішень, враховуючи невизначеність та ризики.

5. Моделі на основі логіки: Ця категорія включає методи, що базуються на застосуванні логічних моделей для прийняття рішень. Це можуть бути різні види логічних систем, формальні методи дедукції та інші логічні підходи.

6. Математичне програмування: Ця категорія передбачає використання математичних методів та оптимізаційного програмування для знаходження оптимальних рішень. Це можуть бути методи лінійного програмування, динамічного програмування та інші.

Розроблена класифікація (рис. 3) є важливим інструментом для структурування та розуміння різних підходів до прескриптивної аналітики. Вона допомагає систематизувати різноманітні методи та вибирати найбільш відповідні для вирішення конкретних завдань.

Класифікація (рис. 3) має великий потенціал в галузі технічного обслуговування вантажних суден. Вона допоможе дослідникам та практикам вибирати та застосовувати ефективні методи прийняття рішень для оптимізації обслуговування суден та підвищення їхньої ефективності.



Рис. 3 – Класифікація методів прескриптивної (рекомендаційної) аналітики

На наступному етапі дослідження було виділено ключові аспекти, які мають важливе значення під час розробки та впровадження цифрових стратегій у системи технічного обслуговування. До таких аспектів відносяться точність датчиків та засобів моніторингу, адаптація алгоритмів передбачення поломок до конкретних умов, раціональний розподіл ресурсів для забезпечення оптимального планування обслуговування.

Після цього було здійснено порівняння двох класифікацій (рис. 2 і рис. 3). Основною метою цього порівняння було встановлення рівня відповідності цілям та завданням при розробці «Структурно-логічної схеми вирішення проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій», яка зображена на рис. 4.

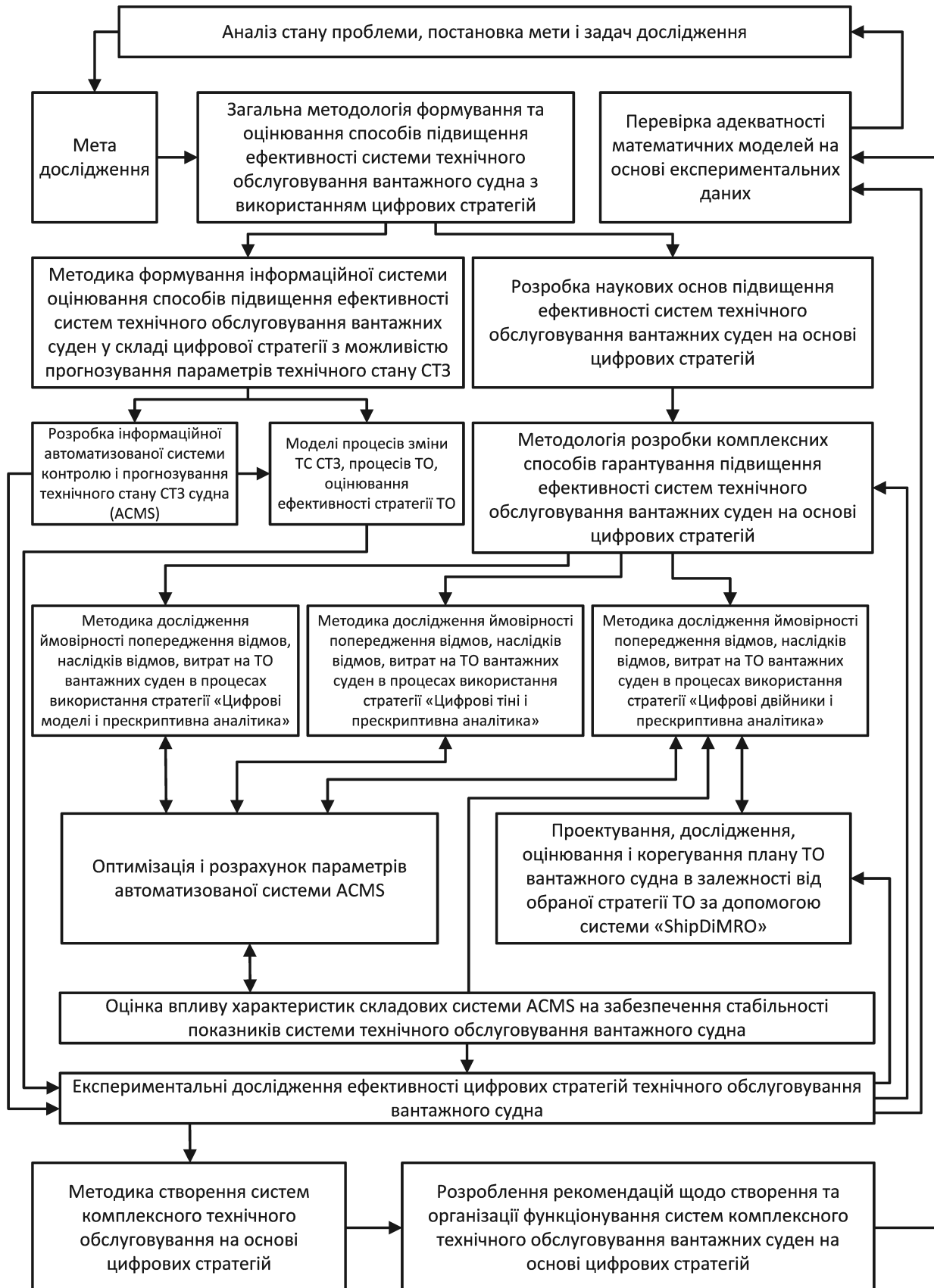


Рис. 4 – Структурно-логічна схема вирішення проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій

Проведений аналіз показав, що найбільший рівень доцільності має «Класифікація методів прескриптивної (рекомендаційної) аналітики». Це рішення було прийняте на підставі його відповідності дослідницьким цілям, специфіці задачі підвищення ефективності технічного обслуговування вантажних суден та застосуванням цифрових стратегій. Ця класифікація надає структурований підхід до надання рекомендацій та прийняття рішень у відповідності з різними видами аналітичних методів. Відповідно до отриманих висновків, ця класифікація є найбільш пристосованою для вирішення проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій.

Обираючи цю класифікацію (рис. 3), автор звертає увагу на рекомендаційний характер аналітики та висновків, що можуть бути важливими для підвищення ефективності технічного обслуговування вантажних суден. Такий підхід може відігравати важливу роль у вдосконаленні стратегій та прийнятті оптимальних рішень, спрямованих на забезпечення безперебійної та ефективної роботи суден. Отже, на підставі проведеного аналізу автор визнав, що «Класифікація методів прескриптивної (рекомендаційної) аналітики» найкраще відповідає меті створення «Структурно-логічної схеми вирішення проблеми підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій».

На наступному етапі, на основі аналізу та визначення ключових аспектів, було розроблено структурно-логічну схему для впровадження цифрових стратегій у системи технічного обслуговування вантажних суден (рис. 4). Схема включає кроки передбачення поломок, моніторингу стану обладнання, аналізу даних та оптимізації ресурсів.

Автор докладно розглянув потенційні переваги та вигоди, які можуть впливати з впровадження розробленої структурно-логічної схеми. Серед них – зменшення витрат на неплановий ремонт, підвищення надійності та безпеки суден, збільшення ефективності використання ресурсів.

В завершенні дослідження було розглянуто практичні аспекти впровадження розробленої схеми в реальних умовах експлуатації вантажних суден, а також вказано на можливості подальших досліджень у цій галузі, таких як розробка більш точних алгоритмів передбачення поломок та врахування специфіки різних типів суден.

З врахуванням проведеного аналізу, автор впевнений, що розроблена структурно-логічна схема може послужити основою для реалізації ефективних цифрових стратегій в системах технічного обслуговування вантажних суден, що сприятиме покращенню ефективності, зниженню витрат та забезпеченню безпеки плавання.

Висновки

Впровадження цифрових стратегій, а саме: цифрових моделей, цифрових тіней, цифрових двійників у поєднанні із прескриптивним аналізом, в систему технічного обслуговування вантажних суден призведе до ряду позитивних змін та покращень:

1. Автоматизація моніторингу: Сенсори та інші засоби збору даних будуть надавати безперервний потік інформації про стан судна, це дозволить відстежувати поточний стан обладнання в реальному часі (цифрові двійники).

2. Детальне моделювання: Цифрові двійники дозволять створювати детальні моделі судна для аналізу його поведінки в різних умовах, допомагаючи передбачити потенційні проблеми.

3. Прогнозування та оптимізація: Прескриптивний аналіз використовуватиме зібрані дані для визначення науково-обґрунтованих часових рамок наступного технічного обслуговування та ремонту, оптимізуючи робочі процеси та знижуючи витрати.

4. Підвищення надійності: Система буде в змозі виявляти і передбачати потенційні несправності задовго до того, як вони стануть критичними, зменшуючи ризик відмов суднових технічних засобів, збоїв та аварій.

5. Ефективність ресурсів: Завдяки аналізу даних та прескриптивним рекомендаціям, судновласник може використовувати ресурси (як-то запасні частини, робочий час екіпажу) набагато ефективніше.

6. Освіта та навчання: Інтелектуальна система може також служити інструментом для навчання та підвищення кваліфікації екіпажу, демонструючи оптимальні підходи до обслуговування та реагування на непередбачені обставини.

В цілому, такий підхід до технічного обслуговування робить його більш прогнозованим, ефективним та надійним, що неодмінно призведе до зниження витрат, підвищення продуктивності та збільшення життєвого циклу судна.

Впровадження цифрових стратегій у технічне обслуговування вантажних суден призведе до підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден. Завдяки цим інструментам, система стане більш адаптивною, передбачуваною та ресурсозберігаючою, що в кінцевому підсумку покращить якість технічного обслуговування та зменшить витрати.

Перелік використаних джерел:

1. Mišanović L., Ristov P., Belamarić G. Use of New Information Technologies in the Maintenance of Ship Systems. *Pomorstvo*. 2016. Vol. 30(1). Pp. 38-44. DOI: <https://doi.org/10.31217/p.30.1.5>.
2. Ford D.N., Housel T.J., Mun J. Ship Maintenance Processes with Collaborative Product Lifecycle Management and 3D Terrestrial Laser Scanning Tools: Reducing Costs and Increasing Productivity. *Proceedings of the ninth Annual Acquisition Research Symposium*. 2011. Pp. 199-215. DOI: <https://doi.org/10.21236/ada543988>.
3. Research of Ship Maintenance Management Platform Based on Cloud Computing / X. Liu, Q. Zhang, S. Wang, X. Cheng, J. Tang. *Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering*. 2015. Pp. 2997-3001. DOI: <https://doi.org/10.2991/icmmce-15.2015.580>.
4. Research on PHM Technology Application of Ship Maintenance Program Optimization / X. Xu, S. Fan, H. Huang, H. Zhu, W. Quan. *Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*. 2013. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/icphm.2013.6621438>.
5. Bayer D., Aydin O., Celik M. An ICOR Approach towards Ship Maintenance Software Development. *International Journal of Maritime Engineering*. 2018. Vol. 160. Pp. A11-A19. DOI: <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2018.a1.444>.
6. Michael E. Kenney. Cost reduction through the use of additive manufacturing (3D printing) and collaborative product life cycle management technologies to enhance the Navy's maintenance programs : M.S. thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, 2013. 85 p.
7. Solmaz M.S., Aşan C., Şihmantepe A. Digital Transformation in Ship Operations and Management. *Management Strategies for Sustainability, New Knowledge Innovation, and Personalized Products and Services*. 2022. Pp. 116-139. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7793-6.ch005>.
8. A Process Model for Enhancing Digital Assistance in Knowledge-Based Maintenance / K. Kovacs, F. Ansari, C. Geisert, E. Uhlmann, R. Grepl, W. Sihn. *Machine Learning for Cyber Physical Systems*. 2018. Pp. 87-96. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-58485-9_10.

References:

1. Mišanović L., Ristov P., Belamarić G. Use of new information technologies in the maintenance of ship systems. *Pomorstvo*, 2016, vol. 30, no. 1, pp. 38-44. doi: <https://doi.org/10.31217/p.30.1.5>.
2. Ford D.N., Housel T.J., Mun J. Ship Maintenance Processes with Collaborative Product Lifecycle Management and 3D Terrestrial Laser Scanning Tools: Reducing Costs and Increasing Productivity. *Proceedings of the ninth Annual Acquisition Research Symposium*, 2011, pp. 199-215. doi: <https://doi.org/10.21236/ada543988>.
3. Liu X., Zhang Q., Wang S., Cheng X., Tang J. Research of Ship Maintenance Management Platform Based on Cloud Computing. *Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering*, 2015, pp. 2997-3001. doi: <https://doi.org/10.2991/icmmce-15.2015.580>.
4. Xu X., Fan S., Huang H., Zhu H., Quan W. Research on PHM Technology Application of Ship Maintenance Program Optimization. *Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM)*, 2013, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/icphm.2013.6621438>.
5. Bayer D., Aydin O., Celik M. An ICOR Approach towards Ship Maintenance Software Development. *International Journal of Maritime Engineering*, 2018, vol. 160, pp. A11-A19. doi: <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2018.a1.444>.
6. Michael E. Kenney. *Cost reduction through the use of additive manufacturing (3D printing) and collaborative product life cycle management technologies to enhance the Navy's maintenance programs*. M.S. thesis. Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, 2013. 85 p.

7. Solmaz M.S., Aşan C., Şihmantepe A. Digital Transformation in Ship Operations and Management. *Management Strategies for Sustainability, New Knowledge Innovation, and Personalized Products and Service*, 2022, pp. 116-139. doi: <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-7793-6.ch005>.
8. Kovacs K., Ansari F., Geisert C., Uhlmann E., Grepl R., Sihh W. A Process Model for Enhancing Digital Assistance in Knowledge-Based Maintenance. *Machine Learning for Cyber Physical Systems*, 2018, pp. 87-96. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-662-58485-9_10.

Рецензент: І.В. Грицук
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 11.04.2023

Стаття прийнята 16.05.2023

УДК 656.621

doi: 10.31498/2225-6733.46.2023.288185

© Маранов О.В.*

МЕТОД МОНІТОРИНГУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЧНОСТІ СУДНОВОГО СУПУТНИКОВОГО НАВІГАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Метою дослідження є вдосконалення підходів до контролю й управління радіоелектронними системами водного транспорту, а також самого навігаційного забезпечення для підвищення безпеки судноплавства на основі розробки методу моніторингу та підвищення точних характеристик суднового супутникового навігаційного обладнання в реальних умовах експлуатації. У статті розглянуто значення сучасних суднових радіонавігаційних систем для забезпечення безпеки судноплавства та висвітлено обмеження, які можуть виникнути у процесі експлуатації цих систем. У зв'язку з цим авторами статті запропоновано підхід до моніторингу та підвищення точності супутникової навігаційної апаратури судна в реальних умовах експлуатації судна. У статті розглянуто застосування наземного контрольно-вимірювального пункту для контролю точних характеристик суднового супутникового навігаційного обладнання. Цей пункт встановлюється на березі і працює на основі основного рівняння метрології. Система позиціонування судна лазерного локатора описується таким чином: GPS-навігаційний космічний апарат посилає лазерний промінь на оптичний кутовий відбивач, встановлений на судні, а потім наземний контрольно-вимірювальний пункт вимірює час, необхідний для проходження лазерного променя до відбивача і від нього, що дає можливість розрахувати відстань до судна. Отримані дані передаються призначеному для користувача обладнанню на судні, яке використовує їх спільно з даними GPS-навігатора космічного апарату для визначення місця розташування, часу і швидкості судна. Особливостями такого підходу є його висока точність і застосовність в різних умовах, включаючи погану видимість. Для врахування геометричних розбіжностей між антенами наземного контрольно-вимірювального пункту й апаратурою користувача, а також для врахування крену і диференту, автори пропонують використовувати геометричні співвідношення. Використання запропонованого у статті методу контролю точності суднового супутникового навігаційного обладнання на базі наземного контрольно-вимірювального пункту дозволяє з високою точністю визначати похибки в різних умовах реальної експлуатації, що сприяє підвищенню безпеки плавання.

* канд. техн. наук, доцент, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-5854-0240

Ключові слова: суднові радіонавігаційні системи, характеристики точності, наземний контрольно-вимірвальний пункт, місцезнаходження судна, супутникова навігація, безпека навігації.

O.V. Maranov. Method for monitoring and improving the accuracy characteristics of shipboard satellite navigation equipment. The aim of the study is to improve approaches to monitoring and control of electronic systems of water transport, as well as navigation support itself, to improve navigation safety by developing a method for monitoring and improving the accuracy characteristics of shipboard satellite navigation equipment in real operating conditions. The article considers the importance of modern ship radio navigation systems for ensuring safety of navigation and highlights the limitations that may arise during operation of these systems. In this regard, the authors of the article propose an approach to monitoring and improving the accuracy of satellite navigation equipment of a ship in real conditions of ship operation. The article considers the use of a ground-based control and measurement station to control the precise characteristics of shipboard satellite navigation equipment. This station is installed on shore and operates based on the basic equation of metrology. The positioning system of a laser locator ship is described as follows: The GPS navigation spacecraft sends a laser beam to an optical angle reflector mounted on the vessel, and then a ground-based control and measurement station measures the time it takes for the laser beam to travel to and from the reflector, which allows the distance to the vessel to be calculated. The data is then transmitted to user equipment on the ship, which uses it in conjunction with the spacecraft's GPS navigation data to determine the ship's location, time and speed. The features of this approach are its high accuracy and applicability in various conditions, including poor visibility. To consider the geometric differences between the antennas of the ground control and measuring station and the user's equipment, as well as to consider the roll and pitch, the authors propose to use geometric ratios. The use of the method of accuracy control of shipboard satellite navigation equipment based on a ground-based control and measuring station proposed in the article allows to determine errors with high accuracy in various conditions of real operation, which contributes to the improvement of navigation safety.

Key words: ship radio navigation systems, accuracy characteristics, ground control and measuring station, ship location, satellite navigation, navigation safety.

Постановка проблеми. Навігація – одне з найважливіших питань в судноплаванні. Достатньо високий рівень аварійності морського флоту свідчить про необхідність поліпшення навігаційного забезпечення. Сучасні суднові радіонавігаційні системи забезпечують навігаційне забезпечення безпеки судноплавання. Однак ці системи мають обмеження, які можуть змінюватися у процесі фактичної експлуатації. Тому виникає необхідність контролю і поліпшення точних характеристик апаратури супутникової навігації судна у процесі фактичної експлуатації. Вирішене у даній статті наукове завдання полягає у підвищенні навігаційної безпеки судноплавання на основі моніторингу та поліпшення точних характеристик апаратури супутникової навігації судна в період фактичної експлуатації. Актуальність вирішення наукового завдання обумовлена:

1) підвищенням ролі навігаційного забезпечення як найважливішого виду забезпечення безпеки плавання морських суден;

2) відсутністю наукових досліджень щодо розробки методів моніторингу та вдосконалення точних характеристик апаратури супутникової навігації судна в період фактичної експлуатації;

3) необхідністю впровадження методів моніторингу та підвищення точних характеристик суднового супутникового навігаційного обладнання, можливих шляхів їх реалізації та алгоритмів функціонування в практиці експлуатації, що дозволяють оцінювати і прогнозувати його точні характеристики в реальному режимі, підвищення якості навігаційної безпеки мореплавання.

Реалізація відповідного завдання дозволить підвищити якість навігаційного забезпечення безпеки мореплавання; знизити аварійність морського флоту; підвищити ефективність транспортного процесу на морських судноплавних маршрутах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час існує значна кількість досліджень щодо удосконалення навігаційного забезпечення з метою підвищення безпеки судноплавання [1-

10]. Безпосередньо дослідження управління та поліпшення характеристик суднової супутникової навігаційної апаратури розглядаються в роботах [1-3].

Побудова обґрунтованої системи показників оцінки ефективності є ключовим кроком для проведення наукової оцінки обладнання. У роботі [1] на основі базового аналого-цифрового перетворювача (АЦП) сформульована концепція інтегрованої ефективності суднового навігаційного обладнання, а також розглянута і проаналізована важливість цього питання та досліджено вплив факторів готовності, надійності, навігаційної здатності суднового навігаційного обладнання. У поєднанні з вимогами суднового обладнання до навігаційної інформації був удосконалений базовий АЦП і побудована система показників оцінки ефективності суднового навігаційного обладнання як добре організованої, логічної і доступної системи індексів.

У дослідженні [2] був запропонований вдосконалений метод оцінки ефективності обладнання, заснований на теорії хмарності. Одержані результати: отримана модель хмарного індексу з використанням алгоритму зворотної хмари, модель ваги хмари визначена за допомогою методу зважування розширених формул, хмарна модель ефективності системи отримана за допомогою хмарних алгебраїчних операцій, встановлена оцінка ефективності системи. Хмарна модель використовує модельно-орієнтований метод, заснований на співвідношенні золотого перетину, що дозволило отримати результати оцінки з використанням алгоритму прямої хмари. Безпосередньо в статті цей метод використовувався для оцінки ефективності суднового навігаційного обладнання, а його моделювання проводилося в середовищі MATLAB. Результати експериментів довели, що цей метод є здійсненним, який не тільки зменшує суб'єктивні фактори при оцінці, але і дозволяє отримати загальні і візуалізовані результати оцінки.

У статті [3] вказується, що високі значення характеристик комбінованої конструкції інерціальної навігаційної системи (SINS) і глобальної навігаційної супутникової системи (Global Navigation Satellite System (GNSS)) доведені в морських застосуваннях. Однак, як класичний інерційний інструмент, SINS не є стандартним судновим обладнанням, визначеним ІМО, та його застосування в морській сфері обмежене через його високу вартість. У статті розглядається інтеграція мікроелектромеханічної системи (MEMS) та GNSS для доведення застосовності недорогих MEMS до суднових навігаційних систем. З урахуванням проблеми деградації навігації, викликаній дрейфом MEMS, запропоновано щільно пов'язану структуру з петлею уникнення помилок. Для задоволення вимог точності і стабільності була створена модель нелінійної похибки і розроблений різновид фільтра Калмана квадратного кореня (SRUKF). Зазначено, що запропонований алгоритм не тільки значно підвищує точність позиціонування, але і дозволяє уникнути обчислювального навантаження матриць. Ефективність та перевага запропонованого SRUKF були підтверджені шляхом моделювання та порівняльного аналізу. Результати показують, що таким чином можна подолати короточасне переривання роботи GNSS у морі.

Метою статті є вдосконалення підходів до контролю й управління радіоелектронними системами водного транспорту, а також самого навігаційного забезпечення для підвищення безпеки судноплавства на основі розробки методу моніторингу та підвищення точних характеристик суднового супутникового навігаційного обладнання в реальних умовах експлуатації.

Виклад основного матеріалу. Сучасний стан контролю точності обладнання супутникової навігації GPS судна характеризується такими тенденціями:

1. Удосконалення методів і засобів контролю точності GPS приймачів.
2. Розвиток диференціальних навігаційних технологій.
3. Застосування технологій GNSS (Global Navigation Satellite System (GNSS)) для забезпечення безпеки судноплавства.

Удосконалення методів і засобів контролю точності GPS приймачів направлено на підвищення точності визначення місця розташування, швидкості і часу. Для цього використовуються різні методи, такі як:

1. Аналіз статистичних характеристик похибок GPS приймача.
2. Використання методів інтерполяції та екстраполяції.
3. Застосування методів обробки сигналів приймача GPS з використанням додаткових джерел інформації.

Розвиток технологій диференціальної навігації дає можливість підвищити точність визначення місцезнаходження за рахунок використання інформації з додаткових джерел, таких як станції корекції берегових диференціалів або супутники EGNOS.

Застосування GNSS-технологій для забезпечення безпеки судноплавства дозволяє підвищити безпеку плавання, надаючи судноводіям точну інформацію про положення, швидкість і час судна. Це дозволяє їм приймати більш обґрунтовані рішення у різних навігаційних ситуаціях.

У цілому сучасний стан контролю точності апаратури супутникової навігації GPS судна характеризується високим рівнем розвитку технологій і методів контролю точності. Це дозволяє забезпечити високу точність визначення місцезнаходження, швидкості і часу, що грає важливу роль в забезпеченні безпеки судноплавства.

Супутникове навігаційне обладнання (СНО) має ряд недоліків, які можуть вплинути на точність визначення місця розташування. До найбільш істотних недоліків можна віднести:

1. Іоносферні затримки. Хвилі, що випускаються супутниками, поширюються через іоносферу, яка є іонізованим шаром атмосфери. Залежно від стану іоносфери швидкість поширення хвилі може змінюватися, що призводить до помилок у визначенні місця розташування.

2. Ефекти тропосфери. Тропосфера – це нижній шар атмосфери, в якому відбувається рух повітряних мас. Рух повітряних мас може викликати затримки поширення хвиль, що призводить до помилок у визначенні місця розташування.

3. Загасання сигналів. Сигнали, що випромінюються супутниками, можуть бути ослаблені при різних умовах, таких як дощ, сніг або густий туман. Загасання сигналів також призводить до помилок у визначенні місця розташування.

4. Помилки годинника. Пристрої СНО мають власні годинники, які можуть мати помилки. Помилки годинника є однією з основних причин, що призводять до помилок у визначенні місця розташування.

Для контролю точності роботи СНО використовуються різні методи. До найпоширеніших методів відносяться:

1. Порівняння визначених СНО координат з координатами, визначеними іншими навігаційними системами.

2. Використання коригувальних виправлень. Коригувальні виправлення – це значення, які додаються до визначених СНО координат для компенсації помилок. Корекційні поправки можна отримати з різних джерел, таких як берегові станції корекції диференціалів або супутники EGNOS.

3. Перевірка точності роботи СНО на спеціальних полігонах. На спеціальних полігонах, які обладнані навігаційними маяками, є можливість провести комплексну перевірку точності роботи СНО. Перевірка точності роботи СНО на спеціальних полігонах дозволяє оцінити точність визначення місця, швидкості і напрямку руху.

Дані методи контролю точних характеристик судового супутникового навігаційного обладнання у процесі експлуатації засновані на використанні наземного контрольно-вимірювального пункту (наприклад, лазерного локатора). Вони відрізняються один від одного розташування наземного контрольно-вимірювального пункту – на судні або на березі, а також алгоритмами роботи. Розглянемо підхід при установці наземного контрольно-вимірювального пункту на березі.

Розроблені методи базуються на основному рівнянні метрології, яке для даного випадку має такий вигляд:

$$\Delta\varphi = \varphi_c - \varphi_e; \quad (1)$$

$$\Delta\lambda = \lambda_c - \lambda_e; \quad (2)$$

$$\Delta h = h_c - h_e, \quad (3)$$

де $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$, Δh – похибки визначення широти, довготи і висоти відповідно;

φ_c , λ_c , h_c – координати судна, розраховані за сигналами навігаційних супутників;

φ_e , λ_e , h_e – опорні координати судна, що обчислюються відповідно до виразу:

$$\varphi_e = \varphi_l + \frac{l \cos(K+\alpha)(1-e^2 \sin^2 \varphi_l)^{1/2}}{a(1-e^2)\text{arc}1'}; \quad (4)$$

$$\lambda_e = \lambda_l + \frac{l \sin(K+\alpha)(1-e^2 \sin^2 \varphi_l)^{1/2}}{a \cos \varphi_l \text{arc}1'}; \quad (5)$$

$$h_e = h_l + z_2, \quad (6)$$

де $\varphi_c, \lambda_c, h_c$ – координати (X_l, Y_l, Z_l) лазерного локатора, встановленого на судні, що визначаються за допомогою виразу (7) та їх подальше переведення у сферичну систему координат;

l – проекція вектора на площину істинного горизонту;

K – курс судна;

α – кут між діаметральною площиною і проекцією l ;

e – еліпсоїдний ексцентриситет;

a – велика піввісь еліпсоїда;

$arc1'$ – хвилина дуги;

z_2 – векторна проекція L_2 на ось oZ .

Визначення координат оптичного входу кута, встановленого на судні, здійснюється відповідно до виразу

$$D_i = \sqrt{(X_{Q_i} - X_l)^2 + (Y_{Q_i} - Y_l)^2 + (Z_{Q_i} - Z_l)^2}, \quad i = \overline{1, 3}, \quad (7)$$

де $(X_{Q_i}, Y_{Q_i}, Z_{Q_i})$ – високоточні координати i -го оптичного кутового відбивача.

Навігаційний космічний апарат (НКА) GPS передає на Землю сигнали часу та положення, які використовуються приймачами GPS для визначення місця, часу та швидкості.

Обладнання користувача (ОК) – це GPS-приймач, який використовується для визначення місця розташування, часу та швидкості. ОК можна встановити на судно або на інший транспортний засіб.

Оптичний відбивач кута (ОВК) являє собою прилад, який використовується для визначення місця розташування судна за допомогою наземної контрольно-вимірювальної точки. На судні встановлюється ОВК, а на березі встановлюється наземний контрольно-вимірювальний пункт (НКВП).

Наземний контрольно-вимірювальний пункт являє собою прилад, який використовується для визначення місця розташування судна за допомогою лазерного променя. НКВП встановлюється на березі, а ОВК – на судні.

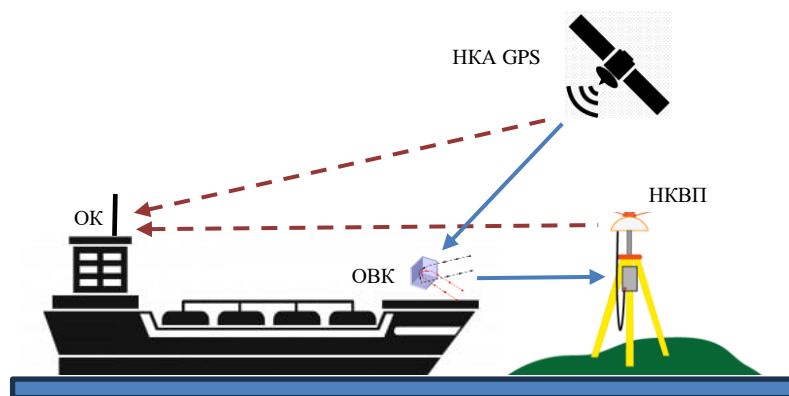


Рис. 1 – Узагальнена схема системи контролю точності суднового супутникового навігаційного обладнання

Схема роботи системи визначення місця розташування судна за допомогою НКВП є такою (рис. 1):

1. НКА посилає лазерний промінь на ОВК, встановлений на судні.
2. ОВК відбиває лазерний промінь назад до НКВП.
3. НКВП вимірює час, необхідний для проходження лазерного променя НКВП до ОВК і навпаки.

4. Використовуючи знання швидкості світла, НКВП розраховує відстань до судна.
5. НКВП передає відстань до судна на ОК, встановлене на судні.
6. ОК використовує відстань до судна та інші дані, отримані з НКА GPS, для визначення місця розташування, часу і швидкості судна.

Таким чином, система позиціонування судна НКВП – це високоточна система, яка може використовуватися для визначення положення судна у будь-яких умовах, включаючи погану видимість.

При вирішенні завдання управління характеристиками точності необхідно враховувати геометричні розбіжності між розташуваннями антен НКВП та ОК (рис. 2), щоб отримати достовірну різницю координат.

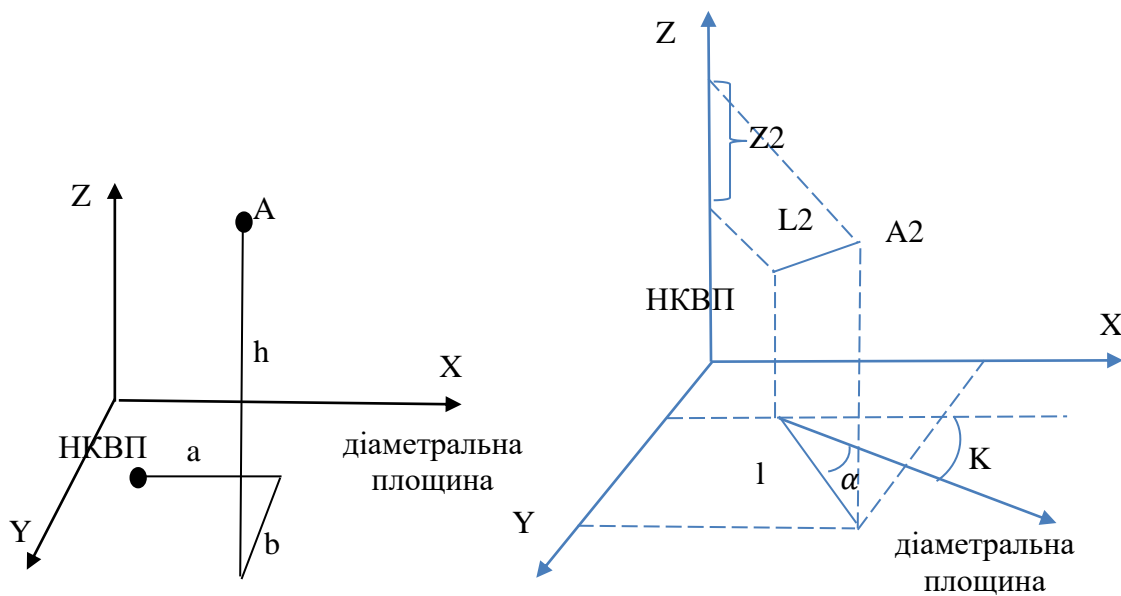


Рис. 2 – Взаємне розташування НКВП й антени ОК

Для врахування крену і диференту можуть використовуватися геометричні співвідношення. Ці співвідношення враховують як крен, так і диферент, а також їх комбінований вплив. Крен – це нахил судна щодо його поздовжньої осі. Диферент – це нахил судна в сторону від його діаметральної площини. Обидва ці параметри можуть мати великий вплив на керуваність судна, а також на його плавучість і стійкість. Геометричні співвідношення дають можливість розраховувати параметри судна при різних умовах, включаючи крен і диферент. Це дозволяє судноводі приймати обґрунтовані рішення про те, як експлуатувати судно в різних умовах.

Структура методу моніторингу і поліпшення характеристик точності апаратури супутникової навігації судна в реальних умовах експлуатації шляхом порівняння координат, визначених апаратурою супутникової навігації судна, з координатами, визначеними наземним контрольно-вимірювальним пунктом, показана на рис. 3. Реалізація методу дає можливість контролювати характеристики точності апаратури супутникової навігації судна у процесі фактичної експлуатації.

Запропонований у статті метод контролю характеристик точності суднового супутникового навігаційного обладнання на базі наземного контрольно-вимірювального пункту, встановленого на березі, дозволяє з високою вірогідністю визначати похибки супутникового навігаційного обладнання в різних умовах реальної експлуатації.

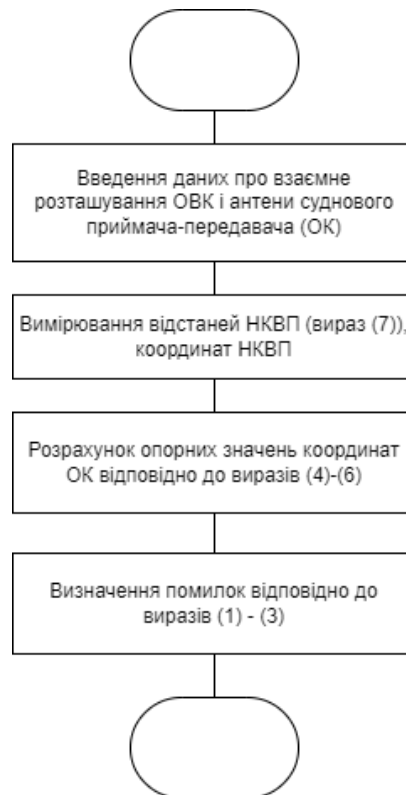


Рис. 3 – Структура методу моніторингу і поліпшення характеристик точності апаратури супутникової навігації судна

Висновки

Сучасні суднові радіонавігаційні системи забезпечують навігаційне забезпечення безпеки судноплавства. Однак ці системи мають обмеження, які можуть змінюватися у процесі фактичної експлуатації. Тому виникає необхідність контролю і поліпшення точних характеристик апаратури супутникової навігації судна у процесі фактичної експлуатації. У статті запропоновано метод контролю точних характеристик суднової супутникової навігаційної апаратури на основі наземного контрольно-вимірювального пункту, встановленого на березі. Метод дає можливість з високою точністю визначати похибки супутникового навігаційного обладнання в різних умовах реальної експлуатації. Це дозволяє отримувати більш достовірну інформацію про місцезнаходження судна, що в кінцевому підсумку підвищує рівень безпеки плавання.

Перелік використаних джерел:

1. Construction of shipborne navigation equipment's comprehensive effectiveness evaluation index system based on improved ADC model / J. Guo, T.-W. Li, C.-X. Li, Q. Huang, Z.-Y. Li. *Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, Yantai, China, 2014. Pp. 822-826. DOI: <https://doi.org/10.1109/CGNCC.2014.7007316>.
2. An improved cloud-theory-based method to evaluate shipborne navigation equipment's effectiveness / J. Guo, S. Gao, T.-W. Li, Q. Huang, F.-J. Meng. *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, China, 2015. Pp. 1403-1408. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2015.7279506>.
3. Jiang Y., Wang J. Study on Shipboard Navigation Method Based on MEMS/GNSS Integration. *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Kunming, China, 2021. Pp. 7162-7169. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9601752>.
4. Filtering Performance Evaluation of INS/GPS Integrated Navigation System Based on Grey Relation / W.X. Xia, X.D. Yang, W. Wang, J. Liu. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*. 2012. Vol. 32, № 4. Pp. 41-44.
5. Efficiency Evaluation of DVL Based on AHP and Fuzzy Integrated Estimation / H.L. Wei, T.W. Li,

- M.B. Fan, S. Sun. *Ship Electronic Engineering*. 2010. Vol. 30, № 8. Pp. 71-73.
6. Duan Y.J., Wu C., Li C.E. An Improved Model of Effectiveness Evaluation of Satellite Navigation System. *Fire Control and Command Control*. 2008. Vol. 33, no. 5. Pp. 133-136.
 7. Guo M., Guo C., Zhang C. SINS/GNSS-Integrated Navigation of Surface Vessels Based on Various Nonlinear Kalman Filters and Large Ship Dynamics. *Journal of Electrical Engineering and Technology*. 2021. Vol. 16, № 1. Pp. 531-546. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00537-z>.
 8. Kennedy S., Hamilton J., Martell H. Architecture and System Performance of SPAN-NovAtel's GPS/INS Solution. *2006 IEEE/ION Position Location And Navigation Symposium*. 2006. Pp. 266-274. DOI: <https://doi.org/10.1109/PLANS.2006.1650612>.
 9. Constrained MEMS-Based GNSS/INS Tightly Coupled System With Robust Kalman Filter for Accurate Land Vehicular Navigation / D. Wang, Y. Dong, Z. Li, Q. Li, J. Wu. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, № 7. Pp. 5138-5148. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2955798>.
 10. Wei Y., Li H., Lu M. Spoofing profile estimation-based GNSS spoofing identification method for tightly coupled MEMS INS/GNSS integrated navigation system. *IET Radar Sonar and Navigation*. 2020. Vol. 14, № 2. Pp. 216-225. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0264>.

References:

1. Guo J., Li T.-W., Li C.-X., Huang Q., Li Z.-Y. Construction of shipborne navigation equipment's comprehensive effectiveness evaluation index system based on improved ADC model. *Proceedings of 2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*, Yantai, China, 2014, pp. 822-826. doi: <https://doi.org/10.1109/CGNCC.2014.7007316>.
2. Guo J., Gao S., Li T.-W., Huang Q., Meng F.-J. An improved cloud-theory-based method to evaluate shipborne navigation equipment's effectiveness. *2015 IEEE International Conference on Information and Automation*, Lijiang, China, 2015, pp. 1403-1408. doi: <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2015.7279506>.
3. Jiang Y., Wang J. Study on Shipboard Navigation Method Based on MEMS/GNSS Integration. *2021 33rd Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Kunming, China, 2021, pp. 7162-7169. doi: <https://doi.org/10.1109/CCDC52312.2021.9601752>.
4. Xia W.X., Yang X.D., Wang W., Liu J. Filtering Performance Evaluation of INS/GPS Integrated Navigation System Based on Grey Relation. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2012, vol. 32, № 4, pp. 41-44.
5. Wei H.L., Li T.W., Fan M.B., Sun S. Efficiency Evaluation of DVL Based on AHP and Fuzzy Integrated Estimation. *Ship Electronic Engineering*, 2010, vol. 30, № 8, pp. 71-73.
6. Duan Y.J., Wu C., Li C.E. An Improved Model of Effectiveness Evaluation of Satellite Navigation System. *Fire Control and Command Control*, 2008, vol. 33, № 5, pp. 133-136.
7. Guo M., Guo C., Zhang C. SINS/GNSS-Integrated Navigation of Surface Vessels Based on Various Nonlinear Kalman Filters and Large Ship Dynamics. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 2021, vol. 16, № 1, pp. 531-546. doi: <https://doi.org/10.1007/s42835-020-00537-z>.
8. Kennedy S., Hamilton J., Martell H. Architecture and System Performance of SPAN-NovAtel's GPS/INS Solution. *2006 IEEE/ION Position Location And Navigation Symposium*, 2006, pp. 266-274. doi: <https://doi.org/10.1109/PLANS.2006.1650612>.
9. Wang D., Dong Y., Li Z., Li Q., Wu J. Constrained MEMS-Based GNSS/INS Tightly Coupled System With Robust Kalman Filter for Accurate Land Vehicular Navigation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, vol. 69, № 7, pp. 5138-5148. doi: <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2955798>.
10. Wei Y., Li H., Lu M. Spoofing profile estimation-based GNSS spoofing identification method for tightly coupled MEMS INS/GNSS integrated navigation system. *IET Radar Sonar and Navigation*, 2020, vol. 14, № 2, pp. 216-225. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0264>.

Рецензент: О.В. Мельник,
канд. техн. наук, доц., ДУІТ

Стаття надійшла 12.02.2023
Стаття прийнята 14.04.2023

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

До публікації у збірнику приймаються тільки наукові статті, виконані відповідно до вимог Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003р. № 7-05/1, які мають наступні необхідні елементи: **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; **формулювання цілей статті** (постановка завдання); **виклад основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; **висновки** з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку та **перелік використаних джерел** (оформлений відповідно до стандарту – ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання»). Список джерел повинен бути складений в порядку спогяду в тексті. Посилання на літературу поміщають у квадратні дужки. Після списку використаних джерел надається пристайейна бібліографія латиницею (**References**).

Стаття може бути представлена на українській або англійській мовах в макетному варіанті. Текст статті, **завізований авторами власноручним підписом**, подається в редакцію збірника в друкарському вигляді (**1 примірник**), з **вказаними робочими телефонами та електронними адресами авторів**.

Стаття приймається до розгляду тільки при наявності відповідних супровідних документів та електронного варіанту на електронному носії у вигляді текстового файлу у форматі редактора Microsoft Office Word.

Формат листа – А4. Розміри полів: верхнє, нижнє – по 20 мм; лівє, правє – по 25 мм Основний текст набирається шрифтом Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал – 1,0. Червоний рядок абзаців відповідає відступу – 1 см. Нумерація сторінок не проставляється. Вирівнювання тексту виконується по ширині. Для спеціальних символів і формул використовувати шрифт Symbol MT Extra, в редакторі формул слід використовувати математичний курсив. Графічний матеріал, представлений у вигляді малюнків і графіків, повинен бути вмонтований в текст статті.

Стаття повинна містити номер УДК (в лівому верхньому кутку). На наступному рядку по правому полю, жирним шрифтом, розмір 11 – прізвище, ім'я та по батькові (у називному відмінку) з нарядковими номерами; в нижній частині першої сторінки у вигляді зноски курсивом, розмір шрифту 10 – науковий ступінь, вченє звання (як що немає – посада), місце роботи (без скорочень), місто, ORCID при наявності, адреса електронної пошти; іноземні автори вказують назву країни. Далі, після міжрядкового інтервалу друкується назва статті (прописними літерами, по центру, без заключної крапки); анотації двома мовами (для статей не англійською мовою обсяг анотації англійською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова; для статей не українською мовою обсяг анотації українською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), першою наводиться анотація на мові статті (відступ зліва і справа по 1 см, курсивом) та ключові слова (від трьох до восьми).

Наприкінці статті повинні бути приведені ініціали, прізвище, вчений ступінь, вченє звання, місце роботи рецензента; дата подачі статті.

До статті надаються наступні супровідні матеріали (**по одному примірнику**):

- експертний висновок про можливість публікації статті у відкритому друці;
- рецензія фахівця за профілем статті, в якій повинні бути відображені наукова новизна результатів, їх цінність і значущість, зауваження по суті статті і по її оформленню;
- згода на обробку персональних даних (окрема для кожного з співавторів);
- ліцензійний договір (у **двох екземплярах**).

Форми необхідних документів та вимоги до оформлення статей представлені на сайті (http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/pages/view/requirements). Архів видань див.: http://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/issue/archive.

Відповідальність за зміст статті несе автор. Статті, що не відповідають зазначеним вимогам, не розглядаються.

Повністю оформлені статті і необхідні документи передаються в редакцію збірника відповідальному секретарю Савенко Ользі Сергіївні, тел.: (098) 480-24-03.

Підписано до друку 29.06.2023 р.

Папір тип № 2. Умов. друк. ар. 19,38. Тираж 100.

Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу. Ціна договірної