

**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 48

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2024

**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 48

Section: Technical sciences

Dnipro, 2024

УДК 06.055.2

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2024. Вип. 48. 229 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024>.

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 електроварювання 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 27.06.2024 р.

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

© ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет» (ДВНЗ «ПДТУ»), 2024

ЗМІСТ

CONTENTS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**

Бойко Н.І., Черненко А.В.

Modern approaches to data storage: comparison of relational and cloud data warehouses using etl and elt methods

7

N.I. Boyko, A.V. Chernenko

Modern approaches to data storage: comparison of relational and cloud data warehouses using etl and elt methods

Кіріакіді С.К., Кривенко О.В.

Дослідження методологій розробки веб-додатку для медичної клініки з використанням React

19

S.K. Kiriakidi, O.V. Kryvenko

Study of web application development methodology for a medical clinic using React

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

APPLIED MECHANICS

Карпенко Т.М., Шишкін В.В.

Про деякі методи визначення власних частот крутильних коливань у металорізальних верстатах

26

T.M. Karpenko, V.V. Shishkin

On some methods of determining proper frequencies torsional oscillations in metal-working machines

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTORIAL ENGINEERING

**Ищенко А.О., Карпенко Т.М.,
Капустін С.В.**

Визначення динамічних складових реакцій в підшипниках дискового валу роторних пил (повідомлення 2)

39

**A.O. Ishchenko, T.M. Karpenko,
S.V. Kapustin**

Determination of dynamic component reactions in support bearings of rotor saws for cutting hot rolled (message 2)

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

**Чупринов Є.В., Кассім Д.О.,
Реков Ю.В.**

Дослідження можливості підвищення якості окатишів за рахунок кращого методу підготовки донної та бортової постілі

47

**Ye.V. Chuprynov, D.O. Kassim,
Yu.V. Rekov**

Study of the possibility of improving the quality of pellets through a better method of bottom and side bed preparation

Фон Прусс М.А.

Методи нейтралізації залізовмісних фаз в ливарних алюмінієвих сплавах системи Al-Si-Cu з вмістом заліза до 1,5 % мас.

52

M.A. Fon Pruss

Methods of neutralization of iron-containing phases in cast aluminum alloys of the Al-Si-Cu system with iron content of up to 1,5 mass. %

**Григоренко В.У., Алексеєнко С.В.,
Головченко О.П.**

Розвиток методу визначення плануємої поперечної різностінності холоднокатаних труб на основі експериментальних досліджень при різних варіантах виконання подачі та повороту

59

**V.U. Hryhorenko, S.V. Alekseyenko,
O.P. Holovchenko**

Development of the method for determining the plane cross-wall diversity of cold-rolled pipes on the basis of experimental research with different options of feeding and turning

Дан Л.О., Трофімова Л.О.

Явище термодифузії в рідких і твердих металах у роботах О. М. Скребцова

66

L. Dan, L. Trofimova

The phenomenon of thermodiffusion in liquid and solid metals in the works of O. M. Skrebtsov

Григоренко В.У., Заболотній О.М.

Складові розв'язки методів калібрування валків для прокатки швелерів на основі зменшення нерівномірності деформування

73

V.U. Hryhorenko, O.M. Zabolotnii

Components of the development of methods for calibrating rollers for rolling channels based on changed non-uniformity of deformation

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

Чорна В.О., Кудряшов О.О.

Порівняльний аналіз ефективності пасивного та активного фільтрів вищих гармонік в мережі з нелінійним навантаженням

83

V.O. Chorna, O.O. Kudryashov

Comparative analysis of the effectiveness of passive and active filters of higher harmonics as part of the electrical complex of metal heat treatment

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

AUTOMATION AND COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES

Ісаєв А.Б., Мірошниченко В.І., Койфман О.О., Сімкін О.І.

Застосування двосхідчастого вхідного впливу для зменшення динамічного відхилення перехідного процесу за завданням у системах автоматизованого управління

92

A.B. Isaiev, V.I. Miroshnychenko, O.O. Koyfman, O.I. Simkin

Application of two-step input to reduce overshoot of the transient response at automated control systems

МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING EQUIPMENT

Діденко Н.В.

Аналізування методів оцінювання цільової невизначеності

104

N. Didenko

Analysis of target uncertainty assessment methods

ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

ENVIRONMENTAL PROTECTION TECHNOLOGY

Волошин В.С., Азархов О.Ю.

Конкуренція та перспективи білково-вуглецевих та специфічних неорганічних екосистем на Землі

111

V.S. Voloshyn, A.Yu. Azarkhov

Competition and perspectives of protein-carbon and specific inorganic ecosystems on Earth

Дерюгін О.В., Столбченко О.В., Лябах Д.А., Чеберячко Л.М.

Обґрунтування ключових чинників щодо застосування перспективного екологічного транспорту в системі міських пасажирських перевезень

120

O. Deryugin, O. Stolbchenko, D. Liabakh, L. Cheberiachko

Justification of key factors regarding the application of prospective ecological transport in the urban passenger transportation system

Волошин В.С.

Особливості паперових стін у формуванні мікроекосистеми «японський дім»

134

V.S. Voloshyn

Features of paper walls in the formation of the «Japanese house» microecosystem

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

CIVIL SECURITY

**Чеберячко С.І., Радчук Д.І.,
Дерюгін О.В., Чеберячко Ю.І.,
Наумов М.М., Кравченко Б.Д.**

Удосконалення моделі для розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувального респіратора від шкідливого аерозолу

142

**S. Cheberiachko, D. Radchuk,
O. Deryuhin, Yu. Cheberiachko,
M. Naumov, B. Kravchenko**

Improvement of the model for calculating the protection coefficient of filtering respirators from harmful aerosol

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

RIVER AND SEA TRANSPORT

**Калініченко Є.В.,
Томчаковський Г.Г.,
Оберто Сантана Л.Е., Колеснік О.В.,
Саф'ян О.С.**

Аналіз особливостей методу поєднання електронної картографічної навігаційно-інформаційної системи з радіолокаційною станцією судна

158

**Y.V. Kalinichenko,
G.G. Tomchakovsky,
L.E. Oberto Santana, O.V. Koliesnik,
O.S. Safyan**

Analysis of the peculiarities of the method of combining an electronic cartographic navigation information system with a ship's radar station

**Погорлецький Д.С., Грицук І.В.,
Худяков І.В., Самарін О.Є.**

Особливості експлуатації лубрикаторної системи мащення судових малооборотних двигунів

167

**D.S. Pohorletskyi, I.V. Gritsuk,
I.V. Khudiakov, O.E. Samarin**

Features of the operation of the lubrication system for lubricating ships' low-speed engines

Калініченко Т.В.

Основні напрямки підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнення суден

178

T.V. Kalinichenko

Main directions for improvement of navigation safety through prevention of ship collisions

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

ROAD TRANSPORT

Матейчик В.П., Навроцький А.В.
Систематизація схем апаратного забезпечення систем моніторингу експлуатації транспортних засобів

184

V.P. Mateichyk, A.V. Navrotskyi
Systematization of hardware schemes of vehicle operation monitoring systems

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ
(ЗА ВИДАМИ)**

**TRANSPORT TECHNOLOGIES
(BY TYPES)**

Пархоменко Л.О., Прохоров В.М.
Уточнення моделі розрахунку плану формування поїздів за рахунок урахування ефекту навантаженості сортувальних станцій

193

L.O. Parkhomenko, V.M. Prokhorov
Refinement of the train formation plan calculation model by considering the effect of switchyard stations' workload

Ҁаненко А.

Intelligent system for monitoring the operational properties of ship power equipment **205**

A. Yanenko

Intelligent system for monitoring the operational properties of ship power equipment

Волошин В.С.

Ризики подій та сценарії Паддінгтонської катастрофи 1999 року **219**

V.S. Voloshyn

Event risks and scenarios for the 1999 Paddington accident

ДО УВАГИ АВТОРІВ

229 INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

122 КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.75

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310669

© Boyko N.I.¹, Chernenko A.V.²

MODERN APPROACHES TO DATA STORAGE: COMPARISON OF RELATIONAL AND CLOUD DATA WAREHOUSES USING ETL AND ELT METHODS

The paper analyses various aspects of the use of relational and cloud data warehouses as well as methods of integrating ETL and ELT data. A comparative analysis of these approaches, their advantages and disadvantages are provided. A central relational data warehouse is proposed that provides a single version of truth (SVOT), which allows standardising and structuring data, avoiding differences and providing the access to the same information for all users of an organisation. It is analysed the methodological approaches to implementing a data warehouse: top-down, bottom-up, and from middle. It is described cloud data warehouses that use cloud technologies to provide scalability, availability and fault tolerance, which is important for the companies with huge amounts of data. The advantages and disadvantages of ETL and ELT are analysed: ETL transforms data before it is loaded into the warehouse, which makes it easier to maintain data confidentiality. ELT performs transformation after loading, which allows for more flexible data processing directly in the warehouse. In the article, we deal with the approaches to implementing a data warehouse: top-down is suitable for strategic planning, bottom-up allows for faster results, and the middle approach combines both methods to achieve optimal efficiency. We considered cloud data storage: compared to relational storage, cloud storage is more flexible, scalable and efficient, providing speed and reducing infrastructure costs. It is described cloud storage architectures: massive parallel processing, hybrid architectures, lambda architectures, and multi-structured architectures. They provide high performance and flexibility in data processing. It is described data storage technologies: Data Lake, Polyglot Persistence, Apache Iceberg, Apache Parquet, and columnar databases that provide efficient storage and processing of large amounts of data.

Key words: data warehouse, relational data warehouse, Data Lake, Polyglot Persistence, Apache Iceberg, Apache Parquet.

Бойко Н.І., Черненко А.В. Сучасні підходи до зберігання даних: порівняння реляційних і хмарних сховищ з використанням ETL та ELT методів. У дослідженні проаналізовано різні аспекти використання реляційних і хмарних сховищ даних, а також методи інтеграції даних ETL та ELT. Наведено порівняльний аналіз цих підходів, їх переваги та недоліки. Запропоновано центральне реляційне сховище даних, яке забезпечує єдину версію правди (Single Version of Truth), що дозволяє стандартизувати та структурувати дані, усуваючи розбіжності і забезпечуючи доступ до однакової інформації для всіх користувачів організації. Проаналізовано методологічні підходи для реалізації сховища даних: зверху вниз, знизу вгору та із середини. Розглянуті хмарні сховища даних, які використовують хмарні технології для забезпечення масштабованості, доступності та відмовостійкості, що є важливим для компаній з великими обсягами даних. Проаналізовано переваги та недоліки ETL та

¹ Ph.D. in Economics, Associate Professor, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: 0000-0002-6962-9363, Nataliya.i.boyko@gmail.com

² student, Lviv Polytechnic National University, Lviv, ORCID: 0009-0006-7910-2393, chernenko.anastasiia789@gmail.com

ELT: ETL виконує трансформацію даних перед їх завантаженням у сховище, що спрощує дотримання конфіденційності даних. ETL виконує трансформацію після завантаження, що дозволяє більш гнучко обробляти дані безпосередньо в сховищі. В статті розглянуто підходи до реалізації сховища даних: зверху вниз підходить для стратегічного планування, знизу вгору дозволяє швидше отримувати результати, а підхід із середини комбінує обидва методи для досягнення оптимальної ефективності. Розглянуто хмарні сховища даних: порівняно з реляційними сховищами, хмарні сховища є більш гнучкими, масштабованими та ефективними, забезпечуючи швидкість і зниження витрат на інфраструктуру. Наведені архітектури хмарних сховищ: масова паралельна обробка, гібридні архітектури, лямбда-архітектури та багатоструктурні архітектури. Вони забезпечують високу продуктивність та гнучкість у обробці даних. Наведені технології зберігання даних: Data lake, Polyglot Persistence, Apache Iceberg, Apache Parquet та стовпчасті бази даних, які забезпечують ефективне зберігання та обробку великих обсягів даних.

Ключові слова: база даних, реляційні бази даних, Озеро даних, Polyglot Persistence, Apache Iceberg, Apache Parquet.

Description of the problem. Nowadays, processing huge amounts of information is a highly important task for government agencies, scientific research and business. Relational data warehouses, which have been around for a long time, play a key role in this, but they were not designed to cope with today's explosive data growth or to deal with the ever-changing needs of end users.

With cloud storage, there are no more limitations to physical data centres, and it is possible to dynamically expand or contract your data stores to quickly respond to changing business budgets and requirements. Similar to traditional data warehousing, cloud data warehousing stores information from a variety of data sources, such as IoT and financial systems [1].

The possibilities of relational and cloud data warehouses are determined by the need to choose the optimal technology for efficient management of large amounts of data, ensuring high performance and security, and optimising IT infrastructure costs. Analysing these technologies will not only help to measure their current state, but also predict trends in their development and use in the future.

The importance of this paper is based on the fact that in today's world, with the help of a large amount of properly structured and processed data, it is possible not only to view user data, but also to apply machine learning methods to it, such as prediction, classification or recommendation systems that help in various areas of our lives.

The practical value of this research includes the possibility of real improvement of data storage and processing data in organisations, which will increase productivity, reduce costs, improve data reliability and security, and support innovative business development.

The purpose of this publication is to conduct a comprehensive analysis of the capabilities of relational and cloud data warehouses, as well as to assess their efficiency and perspectives for storing and processing large amounts of data.

Analysis of the latest research and publications. Modern research is actively exploring new approaches to data storage and processing. In general, they often describe the perspectives of cloud technologies, their advantages and disadvantages, as well as the process of migration from relational warehouses.

Literature analysis is an important step in conducting scientific research, as it allows you to get acquainted with the existing theoretical and practical knowledge on the subject, identify the main concepts and trends, and detect gaps in knowledge that require further study. As part of this paper, a number of scientific articles, books and research papers on relational and cloud data warehouses were analysed.

In the article «A comparative analysis of traditional and cloud data warehouse» [1], the author compares traditional data warehouses with cloud data warehouses and notes that traditional warehouses might not be suitable for modern data analysis needs due to changes in the industry. Traditional warehouses are difficult to scale and cannot effectively cope with the growing number of users. The author describes the appearance of a new type of data warehouse – cloud warehouses, which have new aspects of design and implementation. Cloud data warehouses have evolved over time, which has an impact on applications and business domains, allowing for efficient management of huge amounts of data, easy

scaling of resources, and serving an unlimited number of users. In conclusion, the author notes that the future belongs to cloud data warehouses.

In the article «Migrating a research data warehouse to a public cloud: challenges and opportunities» [2], the author shares his experience of moving from relational data warehouses to cloud-based ones. It is noted that the needs for computing resources and warehouses in research environments can quickly grow beyond the capabilities of local systems. New research data warehouses (RDWs) are moving to cloud platforms as they provide the scalability and flexibility needed to meet modern challenges.

The paper «Data-warehousing on Cloud Computing» [3] describes that cloud processing has become a new paradigm for storing data and providing data processing services over the Internet. Cloud computing is beneficial to business owners because it eliminates the need to plan for services in advance, allowing businesses to start small and increase resources only as demand for services grows.

There is also the article «Integration Methods and Advantages of Machine Learning with Cloud Data Warehouses» [4], which focuses on the integration of cloud data warehouses with machine learning and the importance of parallel integration methods. First, the article describes how the integration of cloud data warehouses and machine learning can support business innovation and productivity. It continues with a discussion of the challenges of managing machine learning models in production environments and the role of cloud data warehousing in solving these problems. Next, the authors present the Snowflake cloud computing integration in details, including the implementation stages and parallel integration processes. The authors analyse the results of the parallel integration method and believe that it has good prospects for application and development potential in cloud data warehouses.

The paper «A Data Warehouse Approach for Business Intelligence» [5] is devoted to the study of perception, understanding, querying and managing spatiotemporal data for online analytical processing (OLAP). The authors point out that in a cloud data warehouse, business users can access and query data from multiple sources and geographically distributed locations. Business analysts and decision makers rely on data warehouses, especially for data analysis and reporting. Temporal and spatial data are critical to decision-making and marketing strategies, and many applications require modelling and specialised processing of such data because it cannot be effectively handled in a conventional multidimensional database.

The article «Optimising Data Warehousing Performance Through Machine Learning Algorithms in the Cloud» [6] explores the integration of machine learning (ML) into cloud data warehouses, focusing on optimisation challenges, methodology, results, and future trends. The authors examine data warehouses, which are central to reporting and analysis, and are transformed by ML, solving problems such as high maintenance costs and failure rates. Integration improves performance through query optimisation, indexing, and automated data management. The results that they presented demonstrate the use of ML in predictive analytics for working load management, automated query optimisation, and adaptive resource management, which improves performance.

In the paper «From Classical DW to Cloud Data Warehouse» [7], the author researches Data Lake tools and notes that the technology has evolved significantly over the past decade. It responds to ever-growing data volumes with the support of distributed computing tactics. The study provides an example of applications of different types of structured, semi-structured and unstructured data. Data warehouse processing, namely data lakes, is moving from on-premises server rooms to cloud data centres. The data warehouse solution must also be able to meet the requirements of machine learning.

The authors of the article «Privacy and Availability in Cloud Data Warehouse» [8] write that with the development of cloud computing, data warehouses can benefit from this new technology in terms of cost reduction, computing power and response time. In line with technological advances, cloud computing has disadvantages, particularly in terms of security, which must be taken into account to take full advantage of this solution. To solve this problem, the authors proposed a new secure scheme for external data storage in the cloud. This new scheme is based on the (n, k) Shamir secret sharing scheme, IDA information dissemination algorithm, and MV-OPE multi-valued order preserving encryption. The scheme can provide high-confidentiality data, it also ensures data availability and minimises dependence on a single cloud provider. Experimental results in their paper show that the scheme allows sending queries to the data store in the cloud without further processing with high performance. The disadvantage of this solution is that if sensitive data and descriptive attributes are large in data volume and make up the majority of the data in the storage and are costly. Therefore, such solutions are more suitable for a repository that contains little confidential data [9].

A review of the literature (Table 1) shows that both technologies have their advantages and disadvantages, and the choice between them depends on the specific needs of the organisation. Relational databases are traditionally reliable and efficient for structured data and transactional operations, while cloud storage offers flexibility, scalability and cost-effectiveness for processing huge amounts of data. Further data processing experiments will allow us to draw more detailed conclusions and recommendations on the optimal technology.

Table 1

Analysis of the main publications on the researched topic

Title of the paper (author)	Approaches to data analysis and storage	Advantages of applying the approaches	Disadvantages of applying the approaches
Rehman, K. U. ur, Ahmad, U., & Mahmood, S. (2018).	Comparison of traditional data warehouses with cloud	The processes that take place in cloud data warehouse have an impact on applications and business domains. This has given rise to the need to control huge data. It is possible to increase or decrease the storage itself at any time. There are no limitations on the number of users. The advantage of the traditional approach is the simple implementation of processes.	Traditional data warehousing is unsuitable for data analytics needs due to the problem of scaling data, and the difficulty with the growing number of users. Cloud warehouses can be hard to integrate.
Michael G. Kahn, Joyce Y. Mui, Michael J. Ames, Anoop K. Yamsani, Nikita Pozdeyev, Nicholas Ra-faels, Ian M. Brooks (2022)	Migration from relational to cloud warehouses	Moving from a traditional data warehouse is not easy. Migration of tools and processes and access to resources is performed on an as-needed basis, which slows down the implementation of cloud warehouses.	Relational data warehouses are being forced to move to cloud platforms for the scalability and flexibility needed to cope with new challenges and increasing data volumes
Hemlata Verma (2013)	Comparison of traditional data warehouses with cloud	Cloud computing data storage is elastic, scalable, takes less time to deploy, is reliable and has lower costs.	Data storage in the cloud is largely hypothetical, and cloud comparisons can lead to new insights into the possibilities and impossibilities of deploying storage in a modern cloud environment.

Summary of the main material. A relational data warehouse acts as a central repository for many subject areas and provides a Single Version of Truth (SVOT). This means that all data in the repository is standardised and structured. This allows to eliminate differences and provide all users with access to the same information, which improves decision-making, collaboration and efficiency throughout the organisation [10, 11].

ETL (Extract, Transform, Load) is a process used in data warehouses to extract data from a variety of sources, transform it into a suitable format, and load it into the data warehouse. ETL applies a set of business rules to cleanse and organise data from raw data, preparing it for storage, analysis, and machine learning (ML). The ETL process consists of three main steps (Fig. 1) and is iterative and repeated as new data is added to the warehouse. It ensures that the data in the data warehouse is accurate, complete and up-to-date, and in the right format for analysis and reporting [12, 13].

ELT (Extract, Load, Transform) is an alternative data integration process. This method moves raw data from the source system to the destination data warehouse. The data integration process combines data from multiple sources into one consistent warehouse. Traditional ETL tools were created to build data warehouses that support business intelligence (BI) and artificial intelligence (AI) applications [14, 15].

The main difference between ELT and ETL is the order in which the steps are performed: ELT first loads and then transforms the data, which means that the second and third steps of the ETL process are reversed (Fig. 1). ELT copies or exports data from the source locations, but instead of intermediate storage for transformation, it loads the raw data directly into the target data warehouse where it can be transformed as needed. Thus, ELT does not transform the data during transfer.

Another difference between ETL and ELT is that ETL transforms data before it is moved to a central repository, which can make it easier or more systematic to maintain data privacy than ELT (Fig. 1).

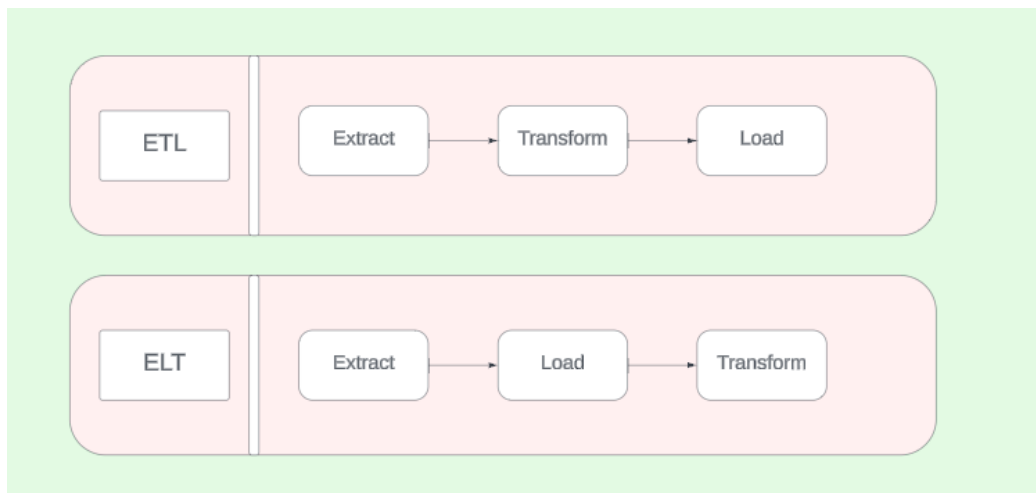


Fig. 1 – Steps of the ETL and ELT processes

Methodological approaches for implementing a data warehouse [16]:

1. Top-down design
2. Bottom-up design
3. Middle of design

The *top-down approach* works well for historical type reports, to determine what happened (descriptive analytics) and why it happened (diagnostic analytics) (Fig. 2). In a top-down approach, the general planning, design, and architecture of the data warehouse is established first, and then specific components are developed. This method highlights the importance of defining the overall enterprise vision and understanding the organisation's strategic goals and information requirements before starting to develop the data warehouse.

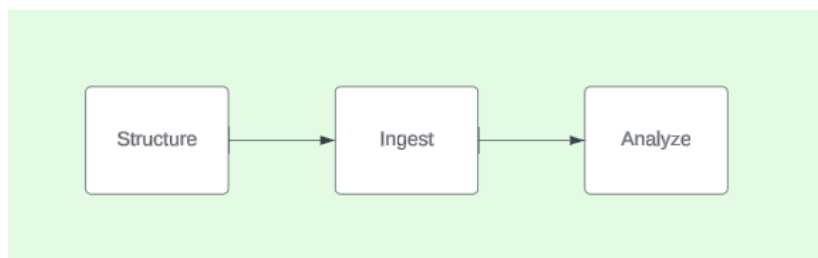


Fig. 2 – Top-down approach

Without knowing what questions to ask about the data, a *bottom-up approach* can quickly explore the data to identify relevant ones when data is initially collected, before generating any theories or

hypotheses [17]. The bottom-up approach starts with planning and designing departmental data warehouses without first developing the organisation's global computing infrastructure. This approach is preferable in many cases because it leads to final results faster (Fig. 3).

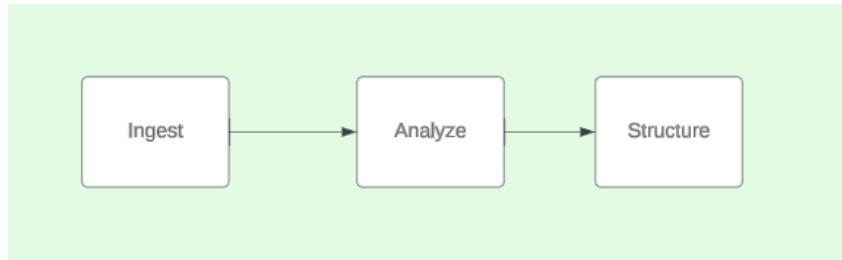


Fig. 3 – Bottom-up approach

Bottom-up and top-down approaches can be combined depending on the goals of the data warehouse project manager. The *design from the middle* approach is a combination of the above approaches applied in a spiral process. First, the core of the system is created (the top-down approach), and then it is gradually expanded by adding new or additional functionality (the bottom-up approach). Thus, each of the two approaches mentioned above can be used at each turn of the spiral [15].

Relational databases (RDBs) are one of the most common ways to organise and store structured data. The main features of RDBs are shown in Table 2.

Table 2

Main features of relational data warehouses

Features of relational data warehouses	Possibilities of using the method
Data model	<ul style="list-style-type: none"> The relational model is based on tables containing rows and columns, where each row is a separate record and columns define the attributes of the record. Popular management systems: MySQL, PostgreSQL, Oracle Database, Microsoft SQL Server
Query language	<ul style="list-style-type: none"> To work with relational databases, you can use SQL (Structured Query Language), which allows performing various operations with data: selecting, inserting, updating, deleting.
Data integrity	<ul style="list-style-type: none"> RDB ensure high data integrity through the use of transactions and various constraints (keys, indexes, uniqueness, etc.).
Scalability	<ul style="list-style-type: none"> RDB are usually scaled vertically, which means adding resources to a single server.

A cloud data warehouse is a data warehouse that exists in a cloud environment and is capable of combining exabytes of data from multiple sources. Cloud data warehouses are designed to handle complex queries and are optimised for business intelligence. The «cloud» part means that instead of managing physical servers and infrastructure, everything happens online - third-party servers do the heavy lifting, and you can access your data and analytics tools over the Internet without having to download or configure any software or applications [18].

Cloud data warehousing is critical for quick data-driven decision making, offering improved computing power and simplified data management, enabling valuable insights to be derived from updated, accurate and enriched data as needed. The data in a cloud data warehouse is well-structured and unified, ready to support a wide range of specific business intelligence use cases.

In the modern world, cloud data warehouses play a critical role in collecting, storing and processing data for decision-making. There are certain types of cloud storage architectures:

1. Massively parallel processing architecture distributes and processes complex data queries across multiple nodes, delivering high performance and scalability for huge datasets [19].

2. Hybrid architectures use a combination of on-premises and cloud infrastructure, typically with on-premises resources used only to extend the cloud where needed. They are designed to leverage the strengths and overcome the limitations of each architecture to achieve optimal efficiency and performance [20].

3. Lambda architectures process huge amounts of data using a combination of layers (batch, speed and serving). The data is delivered simultaneously to the batch and speed layers, with the batch layer supporting the processing of raw data and the speed layer supporting low-latency data that has not yet been delivered to the batch layer. At the same time, the service layer supports real-time queries [21, 22].

Multi-structured data architectures can acquire, store, and process data in a variety of formats for more complete and flexible data analysis.

A data lake is a central location that contains huge amounts of data in a raw format. Compared to a hierarchical data warehouse that stores data in files or folders, a data lake uses a flat architecture and an object store to contain data. The object store saves data with metadata tags and a unique identifier, which makes it easier to find and retrieve data across regions and improve performance [23].

Polyglot Persistence is the use of multiple storage technologies to store different types of data in a single application or system depending on how the data is used. Polyglot Persistence is about choosing the right tool for the right use case, using multiple data stores in an organisation or enterprise. Each data warehouse is optimised for a specific type of data or use case. This approach allows organisations to use different data warehouses for different projects or business units, rather than a single approach for the entire organisation [24].

Apache Iceberg is a table format that solves the problems of traditional directories and is quickly becoming the industry standard for managing data in a data lake. Iceberg introduces capabilities that allow multiple applications to work together on the same data in a consistent transaction order and define additional information about the state of datasets as they evolve and change over time [13].

Apache Parquet is an open source, column-oriented data file format designed for efficient data storage and retrieval. It provides efficient data compression and performance-enhancing coding schemes for mass processing of complex data. Apache Parquet is designed as a common exchange format for both batch and interactive workloads [20].

Columnar databases are particularly beneficial for analytical queries that often scan or aggregate large data sets but require only a few columns. Since only the necessary columns are read from the storage, import/export costs and time are minimised, providing an advantage over traditional row-based databases in analytics scenarios. For these use cases, columnar databases make better use of system resources and provide faster information [17].

In summary, cloud data storage is a new approach to data storage and processing that takes advantage of cloud technologies. The main features of cloud storage are shown in Table 3.

Table 3

Main features of cloud data warehouses

Features of cloud data warehouses	Possibilities of using the method
Data model	Cloud data warehouses can support both relational and non-relational data models, providing flexibility in choosing a data storage approach. Popular management systems: Amazon RDS, Google Cloud SQL, Microsoft Azure SQL Database
Payment model	Cloud services usually operate on a pay-as-you-go model, which allows you to optimise costs
Availability and reliability	Cloud providers deliver high availability and reliability of data through distributed architecture and backups.
Scalability	Cloud storage is usually scaled horizontally, which allows you to efficiently process huge amounts of data by distributing the load across many servers.

Based on the literature analysis, the following key aspects can be identified for comparing relational and cloud data warehouses (Table 4).

Table 4

Comparing relational and cloud data warehouses

Main characteristics of data warehouses	Relational data warehouses	Cloud data warehouses
Productivity	Relational databases demonstrate high performance when working with transactional data and complex queries.	Cloud storage provides flexibility and scalability, which can be more efficient when processing huge amounts of data.
Scalability	Relational databases are typically scaled vertically, which can limit their performance as data volumes grow.	Cloud storage is typically scaled horizontally, which allows you to distribute the load across multiple servers and provides better performance and resilience to data volume increases.
Price	The cost of relational databases can be high because of the need to maintain and upgrade the infrastructure.	Cloud storage offers a pay-as-you-go model, which can be more cost-effective for organisations with intermittent workloads.
Reliability and security	Relational databases provide high reliability due to the transactional model and integrity constraints.	Cloud storage provides reliability and security through a distributed architecture, backup, and security tools provided by the providers.

To experiment with the efficiency of relational and cloud data warehouses we chose the dataset «Amazon Books Reviews» [10], which contains 3000000 reviews for 212404 books.

We chose the PostgreSQL database to work with a relational data warehouse. To offer with a preper analysis of the data, we divided it between three tables and added identifiers for each of them:

- Table of books «books» with columns: id- book identifier, title, price. It contains 221998 values
- Table of users «users» with columns: id - user identifier, profileName. It contains 1008972 values
- Table of reviews «reviews» with columns: uuid - review identifier, book_id, user_id, score, time, summary. It contains 2966688 values.

To load the data into PostgreSQL, we used Python and its libraries such as sqlalchemy to communicate with PostgreSQL and its server; and the pandas library to read CSV files in which the data for each of the tables were structured. Queries to the data warehouse were also implemented using sqlalchemy and the time library to calculate the query time.

Queries with COUNT, SUM, GROUP BY operations are most often used in data analytics because they aggregate and summarise large amounts of data, so the focus was on them.

The requests were implemented:

1. Search for book reviews by the book identifier:

Time of request execution	0.8293237686
---------------------------	--------------

2. Number of reviews for the book by its identifier:

Time of request execution	0.913532257
---------------------------	-------------

3. The number of reviews of a book by its identifier in 2000:

Time of request execution	0.7880356312
---------------------------	--------------

4. Average rating of the book among all users:

Time of request execution	0.9420266152
---------------------------	--------------

To work with cloud storage, Amazon S3 was chosen to upload data to the cloud and DynamoDB as a database.

Firstly, the CSV file data was converted to JSON format using Python to upload the data to DynamoDB. Then it was uploaded to an S3 bucket. And after that, the data was successfully transferred to the database. Queries to the data warehouse were implemented using boto3 to connect to the server on the cloud and the time library to calculate the query time.

The same queries were performed as in the relational storage, namely:

1. Search for book reviews by the book identifier:

Time of request execution	0.6458830833
---------------------------	--------------

2. Number of reviews for the book by its identifier:

Time of request execution	0.553743124
---------------------------	-------------

3. The number of reviews of a book by its identifier in 2000:

Time of request execution	0.667219638
---------------------------	-------------

4. Average rating of the book among all users:

Time of request execution	0.707470178
---------------------------	-------------

For a better testing analysis, a general table comparing the time of each query relative to the storages is displayed (Table 5).

Table 5

Relational and cloud storage query times

Relational data warehouses	Cloud data warehouses
0.8293237686	0.6458830833
0.913532257	0.553743124
0.7880356312	0.667219638
0.9420266152	0.707470178

Analysing the table, it can be said that in all cases, the relational data warehouse processed the query and displayed the result slower than the cloud one. To better see the difference, a diagram can be displayed (Fig. 4).

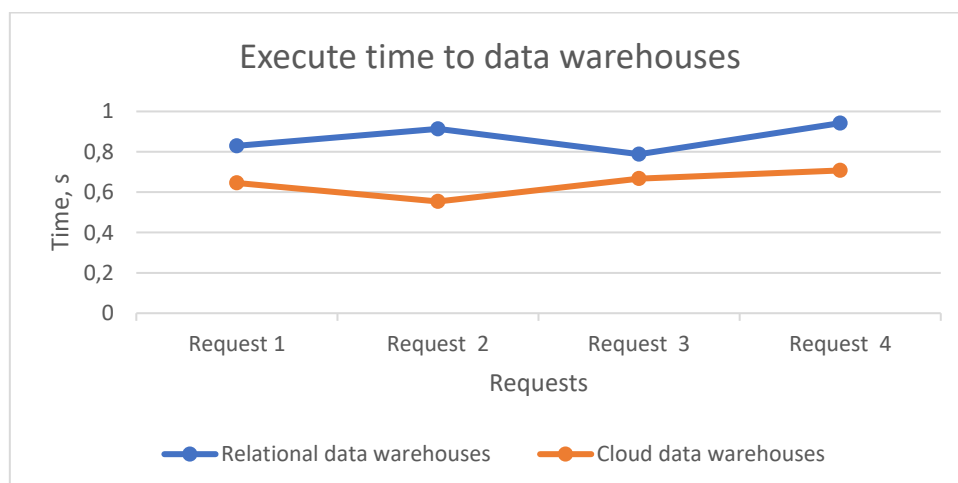


Fig. 4 – Comparison of the time spent on each request by relational and cloud warehouses

Based on the results of the experiments, a conclusion can be made that cloud data warehouses process and analyse tables and data faster than relational warehouses. The tests were conducted on 3 million records, and in large companies, these volumes reach terabytes and even exabytes. Storing such

data on physical servers is extremely difficult, as opposed to cloud storage, which is easier to scale. An additional advantage is that data can be accessed from anywhere in the world, which saves on hardware and maintenance.

In addition, cloud storage has the advantage of scalability. They can be easily adapted to the growth of data, which is important for companies that process massive amounts of information. In fact, cloud storage provides high availability and fault tolerance, which ensures continuous access to data and minimises the risk of loss.

To summarise, cloud data warehouses offer a more flexible, scalable and efficient solution for processing huge amounts of data compared to relational warehouses. They are suitable for a wide range of applications, including business intelligence, machine learning, and analysing data from various sources.

Conclusions

Many companies still use relational data warehouses because they are familiar and well-known, or because they fear that data migration will be difficult. However, cloud computing is already well established and has shown to be a reliable and efficient business solution.

The main problem for Ukraine is the unstable supply of electricity and the Internet, which are critical for data processing. Generators also have a limited lifespan. Cloud technologies can significantly improve business operations, as when using physical servers, the lack of access to them stops the company's work. Storing data in the cloud allows you to work with it from anywhere in the world, even if the local infrastructure is down.

Our lives are changing and progressing rapidly. It could be remembered how data was stored on paper, where you had to rewrite the entire document to correct an error. Later, data was stored on physical devices, edited in notebooks or on physical storage. The introduction of relational data warehouses was a significant step forward, reducing the time required to store and process data. Today, cloud computing is the next step in this development, enabling faster and more optimised data processing using a wider range of tools.

From this, we can conclude that cloud computing is a more powerful solution for working with data, and the future of business belongs to it. However, it is possible that even more powerful and relevant technologies will appear in the future.

Comparison has shown that cloud data storage offers a more flexible, scalable, and efficient solution for processing large volumes of data compared to relational storage. Cloud technologies provide significant advantages for businesses, especially in the context of modern challenges such as unstable power and internet supply in Ukraine.

Relational storage, while remaining popular due to its familiarity and stability, lags behind cloud solutions in many aspects. Cloud storage allows savings on physical equipment and ensures data access at any time and from any location, which is a key factor for the successful operation of modern businesses. Cloud technologies are the next logical step in the evolution of data storage and processing, and their use will continue to grow.

Thus, cloud data storage is a promising direction for business development, allowing adaptation to rapidly changing conditions and optimizing the handling of large volumes of information.

Acknowledgement

The study was created within the framework of the project financed by the National Research Fund of Ukraine, registered No. 30/0103 from 01.05.2023, «Methods and means of researching markers of ageing and their influence on post-ageing effects for prolonging the working period», which is carried out at the Department of Artificial Intelligence Systems of the Institute of Computer Sciences and Information Technologies of the Lviv Polytechnic National University.

References:

1. K.U. Rehman, U. Ahmad, and S. Mahmood, «A Comparative Analysis of Traditional and Cloud Data Warehouse», *VAWKUM Transactions on Computer Sciences*, vol. 6(1), pp. 34-40, 2018. **doi: 10.21015/vtcs.v15i1.487.**
2. M.G. Kahn et al., «Migrating a research data warehouse to a public cloud: challenges and opportunities», *Journal of the American Medical Informatics Association*, vol. 29 (4), pp. 592-600, 2022. **doi: 10.1093/jamia/ocab278.**

3. H. Verma, «Data-warehousing on cloud computing», *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, vol. 2(2), pp. 411-416, 2013.
4. H. Li, X. Wang, Y. Feng, Y. Qi, and J. Tian, «Integration Methods and Advantages of Machine Learning with Cloud Data Warehouses», *International Journal of Computer Science and Information Technology*, vol. 2(1), pp. 348-358, 2024. doi: **10.62051/ijcsit.v2n1.36**.
5. G. Garani, A. Chernov, I. Savvas, and M. Butakova, «A Data Warehouse Approach for Business Intelligence», in Proceedings of IEEE 28th International Conference on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE), Napoli, Italy, 2019, pp. 70-75. doi: **10.1109/WETICE.2019.00022**.
6. A. Sina, «Optimizing Data Warehousing Performance Through Machine Learning Algorithms in the Cloud», *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 12(12), pp. 1859-1867, 2023. doi: **10.21275/SR231224074241**.
7. J. Heinonen, «From Classical DW to Cloud Data Warehouse», M.S. thesis, Helsinki, Finland, 2020.
8. K. Kawthar, A. Nabli, and F. Gargouri, «Privacy and availability in cloud data warehouse», in Proceedings of the 10th International Conference on Education Technology and Computers, 2018, pp. 388-391. doi: **10.1145/3290511.3290580**.
9. Cloud Data Warehouse. [Online]. Available: <https://www.qlik.com/us/cloud-data-migration/cloud-data-warehouse>. Accessed on: June 10, 2023.
10. Data Set: Amazon Books Reviews. [Online]. Available: <https://www.kaggle.com/datasets/mohamedbaket/amazon-books-reviews>. Accessed on: 12.06.2023.
11. Deep Dive into AWS DynamoDB: A NoSQL Database for High-Performance Applications. [Online]. Available: <https://medium.com/@christopheradamson253/deep-dive-into-aws-dynamodb-a-nosql-database-for-high-performance-applications-4c80d1410533>. Accessed on: August 01, 2023.
12. PostgreSQL. [Online]. Available: <https://kinsta.com/knowledgebase/what-is-postgresql/>. Accessed on: September 12, 2023.
13. What is extract, load, transform (ELT). [Online]. Available: <https://www.ibm.com/topics/elt>. Accessed on: December 10, 2023.
14. Column databases. [Online]. Available: <https://www.tinybird.co/blog-posts/what-is-a-columnar-database>. Accessed on: January 08, 2024.
15. What is an MPP Database. [Online]. Available: <https://airbyte.com/data-engineering-resources/mpp-database>. Accessed on: November 13, 2023.
16. Exploring the Basics of Amazon Simple Storage Service (S3). [Online]. Available: <https://medium.com/@dbrandonbawe/exploring-the-basics-of-amazon-simple-storage-service-s3-f8ad2af0a6f9>. Accessed on: November 10, 2023.
17. What is a Cloud Data Warehouse. [Online]. Available: <https://www.astera.com/type/blog/cloud-data-warehouse/>. Accessed on: November 10, 2023.
18. The Lambda Architecture: A Hybrid Approach to Data Processing. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/lambda-architecture-hybrid-approach-data-processing-midhun-pottammal>. Accessed on: January 10, 2024.
19. Introduction to Data Lakes. [Online]. Available: <https://www.databricks.com/discover/data-lakes>. Accessed on: January 11, 2024.
20. What is Polyglot Persistence. [Online]. Available: <https://www.harperdb.io/post/what-is-polyglot-persistence-and-why-is-it-awful>. Accessed on: February 01, 2024).
21. Exploring the Benefits of Hybrid Architecture in Data Warehousing. [Online]. Available: <https://re-configured.io/blog/exploring-benefits-of-hybrid-architecture-in-data-warehousing>. Accessed on: November 30, 2023.
22. The Apache Iceberg Open Table Format. [Online]. Available: <https://www.dremio.com/resources/guides/apache-iceberg/>. Accessed on: November 28, 2023.
23. Parquet. [Online]. Available: <https://www.databricks.com/glossary/what-is-parquet>. Accessed on: September 02, 2023.
24. ETL Process in Data Warehouse. [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/etl-process-in-data-warehouse/>. Accessed on: October 10, 2023.

Перелік використаних джерел:

1. Rehman K. U., Ahmad U., Mahmood S. A comparative analysis of traditional and cloud data warehouse. *VAWKUM Transactions on Computer Sciences*. 2018. Vol. 6(1). Pp. 34-40. DOI: <https://doi.org/10.21015/vtcs.v15i1.487>.
2. Migrating a research data warehouse to a public cloud: challenges and opportunities / M. G. Kahn et al. *Journal of the American Medical Informatics Association*. 2022. Vol. 29(4). Pp. 592-600. DOI: <https://doi.org/10.1093/jamia/ocab278>.
3. Verma H. Data-warehousing on cloud computing. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*. 2013. Vol. 2. Iss. 2. Pp. 411-416.
4. Integration methods and advantages of machine learning with cloud data warehouses / H. Li et al. *International Journal of Computer Science and Information Technology*. 2024. Vol. 2(1). Pp. 348-358. DOI: <https://doi.org/10.62051/ijcsit.v2n1.36>.
5. A Data Warehouse Approach for Business Intelligence / G. Garani, A. Chernov, I. Savvas, M. Butakova. *Infrastructure for Collaborative Enterprises (WETICE): IEEE 28th International Conference on Enabling Technologies*, Napoli, Italy, 12-14 June, 2019. Pp. 70-75. DOI: <https://doi.org/10.1109/WETICE.2019.00022>.
6. Sina A. Optimizing data warehousing performance through machine learning algorithms in the cloud. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2023. Vol. 12(12). Pp. 1859-1867. DOI: <https://dx.doi.org/10.21275/SR231224074241>.
7. Heinonen J. From classical DW to cloud data warehouse : Masters Thesis. Helsinki, 2020. 79 p.
8. Kawthar K., Nabli A., Gargouri F. Privacy and availability in cloud data warehouse. *Proceedings of the 10th International Conference on Education Technology and Computers*. 2018. Pp. 388-391. DOI: <https://doi.org/10.1145/3290511.3290580>.
9. Cloud Data Warehouse. URL: <https://www.qlik.com/us/cloud-data-migration/cloud-data-warehouse> (дата звернення: 10.06.2023).
10. Data Set: Amazon Books Reviews. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/mohamedbakhmet/amazon-books-reviews> (дата звернення: 12.06.2023).
11. Deep Dive into AWS DynamoDB: A NoSQL Database for High-Performance Applications. URL: <https://medium.com/@christopheradamson253/deep-dive-into-aws-dynamodb-a-nosql-database-for-high-performance-applications-4c80d1410533> (дата звернення: 01.08.2023).
12. PostgreSQL. URL: <https://kinsta.com/knowledgebase/what-is-postgresql/> (дата звернення: 12.09.2023).
13. What is extract, load, transform (ELT). URL: <https://www.ibm.com/topics/elt> (дата звернення: 10.12.2023).
14. Column databases. URL: <https://www.tinybird.co/blog-posts/what-is-a-columnar-database> (дата звернення: 08.01.2024).
15. What is an MPP Database. URL: <https://airbyte.com/data-engineering-resources/mpp-database> (дата звернення: 13.11.2023).
16. Exploring the Basics of Amazon Simple Storage Service (S3). URL: <https://medium.com/@dbrandonbawe/exploring-the-basics-of-amazon-simple-storage-service-s3-f8ad2af0a6f9> (дата звернення: 10.11.2023).
17. What is a Cloud Data Warehouse. URL: <https://www.astera.com/type/blog/cloud-data-warehouse/> (дата звернення: 10.11.2023).
18. The Lambda Architecture: A Hybrid Approach to Data Processing. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/lambda-architecture-hybrid-approach-data-processing-midhun-pottammal> (дата звернення: 10.01.2024).
19. Introduction to Data Lakes. URL: <https://www.databricks.com/discover/data-lakes> (дата звернення: 11.01.2024).
20. What is Polyglot Persistence. URL: <https://www.harperdb.io/post/what-is-polyglot-persistence-and-why-is-it-awful> (дата звернення: 01.02.2024).
21. Exploring the Benefits of Hybrid Architecture in Data Warehousing. URL: <https://reconfigured.io/blog/exploring-benefits-of-hybrid-architecture-in-data-warehousing> (дата звернення: 30.11.2023).

22. The Apache Iceberg Open Table Format. URL: <https://www.dremio.com/resources/guides/apache-iceberg/> (дата звернення: 28.11.2023).
23. Parquet. URL: <https://www.databricks.com/glossary/what-is-parquet> (дата звернення: 02.09.2023).
24. ETL Process in Data Warehouse. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/etl-process-in-data-warehouse/> (дата звернення: 10.10.2023).

Стаття надійшла 12.04.2024

Стаття прийнята 01.05.2024

УДК 004.9:658.818

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310670

© Кіріакіді С.К.¹, Кривенко О.В.²

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОЛОГІЙ РОЗРОБКИ ВЕБДОДАТКУ ДЛЯ МЕДИЧНОЇ КЛІНІКИ З ВИКОРИСТАННЯМ REACT

У статті детально досліджуються методології розробки вебдодатків для медичних клінік з використанням популярної бібліотеки React. Основною метою цього дослідження є аналіз сучасних підходів до створення вебдодатків, які відповідають специфічним вимогам медичних установ. Особлива увага приділяється функціональним та нефункціональним характеристикам, що є критично важливими для таких систем, зокрема безпеці даних, користувацькому досвіду, інтеграції з існуючими системами та відповідності нормативним стандартам. Перш за все, проведено всебічний аналіз вимог медичних клінік до вебдодатків. Безпека даних є одним з найважливіших аспектів, оскільки медичні установи працюють з конфіденційною інформацією. У дослідженні розглянуто методи забезпечення конфіденційності та цілісності медичних даних, зокрема шляхом дотримання стандартів HIPAA та GDPR. React дозволяє легко інтегрувати сучасні засоби безпеки, такі як JWT (JSON Web Tokens) для аутентифікації та авторизації, а також використовувати захищені HTTP-з'єднання для передачі даних. Крім того, особлива увага приділена користувацькому досвіду (UX/UI), який має забезпечувати зручність та ефективність використання вебдодатку як медичним персоналом, так і пацієнтами. React дозволяє створювати динамічні та інтерактивні інтерфейси, що можуть адаптуватися до різних пристроїв та екранів, забезпечуючи таким чином високу якість користувацького досвіду. Це особливо важливо для медичних додатків, де точність і швидкість взаємодії можуть впливати на якість надання медичних послуг. Наведено детальний опис найкращих практик та підходів до розробки вебдодатку з використанням React. Розглянуто архітектуру компонентів, яка забезпечує модульність та повторне використання коду, що є ключовим фактором у створенні масштабованих та легко підтримуваних додатків. Досліджено різні методи керування станом у додатку, такі як використання Context API та Redux, що дозволяє ефективно керувати даними та забезпечувати стабільну роботу додатку. Описано рекомендації щодо налаштування маршрутизації за допомогою бібліотеки React Router, що дозволяє створювати динамічні та багатосторінкові додатки, забезпечуючи при цьому плавну навігацію та хорошиший користувацький досвід. Крім того, розглянуто способи забезпечення безпеки додатку, включаючи захист від XSS-атак, CSRF та інших типів вразливостей, що є критично важливим у медичних додатках.

¹ бакалавр, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, kiriakidi.softya60@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0006-2860-6575, krivenkoov@gmail.com

У статті надано конкретні рекомендації щодо реалізації вебдодатку для медичної клініки. Вони включають практичні приклади коду, що демонструють реалізацію ключових функціональностей, таких як реєстрація та автентифікація користувачів, обробка медичних записів та взаємодія з базами даних. Описано процес налаштування інфраструктури для розробки, тестування та розгортання додатку, включаючи використання CI/CD інструментів для автоматизації цих процесів, що сприяє підвищенню ефективності розробки та якості кінцевого продукту. Стаття надає цінну інформацію для розробників, які прагнуть створити ефективні та безпечні вебдодатки для медичних клінік, використовуючи сучасні технології. Висновки та рекомендації, представлені у дослідженні, допоможуть забезпечити високу якість та відповідність розроблених рішень сучасним стандартам та вимогам галузі, що сприятиме підвищенню ефективності роботи медичних установ та якості медичних послуг, що надаються пацієнтам.

Ключові слова: розробка вебдодатків, медична клініка, React, архітектура компонентів, керування станом, маршрутизація, безпека даних.

S.K. Kiriakidi, O.V. Kryvenko. Study of web application development methodology for a medical clinic using React. The article explores in detail the methodologies for developing web applications for medical clinics using the popular React library. The main goal of this study is the analysis of modern approaches to the creation of web applications that meet the specific requirements of medical institutions. Particular attention is paid to the functional and non-functional characteristics that are critical to such systems, including data security, user experience, integration with existing systems, and compliance with regulatory standards. First of all, a comprehensive analysis of the requirements of medical clinics for web applications was carried out. Data security is one of the most important aspects as healthcare institutions work with sensitive information. The study examines methods for ensuring the confidentiality and integrity of medical data, including compliance with HIPAA and GDPR standards. React makes it easy to integrate modern security tools such as JWT (JSON Web Tokens) for authentication and authorization, and use secure HTTP connections for data transfer. In addition, special attention is paid to the user experience (UX/UI), which should ensure the convenience and efficiency of using the web application by both medical personnel and patients. React allows you to create dynamic and interactive interfaces that can adapt to different devices and screens, thus providing a high-quality user experience. This is especially important for medical applications, where the accuracy and speed of interaction can affect the quality of healthcare delivery. A detailed description of best practices and approaches to web application development using React is provided. A component architecture is considered, which provides modularity and code reuse, which is a key factor in creating scalable and easily maintainable applications. Different methods of state management in the application, such as the use of Context API and Redux, have been explored, which allows for efficient data management and stable operation of the application. Guidelines for configuring routing using the React Router library are described, allowing you to create dynamic and multi-page applications while providing smooth navigation and a good user experience. In addition, ways to ensure application security are considered, including protection against XSS attacks, CSRF and other types of vulnerabilities, which is critical in medical applications. The article provides specific recommendations for implementing a web application for a medical clinic. They include practical code examples that demonstrate the implementation of key functionalities such as user registration and authentication, medical record processing, and database interaction. The process of setting up the infrastructure for development, testing and deployment of the application is described, including the use of CI/CD tools to automate these processes, which contributes to increasing the efficiency of development and the quality of the final product. The article provides valuable information for developers who seek to create effective and secure web applications for medical clinics using modern technologies. The conclusions and recommendations presented in the study will help ensure high quality and compliance of the developed solutions with modern industry standards and requirements,

which will contribute to increasing the efficiency of the work of medical institutions and the quality of medical services provided to patients.

Key words: *web application development, medical clinic, React, component architecture, state management, routing, data security.*

Постановка проблеми. Сучасна медична клініка потребує ефективного та зручного веб-додатка для оптимізації своїх процесів і поліпшення взаємодії з пацієнтами. Вебдодаток, що дозволяє пацієнтам записуватися на прийом, переглядати результати аналізів та рекомендації лікаря, стає необхідністю для забезпечення високоякісного медичного обслуговування. Крім того, лікарі також повинні мати доступ до додатку для управління прийомами та перегляду медичних даних пацієнтів.

Основна проблема полягає в забезпеченні безпеки та конфіденційності медичних даних. Вебдодаток повинен відповідати найвищим стандартам захисту інформації, щоб запобігти несанкціонованому доступу до чутливої інформації. Важливим є також створення інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу, щоб пацієнти різного віку могли легко користуватися додатком, а лікарі могли швидко та ефективно виконувати свої завдання.

Інтеграція з існуючими медичними системами клініки є ще однією важливою складовою. Вебдодаток повинен бути сумісним з наявними електронними медичними записами та іншими інструментами, які вже використовуються в клініці, для забезпечення безперебійної роботи.

Масштабованість та продуктивність вебдодатку також відіграють ключову роль. Зростання кількості користувачів і даних не повинно впливати на швидкість та ефективність роботи системи.

Використання React як основної технології для розробки вебдодатку може допомогти вирішити проблеми завдяки його гнучкості, високій продуктивності та широкому набору інструментів, які забезпечують створення надійних та масштабованих рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сфері розробки вебдодатків для медичних клінік використовуються різноманітні технології. Останні дослідження та публікації свідчать про популярність таких бібліотек і фреймворків, як React, Angular, Vue.js, та Svelte. Кожна з технологій має свої переваги та недоліки, що робить вибір оптимального рішення важливим етапом у процесі розробки (Табл. 1).

Таблиця 1

Аналіз сучасних технологій

Технологія	Переваги	Недоліки
React	висока продуктивність; гнучкість та масштабованість; велика спільнота підтримки; велика кількість готових компонентів	вимагає більше налаштувань; розробка може бути складною для новачків
Angular	повний фреймворк; вбудовані рішення для багатьох задач; висока продуктивність	високий поріг входження; складність коду
Vue.js	легкість у вивченні; гнучкість; проста інтеграція	менша спільнота порівняно з React; обмежена кількість великих проєктів
Svelte	висока продуктивність; проста структура; компіляція в чистий JavaScript	відносно нова технологія; менша спільнота та підтримка

React є однією з найпопулярніших бібліотек для розробки вебдодатків завдяки своїм унікальним властивостям, що роблять її особливо підходящою для створення складних та масштабованих додатків, таких як медичні системи. Однією з ключових переваг React є її компонентна архітектура, яка дозволяє розробникам створювати повторно використововані та ізольовані компоненти. Це особливо важливо у контексті медичних додатків, де модульність та надійність є критично важливими. Компоненти React можна легко тестувати та оновлювати, що сприяє

зниженню ймовірності помилок та підвищенню загальної якості коду.

React використовує віртуальний DOM, який забезпечує швидке оновлення інтерфейсу без необхідності повного перезавантаження сторінки. Це особливо важливо для вебдодатків, які мають багато інтерактивних елементів і динамічних даних.

Також React дозволяє створювати компоненти, які можна повторно використовувати в різних частинах додатку, що спрощує розробку, тестування та підтримку коду, особливо в масштабних проєктах.

Ще React має велику спільноту розробників і багатий набір готових рішень і бібліотек, що забезпечує швидке вирішення проблем і доступ до широкого спектра додаткових інструментів і ресурсів.

React легко інтегрується з іншими сучасними технологіями та інструментами, такими як Redux для керування станом, React Router для маршрутизації та багато інших. Це робить його гнучким інструментом для вирішення різноманітних завдань.

Вибір React для розробки вебдодатку для медичної клініки дозволяє скористатися перевагами цієї технології, забезпечуючи високу продуктивність, гнучкість та масштабованість, що є ключовими вимогами для успішної реалізації проєкту [1].

Метою статті є дослідження та аналіз методологій розробки вебдодатку для медичної клініки з використанням React. У роботі розглянуто, як використання цієї бібліотеки може оптимізувати процес створення вебдодатку, забезпечити його високу продуктивність, гнучкість та відповідність вимогам сучасної медицини.

Основні завдання роботи включають:

- визначення основних функціональних та нефункціональних вимог, таких як безпека даних, користувацький досвід, інтеграція з існуючими системами та відповідність нормативним стандартам;
- порівняння різних фреймворків та бібліотек, таких як React, Angular, Vue.js та Svelte, з метою визначення найбільш підходящої технології для розробки медичних вебдодатків;
- вивчення найкращих практик та підходів до розробки з використанням React, включаючи архітектуру компонентів, керування станом, маршрутизацію та безпеку;
- надання конкретних рекомендацій щодо реалізації вебдодатку для медичної клініки з використанням React.

Робота мала на меті не лише теоретичний аналіз, але й практичне застосування отриманих результатів, що дозволить створити ефективний, безпечний і зручний вебдодаток для медичних клінік, який відповідатиме всім сучасним вимогам та стандартам.

Виклад основного матеріалу. Розробка вебдодатка для медичної клініки потребує ретельного аналізу як функціональних, так і нефункціональних вимог, щоб забезпечити ефективність, безпеку та зручність використання.

Функціональні вимоги:

- запис на прийом. Вебдодаток повинен дозволяти пацієнтам легко записуватися на прийом до лікаря, обирати зручний час і дату, а також отримувати підтвердження запису. Лікарі повинні мати можливість переглядати та керувати своїм розкладом прийомів;
- перегляд результатів аналізів. Пацієнти повинні мати доступ до своїх медичних результатів, включаючи аналізи та рекомендації лікарів. Це забезпечує прозорість та доступність медичної інформації.

Нефункціональні вимоги:

- безпека даних. Захист чутливих медичних даних є ключовим аспектом. Вебдодаток повинен відповідати стандартам безпеки, таким як шифрування даних, багатофакторна аутентифікація та регулярні аудити безпеки. Це важливо для запобігання несанкціонованому доступу до медичних записів і захисту конфіденційності пацієнтів;
- інтерфейс повинен бути інтуїтивно зрозумілим і зручним для використання. Це включає просту навігацію, зрозумілий дизайн і адаптивність до різних пристроїв (мобільних телефонів, планшетів, комп'ютерів). Важливо забезпечити легкий доступ до всіх функцій, особливо для користувачів з обмеженими технічними навичками.

Аналіз цих вимог є критично важливим етапом у розробці вебдодатку для медичної клініки. Він дозволяє визначити ключові аспекти, які потрібно врахувати для створення

ефективного, безпечного та зручного продукту, що задовольняє потреби як пацієнтів, так і медичного персоналу [2].

React є однією з найпопулярніших бібліотек для створення динамічних і масштабованих вебдодатків. Для розробки вебдодатку для медичної клініки з використанням React важливо врахувати найкращі практики та підходи, які забезпечать ефективність, безпеку та зручність використання.

React побудований на концепції компонентів, які є незалежними, повторно використовуваними частинами інтерфейсу користувача.

Основними принципами архітектури компонентів є:

1) Поділ інтерфейсу на дрібні, ізольовані компоненти для полегшення управління кодом, тестування його та повторного використання в різних частинах додатку. Наприклад, компонент форми запису на прийом можна використовувати як у головному розділі, так і в особистому кабінеті пацієнта.

2) Поділ компонентів на інші компоненти для створення складних інтерфейсів з простих будівельних блоків, що сприяє зручному масштабуванню додатку та зменшує дублікацію коду.

Вагомим аспектом розробки складних вебдодатків є керування станом. Завдяки використанню React існують кілька підходів до керування станом:

1) Локальний стан компонентів, який використовується для керування станом тільки окремого компонента. Локальний стан компонентів зручно застосовувати для простих компонентів з обмеженою логікою.

2) Контекст API, який дозволяє передавати стан через дерево компонентів без необхідності передавати пропси на кожному рівні. Контекст API застосовується для стану, який потребує доступу у багатьох компонентах, наприклад, автентифікаційні дані користувача.

3) Redux (бібліотека для керування глобальним станом додатку), яка надає централізоване сховище для всіх даних. Redux забезпечує передбачуваність стану та полегшує дебагінг, особливо у великих додатках.

Бібліотека React Router у React використовується для створення багатосторінкових вебдодатків. Вона дозволяє створювати:

1) Маршрути. Визначати шляхи для різних сторінок додатку та зв'язувати їх з відповідними компонентами. Призначена для забезпечення інтуїтивної навігації користувачів.

2) Динамічні маршрути. Призначена для підтримки параметризованих маршрутів при відображенні динамічного контенту, наприклад, сторінок пацієнтів з унікальними ID.

3) Захищені маршрути. Призначена обмежувати доступ до певних сторінок тільки для авторизованих користувачів, що важливо для забезпечення безпеки медичних даних [3].

Дотримання цих методологій та практик забезпечує створення надійного, безпечного та масштабованого вебдодатку для медичної клініки, що відповідає всім сучасним вимогам та стандартам. Використання React у поєднанні з цими підходами дозволяє ефективно вирішувати завдання, що стоять перед розробниками, та забезпечити високоякісний продукт для користувачів.

При створенні веб-сайту було надано значного значення формуванню DOM структури та правильній розмітці HTML. Усі розділи сайту побудовані на React компонентах, що дозволяє ефективно управляти структурою та станом елементів (рис. 1).

В результаті реалізації вебдодатку для медичної клініки з використанням React отримали наступні рекомендації, які потрібно враховувати перед розробкою вебдодатка:

1. Дизайн з точки зору користувача: необхідно аналізувати потреби та зручність для користувачів, зосереджуючись на їхньому комфорті та ефективності використання.

2. Конфіденційність та безпека даних: необхідно враховувати найвищі стандарти безпеки для зберігання медичних даних, використовувати механізми шифрування та визначати точки доступу для забезпечення конфіденційності пацієнтів.

3. Масштабованість та розширюваність: передбачити можливість масштабування та розширення вебдодатку з урахуванням зростання клініки та зміни вимог користувачів.

4. Документація та коментування коду: забезпечувати належну документацію та коментування коду для полегшення розуміння та співпраці між членами команди розробників.

5. Тестування: ретельно тестувати вебдодаток для виявлення та усунення помилок і недоліків до випуску в продакшн.

6. Підтримка різних пристроїв і браузерів: необхідно врахувати коректну роботу

вебдодатку на різних пристроях та веб-переглядачах, забезпечуючи однаковий досвід користувача для всіх користувачів.

7. Відкритість для зворотного зв'язку: надати можливість користувачам залишати відгуки та пропозиції щодо поліпшення вебдодатку для його постійного вдосконалювання.

8. Резервне копіювання та відновлення даних: забезпечити систему резервного копіювання та відновлення даних для запобігання втрати важливої інформації.

9. Дотримання стандартів та правил законодавства: вебдодаток повинен відповідати всім вимогам і стандартам законодавства про медичну інформацію та захист даних.

10. Постійне оновлення та підтримка: забезпечити регулярне оновлення та підтримку вебдодатку, враховуючи нові технології та вимоги користувачів [4].

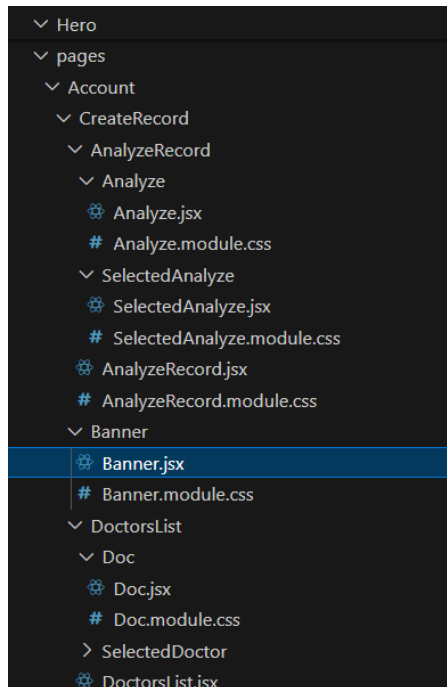


Рис. 1 – Архітектура компонентів

При реалізації вебдодатку для медичної клініки з використанням React з урахуванням наведених рекомендацій буде забезпечена його ефективність, безпека та зручність використання для користувачів.

Висновки

React, з його декларативним підходом до створення інтерфейсів користувача, пропонує ефективні засоби для реалізації складних медичних додатків. React сприяє покращенню швидкості та продуктивності розробки, дозволяючи розробникам швидко створювати динамічні та інтерактивні веб-інтерфейси.

Під час дослідження підкреслена увага архітектурі додатку на основі React, зокрема використанню компонентного підходу, керуванню станом та маршрутизації. Дані концепції дозволяють створювати гнучкі та масштабовані вебдодатки, що відповідають потребам медичних клінік.

Загалом, React є потужним інструментом для розробки вебдодатків для медичних клінік, і дана робота допоможе розробникам зрозуміти, як ефективно використовувати його можливості для досягнення своїх цілей у цій галузі.

Перелік використаних джерел:

1. Ключков Д. В. Загальні компоненти при кросплатформовій розробці для web- та мобільних додатків з використанням React та React-native. *Молодий вчений*. 2018. № 36(222). С. 1-5.

2. Вопросы по React. Версия 1. URL: <https://my-js.org/docs/other/react-questions/> (дата звернення: 19.05.2024).
3. Griffiths D., Griffiths D. React Cookbook: Recipes for Mastering the React Framework. 2021. 510 p.
4. Stefanov S. React: Up & Running: Building Web Applications. 2nd ed. 2021. 230 p.

References:

1. D.V. Klochkov, «Zahalni komponenty pry krosplatformovii rozrobtsi dlia web- ta mobilnykh dodatkov z vykorystanniam React ta React-native» [«Common components for cross-platform development for web and mobile applications using React and React-native»], *Molodyi vchenyi – Young scientist*, № 36 (222), pp. 1-5, 2018. (Ukr.)
2. Voprosi po React. Versyia 1 (React Questions. Version 1). [Online]. Available: <https://my-js.org/docs/other/react-questions/>. Accessed on: May 19, 2024.
3. D. Griffiths, and D. Griffiths, *React Cookbook: Recipes for Mastering the React Framework*. 2021.
4. S. Stoyan, *React: Up & Running: Building Web Applications*, 2nd Ed. 2021.

Стаття надійшла 13.04.2024

Стаття прийнята 10.05.2024

131 ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 621.9.048.3

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310671

© Карпенко Т.М.¹, Шишкін В.В.²**ПРО ДЕЯКІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСНИХ ЧАСТОТ
КРУТИЛЬНИХ КОЛИВАНЬ У МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ВЕРСТАТАХ**

Вимушені крутильні коливання у приводах верстатів – одна з актуальних проблем сучасного верстатобудування. Причинами цих коливань можуть бути: дисбаланси мас, які обертаються; конструктивна недосконалість підшипникових вузлів; особливості експлуатації або технологічного процесу (для металорізальних верстатів – ексцентричне закріплення заготовки, обробка некруглої деталі та ін.). В роботі на прикладі реального металорізального верстату реалізована задача динамічного аналізу приводу головного руху верстату з визначенням власних частот крутильних коливань. Реальний об'єкт замінено динамічною моделлю (ДМ). При побудові ДМ інерційні та пружні характеристики визначені з умов: – кінетична енергія об'єкту еквівалентна кінетичній енергії ДМ (з цієї умови отримані осьові моменти інерції зосереджених мас рядної моделі); – потенціальна енергія пружних деформацій об'єкту еквівалентна потенціальній енергії деформації ДМ (з цієї умови отримані коефіцієнти жорсткості ДМ). Власні частоти рядної ДМ визначались трьома способами: 1) шляхом розв'язування рівняння частот (точний метод) у поєднанні з методом зменшення кількості мас А.П. Черевкова; 2) через спрощення ДМ за методом парціальних систем; 3) методом залишків (Толле). Зроблено такі висновки: 1) основну (меншу) частоту можна знаходити будь-яким із розглянутих методів (бо результати трьох методів співпали); 2) при спрощенні ДМ з використанням методу парціальних систем слід враховувати критерій можливості подальших спрощень за означеним частотним діапазоном; перехід від трьохмасової ДМ до двохмасової, за умови недотримання вказаного критерію, призвів до похибки щодо величини основної частоти близько 10%; 3) динамічні розрахунки машин з використанням ДМ і різних методів визначення власних частот дозволяють на основі відомих частот збуджуючих сил виявляти можливі біларезонансні режими експлуатації об'єкту і заздалегідь уникати їх шляхом внесення змін у конструкцію верстата на стадії проектування.

Ключові слова: привід металорізального верстату, крутильна рядна динамічна модель, рівняння частот, основна частота, резонанс.

T.M. Karpenko, V.V. Shishkin. On some methods of determining proper frequencies torsional oscillations in metal-working machines. Forced torsional vibrations that occur in machine tool drives are one of the pressing problems of modern machine tool industry. The reasons for these fluctuations may be imbalances of rotating masses, structural imperfections of bearing units, operating or technological process features (for metal-cutting machines – eccentric clamping of the workpiece, processing of non-round workpieces, etc.). In this work, using the example of a real metal-cutting machine, the task of dynamic analysis of the drive of the main movement of the machine with determination of the natural frequencies of torsional vibrations is realized. The real object is replaced by a dynamic model (DM). When constructing the DM, the inertial and rigidity characteristics are

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

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-5943-2180, shishkin_v_v@pstu.edu

determined from the conditions: – the kinetic energy of the object is equivalent to the kinetic energy of the DM (from this condition the axial moments of inertia of the concentrated masses of the row model are obtained); – the potential energy of elastic deformations of the object is equivalent to the potential energy of deformation of the DM (from this condition the rigidity coefficients of the DM are obtained). The natural frequencies of the row DM were determined in three ways: 1) by solving the frequency equation (exact method) in combination with the method of reducing the number of masses of A.P. Cherevko; 2) partial systems method (fundamental frequency only); 3) method of residuals (Tolle). The following conclusions were made: 1) the main (smaller) frequency can be found by any of the methods considered (since the results of the three methods coincided); 2) when simplifying the DM using the method of partial systems, the criterion for the possibility of further simplifications over the specified frequency range should be taken into account; the transition from a three-mass DM to a two-mass one if the criterion in this calculation was not met led to an error in determining the value of the fundamental frequency of about 10%; 3) dynamic calculations of machines using DM and methods for determining natural frequencies make it possible, based on known frequencies of disturbing forces, to identify possible near-resonant operating modes and avoid them in advance by making changes to the design of the machine at the design stage.

Key words: drive of a metal-cutting machine, torsional in-line dynamic model, frequency equation, fundamental frequency, resonance.

Постановка проблеми. Серед об'єктів, що зазнають динамічних навантажень, напружено-деформований стан яких істотно залежить від режимів експлуатації, практичний інтерес мають ділянки валів, що піддаються крутильним коливанням. При проектуванні таких систем конструктор машини змушений вирішувати питання, пов'язані, насамперед, із визначенням власних частот крутильних коливань валів, які, в свою чергу, залежать від інерційних та пружних параметрів деталей машини. Це є важливим як для забезпечення безрезонансних режимів роботи машини, так і для забезпечення міцності деталей, оскільки максимальні крутні моменти є функціями частот.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Розрахункам крутильних коливань валів присвячено багато джерел, зокрема [1-3]. Коливання в металорізальних верстатах вивчалися в роботах [4-7]. Власні частоти крутильних коливань трансмісій колісних машин визначено в роботах [8, 9].

Мета статті – запропонувати і реалізувати порядок дій для побудови рядної крутної динамічної та математичної моделей приводу головного руху металорізального верстату. Для побудованої динамічної моделі визначити власні частоти крутильних коливань, використовуючи різні методи розрахунку. Оцінити точність та ефективність методів, дати рекомендації щодо їх застосування.

Виклад основного матеріалу.

Технічна суть завдання та способи розв'язку.

Схема головного приводу верстату (рис. 1), що складається з електродвигуна, коробки швидкостей і шпинделя, в залежності від включених муфт і зубчастих зачеплень, дозволяє реалізувати більше 12 кінематичних схем.

Власні частоти крутильних коливань валів цих схем будуть різні. Дослідження динаміки руху даної механічної системи при різних варіантах включення електромагнітних муфт і зубчастих зачеплень передбачає визначення для кожного варіанту всіх власних частот, які не повинні збігатися з частотами можливих періодичних збуджуючих факторів. При цьому особливий інтерес викликає менша із власних частот, яку називають основною.

У верстатах спектр частот вимушених коливань визначається такими факторами:

- періодичною силою, що діє з боку ріжучого інструменту на заготовку під час її обробки;
- наявністю ексцентриситету при закріпленні заготовки;
- дисбалансом центру тяжіння валу;
- похибкою виготовлення або полумкою підшипникових опор та ін.

Для реалізації поставленої мети запропоновано алгоритм дій, який показаний на рис. 2.

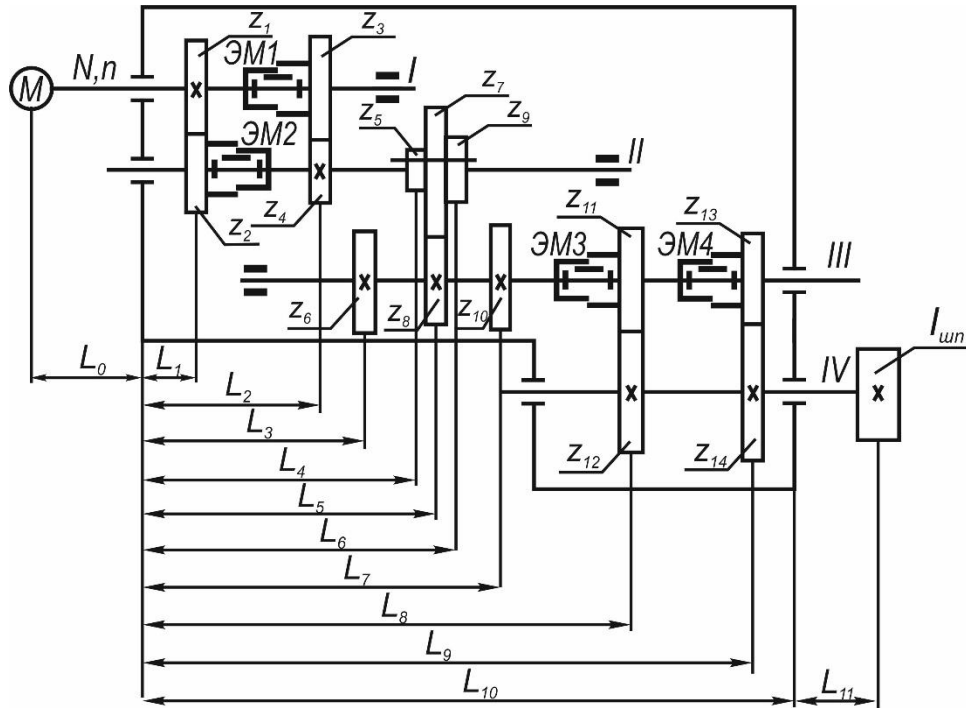


Рис. 1 – Схема головного приводу свердильного верстату



Рис. 2 – Алгоритм для побудови рядної крутильної динамічної моделі і визначення власних частот

Як відомо, точне вивчення динаміки машини, що складається з пружних тіл з розподіленими масами (ці тіла мають нескінченну кількість ступенів вільності), неможливо. Тому, від реального об'єкту переходять до спрощеної схеми – динамічної моделі (ДМ), рух якої описується певною кількістю узагальнених координат. Ця модель буде мати інерційні і пружні характеристики об'єкту, який вивчається, якщо будуть застосовані наступні базові тези.

Теза 1. Кінетична енергія об'єкту еквівалентна кінетичній енергії ДМ. З цієї умови отримують інерційні характеристики (у нашому випадку – осьові моменти інерції зосереджених мас).

Теза 2. Потенціальна енергія пружних деформацій об'єкту еквівалентна потенціальній енергії деформацій ДМ. Звідси знаходять коефіцієнти жорсткості або податливості елементів ДМ.

Реалізуючи ці тези, застосовують гіпотезу про те, що деформація тіла прямо пропорційна динамічному навантаженню. Тому, використовуючи закон Гука, отримують формули деформацій ДМ, які пов'язують з узагальненими координатами та узагальненими швидкостями.

Вивчаючи малі крутильні коливання поблизу режиму сталого рівномірного обертання, в якості узагальнених координат беруть кути закручування зосереджених мас φ_i .

Побудова вихідної динамічної моделі має виконуватись з відносно високою точністю, бо математична модель, з якої отримують рівняння частот, базується на ДМ.

Осьові моменти інерції муфт, зубчастих коліс та податливості з'єднань, зубчастих передач та ділянок валів визначають за відомими формулами. Осьові моменти інерції ділянок валів зводять до крайніх перерізів на підставі тези 1. Для цього визначається кінетична енергія елемента валу i , після інтегрування по довжині, отримують поправочний коефіцієнт для обчислення моменту інерції валу.

Декілька податливостей, послідовно розташованих пружних елементів, згідно з тезою 2, замінюють еквівалентною податливістю $e^* = \sum e_i$.

Чисельний аналіз задачі здійснювався для схеми, зображеної на рис. 3.

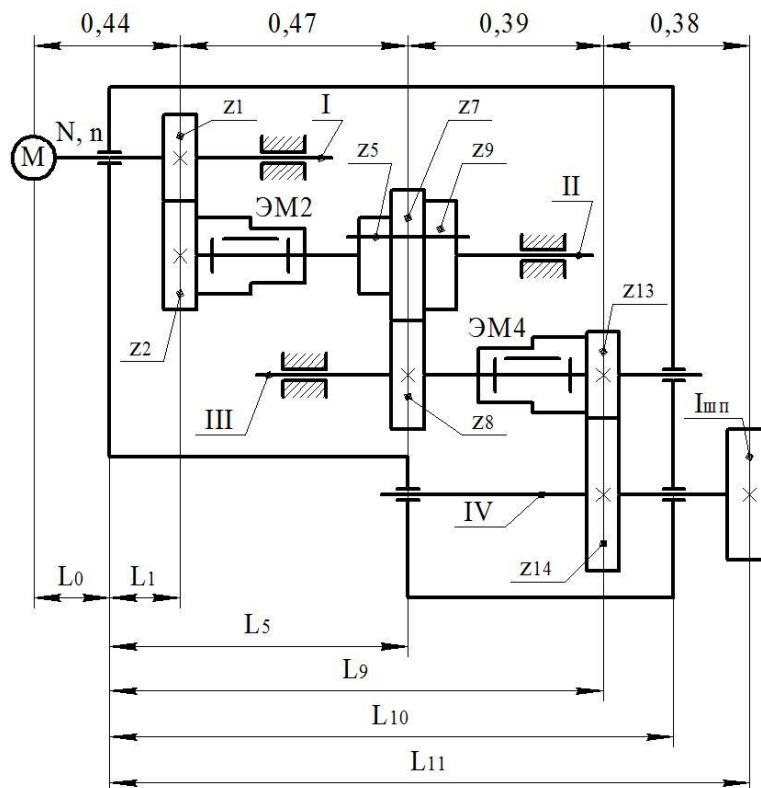


Рис. 3 – Кінематична схема приводу головного руху верстату для заданих умов підключення елементів (розміри надані в метрах)

Розрахунок проводився при наступних вихідних параметрах.

Параметри двигуна: потужність $N = 1,4 \text{ кВт}$; частота обертання валу $n = 970 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$; момент інерції ротора $I_{\text{рот}} = 1,5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Момент інерції маси на шпинделі $I_{\text{ун}} = 0,00918 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. Включені муфти і зубчасті зачеплення коліс: ЭМ2; ЭМ4, z_7 / z_8 . Діаметри валів, м: $D_I = 0,025$; $D_{II} = 0,030$; $D_{III} = 0,035$; $D_{IV} = 0,040$. Число зубців зубчастих коліс: $z_1 = 25$; $z_2 = 33$; $z_5 = 27$; $z_7 = 38$; $z_8 = 46$; $z_9 = 32$; $z_{13} = 27$; $z_{14} = 57$. Довжини ділянок валів, м: $L_0 = 0,40$; $L_1 = 0,04$; $L_5 = 0,51$; $L_9 = 0,90$; $L_{10} = 0,98$; $L_{11} = 0,30$. Модуль зубчастих коліс: $m = 3 \text{ мм}$. Ширина зубчастих коліс, м: $b = 0,030$. Щільність матеріалу зубчастих коліс і валів: $\rho = 7850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Кут зачеплення: $\alpha = 20^\circ$. Коефіцієнт питомої контактної податливості зубчастої передачі: $k_3 = 6 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{Н}}$ – для прямозубих зубчастих коліс. Шпонкове з'єднання зубчастих коліс: вал I: висота шпонки $h_{\text{ун}} = 0,004 \text{ м}$, довжина з'єднання $l_{\text{с.ун}} = 0,03 \text{ м}$; вали II, III, IV: $h_{\text{ун}} = 0,0045 \text{ м}$, $l_{\text{с.ун}} = 0,03 \text{ м}$; коефіцієнт питомої контактної податливості шпонкових з'єднань $k_{\text{ун}} = 6,4 \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}^3}{\text{Н}}$. Шліцьове з'єднання на валу II: середній діаметр шліців, м: $D_{\text{сп}} = 0,028$; довжина з'єднання $l_{\text{с.шл}} = 0,03 \text{ м}$; висота шліца $h_{\text{шл}} = 0,004 \text{ м}$; число шліців $z = 6$; коефіцієнт питомої контактної податливості шліцьових з'єднань $k_{\text{шл}} = 4 \cdot 10^{-12} \frac{\text{м}^3}{\text{Н}}$. Махові моменти інерції муфт: ЭМ2 : $GD_{\text{ЭМ2}}^2 = 0,3 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{с}^2}$; ЭМ4 : $GD_{\text{ЭМ4}}^2 = 0,6 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{с}^2}$.

Вихідна ДМ для даної схеми показана на рис.4.

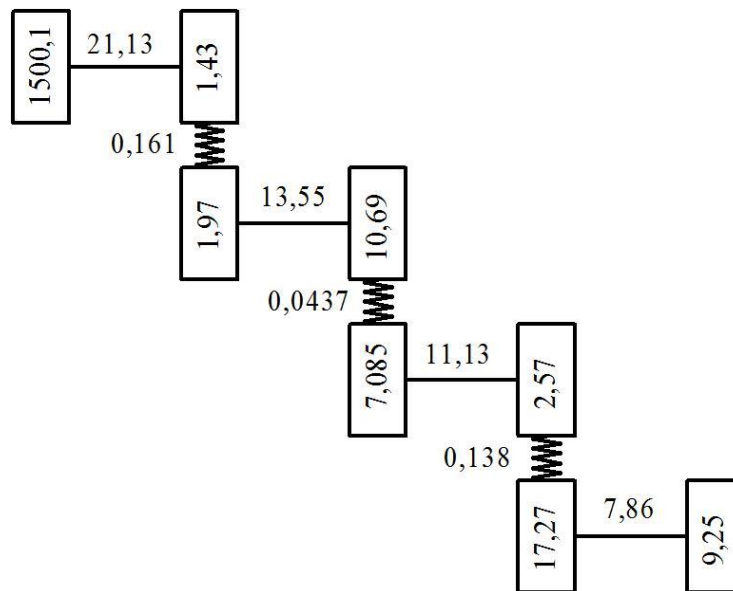


Рис. 4 – Вихідна динамічна модель з урахуванням прийнятих числових значень інерційних параметрів і величин податливостей

Порядок величин (10^{-5} – для податливостей і 10^{-3} – для осьових моментів інерції) на рис. 4 не позначено.

Побудову рядної динамічної моделі починаємо з вибору валу зведення. У якості такого валу можна прийняти будь-який вал пристрою, але зручно приймати вхідний вал. Обираємо вал I.

Визначаємо передаточне відношення між кожним i -тим валом і валом I (валом зведення) за формулою:

$$u_{i/I} = \frac{\omega_i}{\omega_I}, \quad (1)$$

де ω_i – кутова швидкість i -го валу;

ω_I – кутова швидкість I валу.

Тоді, зведений до валу I осьовий момент інерції маси, що розміщена на i -тому валу, буде дорівнювати:

$$I_{i/I}^{np} = I_i \cdot u_{i/I}^2. \quad (2)$$

Зведену до валу I податливість i -того валу, згідно тези 2, обчислюємо за формулою:

$$e_{i/I}^{np} = \frac{e_i^*}{u_{i/I}^2}. \quad (3)$$

Таким чином, маємо восьмимасову рядну ДМ, зображену на рис. 5.

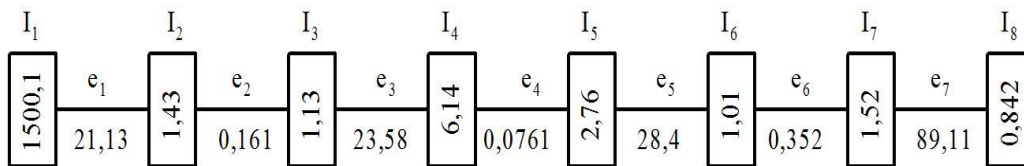


Рис. 5 – Розрахункова восьмимасова динамічна модель

Побудова математичної моделі і рівняння частот.

Диференціальне рівняння руху рядної ДМ (математичну модель) складемо, застосовуючи рівняння Лагранжа другого роду для механічної системи, що має 8 ступенів вільності [10-12]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_i} = - \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_i}, \quad i=1,2 \dots 8. \quad (4)$$

Якщо виразити кінетичну енергію T через узагальнені швидкості $\dot{\varphi}_i$, а потенціальну енергію Π – через узагальнені координати φ_i , отримаємо матрицю інерції $\|a\|$ та матрицю жорсткості $\|c\|$. Тому, замість (4), будемо мати диференціальні рівняння руху

$$\|a\| \{ \ddot{\varphi}_i \} + \|c\| \{ \varphi_i \} = 0. \quad (5)$$

Компонентами матриці інерції будуть моменти інерції I_i , компонентами матриці жорсткості – коефіцієнти жорсткості, які дорівнюють $c_i = \frac{1}{e_i}$.

Частинні розв’язки диференціальних рівнянь (5) шукаємо у вигляді

$$\varphi_i = A_i \sin(kt + \alpha). \quad (6)$$

Після підстановки (6) у рівняння (5), отримуємо систему алгебраїчних рівнянь відносно A_i . Прирівнюючи головний визначник цієї системи нулю, отримуємо рівняння частот. Порядок цього рівняння відносно невідомої величини k^2 дорівнює кількості мас ДМ. Для восьмимасової ДМ визначник має вигляд:

$$\begin{vmatrix} \frac{1}{e_1} - I_1 \cdot k^2 & -\frac{1}{e_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{e_1} & \frac{1}{e_1} - I_2 \cdot k^2 + \frac{1}{e_2} & -\frac{1}{e_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{e_2} & \frac{1}{e_2} - I_3 \cdot k^2 + \frac{1}{e_3} & -\frac{1}{e_3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{e_3} & \frac{1}{e_3} - I_4 \cdot k^2 + \frac{1}{e_4} & -\frac{1}{e_4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{e_4} & \frac{1}{e_4} - I_5 \cdot k^2 + \frac{1}{e_5} & -\frac{1}{e_5} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{e_5} & \frac{1}{e_5} - I_6 \cdot k^2 + \frac{1}{e_6} & -\frac{1}{e_6} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{e_6} & \frac{1}{e_6} - I_7 \cdot k^2 + \frac{1}{e_7} & -\frac{1}{e_7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{e_7} & \frac{1}{e_7} - I_8 \cdot k^2 \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

Визначення власних частот рядної ДМ можна здійснити наступними способами:

- точним методом – розв’язанням рівняння частот (зазвичай із застосуванням спеціалізованих програм та математичних редакторів, наприклад, пакету MathCad);
- розв’язанням рівняння частот після спрощення ДМ за методом парціальних систем;
- методом залишків (Толле).

Як приклад реалізації точного методу, наведемо результати розв’язання рівняння частот для восьмимасової моделі (рис. 5). Нижче надається покроковий алгоритм дій, розрахований на користувачів початкового рівня.

Алгоритм розв’язання рівняння частот із застосуванням математичного редактору MathCad 14:

- 1) Ввести вихідні дані $I_i, e_i, i = 1, 2 \dots n$.
- 2) Скласти визначник рівняння частот (7) за допомогою команд: Додати (Insert) / Матриця (Matrix) і вводимо 8 рядків та 8 стовбців.
- 3) Для перетворення визначника (7) у рівняння виділити його і «перетягнути» у бік. Далі, використати команди: Символіка (Symbolics) / Матриця (Matrix) / Визначник (Determination).
- 4) Щоб отримати поліноміальні коефіцієнти рівняння треба клацнути «мишею» на отриманому рівнянні і вибрати команди: Символіка (Symbolics) / Поліноміальні коефіцієнти (Polynomial Coefficients).
- 5) Записати вираз виду $k = \text{polyroots}(\square)$, де замість \square - вставити поліноміальні коефіцієнти.
- 6) Записати вираз $k:=$. Після знаку « $=$ » відобразяться корені рівняння, тобто шукані частоти.

Результати визначення власних частот ДМ, зображеної на рис. 5, показані в таблиці 1.

Якщо діапазон збудовуючих факторів не вимагає знання вищих частот, коливальну систему зводять до ДМ з меншим числом ступенів вільності. У цій роботі був застосований метод А.П. Черевкова, заснований на заміні групи мас однією масою.

Так, маси I_2, I_3, I_4, I_5 були замінені однією масою з осьовим моментом інерції $I'_2 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5$, а податливість ділянки між масою I_1 і новою масою I'_2 буде дорівнювати $e = \frac{1}{I'_2} [e_1 I_2 + (e_1 + e_2) I_3 + (e_1 + e_2 + e_3) I_4 + (e_1 + e_2 + e_3 + e_4) I_5]$.

Таблиця 1

Результати обчислень для восьмимасової моделі

	0
0	$-3.143 \cdot 10^4$
1	$-2.629 \cdot 10^4$
2	$-2.169 \cdot 10^4$
3	$-1.951 \cdot 10^3$
4	$-1.594 \cdot 10^3$
5	$-1.013 \cdot 10^3$
6	-405,616
7	0
8	0
9	405,616
10	$1.013 \cdot 10^3$
11	$1.594 \cdot 10^3$
12	$1.951 \cdot 10^3$
13	$2.169 \cdot 10^4$
14	$2.629 \cdot 10^4$
15	$3.143 \cdot 10^4$

Після корекції номерів мас і податливостей, прийшли до п'ятимасової ДМ, зображеної на рис. 6.

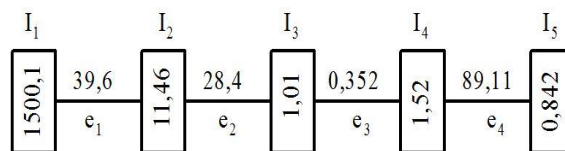


Рис. 6 – Розрахункова п'ятимасова модель

Після виконання пунктів вище запропонованого алгоритму, отримали частоти п'ятимасової ДМ, показані в Таблиці 2.

Таблиця 2

Результати обчислень для п'ятимасової моделі

	0
0	$-2.169 \cdot 10^4$
1	$-1.593 \cdot 10^3$
2	-995,864
3	-404,063
4	0
5	0
6	404,063
7	995,864
8	$1.593 \cdot 10^3$
9	$2.169 \cdot 10^4$

Визначення основної частоти з використанням методу парціальних систем.

Метод парціальних систем дозволяє спростити вихідну ДМ шляхом доведення її до виду, коли рішення частотного рівняння не викликає труднощів. Для реалізації методу пропонуються дві типові системи (названі «парціальними»), на які можна розбити будь-яку рядну ДМ.

Система I типу – одномасова, з базовим інерційним елементом (рис. 7). Вона включає масу I_i з пружними елементами, податливості яких дорівнюють e_{i-1} та e_i .

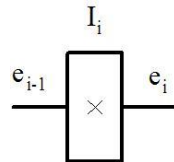


Рис. 7 – Парціальна система I типу

Частота такої системи визначається за формулою:

$$k_i = \sqrt{\frac{e_{i-1} + e_i}{I_i \cdot e_{i-1} \cdot e_i}}. \quad (8)$$

Система II типу – двомасова (рис. 8). Вона складається з двох мас I_i і I_{i+1} , з розташованим між ними пружним елементом (у нашому випадку – ділянка безінерційного валу) податливістю e_i .

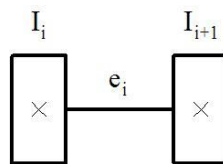


Рис. 8 – Парціальна система II типу

Частота такої системи визначається за формулою:

$$k_{i,i+1} = \sqrt{\frac{I_i + I_{i+1}}{I_i \cdot I_{i+1} \cdot e_i}}. \quad (9)$$

Метод зводиться до наступних кроків.

1) Вихідну ДМ поділяють на парціальні системи двох типів, після чого за формулами (8) і (9) знаходять їх парціальні частоти.

2) У випадку, коли одна або кілька парціальних частот значно (в 3 або більше разів) перевищують верхню межу частотного діапазону, що досліджується, проводять спрощення ДМ. Спрощення полягає у зменшенні кількості мас ДМ на одиницю шляхом заміни парціальної системи з найбільшою частотою на парціальну систему іншого типу.

Так, якщо k_{\max} має система I типу, її замінюють на систему II типу. Нові маси матимуть такі моменти інерції $I'_i = \frac{e_i}{e_{i-1} + e_i} \cdot I_i$ та $I'_{i+1} = \frac{e_{i-1}}{e_{i-1} + e_i} \cdot I_i$ з податливістю між ними $e'_i = e_{i-1} + e_i$.

Якщо k_{\max} має система II типу, її замінюють системою I типу. Нова маса матиме момент інерції $I'_i = I_i + I_{i+1}$, а податливості ділянок валу будуть дорівнювати $e'_{i-1} = \frac{I_{i+1}}{I_{i+1} + I_i} \cdot e_i$ та

$$e'_i = \frac{I_i}{I_{i+1} + I_i} \cdot e_i.$$

При таких замінах парціальних систем власні частоти не змінюються.

3) Спрощену на першому етапі ДМ перевіряють на можливість подальших спрощень та повторюють процедуру, починаючи з п. 2, за наявності можливості та необхідності.

4) Спрощення ДМ припиняють, коли не виконується критерій можливості спрощення або ДМ зводиться до трьохмасової, при якій частотне рівняння має вигляд:

$$k^4 - \left(\frac{I_1 + I_2}{I_1 \cdot I_2} \cdot c_1 + \frac{I_2 + I_3}{I_2 \cdot I_3} \cdot c_2 \right) \cdot k^2 + \frac{I_1 + I_2 + I_3}{I_1 \cdot I_2 \cdot I_3} \cdot c_1 \cdot c_2 = 0. \quad (10)$$

Розв'язування такого рівняння не створює труднощів.

Результати чисельного аналізу за допомогою методу парціальних систем для схеми, зображеної на рис. 3, представлені на рис. 9. На ньому показано процес поетапного спрощення восьмимасової ДМ із зменшенням кількості мас на одиницю. У верхній та нижній частинах кожної ДМ показані власні частоти парціальних систем обох типів. Найбільша з частот виділена рамкою. В якості верхньої межі частотного діапазону, що досліджується, прийнята частота $k_{\text{чод}} = 405 \text{ c}^{-1}$.

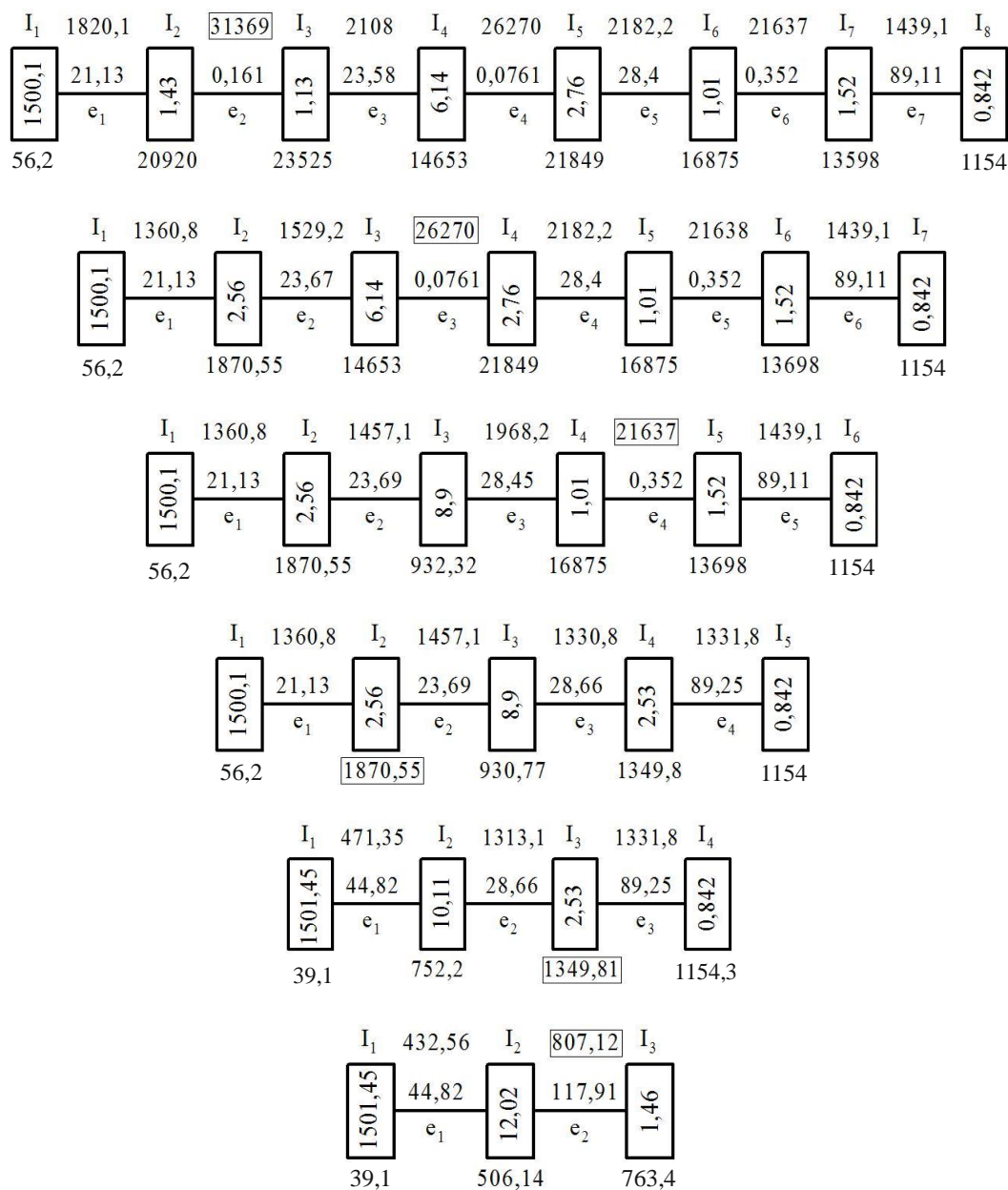


Рис. 9 – Поетапне спрощення ДМ і власні частоти парціальних систем

В результаті спрощень система доведена до трьохмасової, в якій найбільшу частоту має крайня парціальна система II типу. Подальше спрощення цієї моделі є недоцільним внаслідок суттєвої похибки в отриманому результаті. Дійсно, максимальна частота $k_{\max} = 807 \text{ c}^{-1}$ перевищує частотний діапазон тільки в 2 рази, що менше рекомендованих (3 і більше). Крім того, точне значення власних частот цієї моделі можна легко отримати, розв'язавши рівняння частот (10).

Отриманий результат: $k_1 = 400,25 \text{ c}^{-1}$; $k_2 = 824,7 \text{ c}^{-1}$.

Виконаємо експеримент і продовжимо спрощення. Перетворимо трьохмасову ДМ на дво-масову. Після перетворень отримаємо ДМ, що еквівалентна парціальній системі II типу (рис. 8), з максимальною частотою $k'_{\max} = 365 \text{ c}^{-1}$. Отриманий результат має похибку близько 10% порівняно з точним значенням, що підтверджує необхідність дотримуватись зазначеним на початку розділу рекомендаціям.

Метод залишків (Толле) для визначення власних частот.

Метод заснований на застосуванні формул, якими обчислюються крутні моменти, що виникають в ділянках валів. Якщо позначити через A_i – амплітуди крутильних коливань i -тих

ділянок валів, а $a_i = \frac{A_i}{A_1}$ – відносні амплітуди, то маємо наступні формули для моментів:

$$\begin{cases} M_{1,2} = -I_1 a_1 k^2, & \text{де } a_1 = 1 \\ M_{2,3} = M_{1,2} - I_2 a_2 k^2, & \text{де } a_2 = a_1 + \frac{M_{1,2}}{c_1} \\ \dots\dots\dots \\ M_{n,n+1} = M_{n-1,n} - I_n a_n k^2, & \text{де } a_n = a_{n-1} + \frac{M_{n-1,n}}{c_{n-1}} \end{cases} \quad (11)$$

Залишком «R» названий крутний момент між останньою n -ою масою (у даному випадку – 8-ою) і неіснуючою $(n+1)$ -ою масою (у даному випадку – 9-ою), який, природно, повинен дорівнювати нулеві, якщо k^2 відповідає дійсній частоті. Тому на графіку залежності $\frac{R}{k^2}$ від k точки перетину кривої з віссю абсцис будуть частотами.

Для схеми, що розглядається в роботі (рис. 3), маємо графік, зображений на рис. 10, який свідчить про практичний збіг перших п'яти частот, отриманих точним методом (табл. 1).

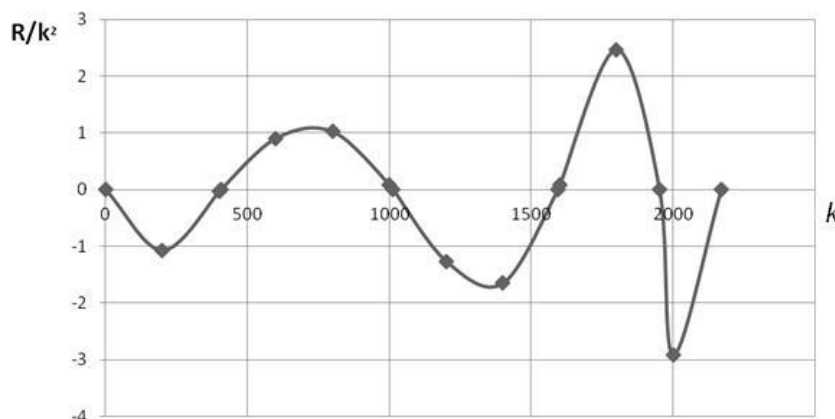


Рис. 10 – Залежність величини $\frac{R}{k^2}$ від k

Примітка. Основним недоліком методу Толле є чутливість до точності обчислень. А оскільки частоти можуть відрізнятися на кілька порядків, підбирати їх – трудомістке завдання. Тому цей метод найчастіше використовують для перевірки величин частот, отриманих іншими способами.

Висновки

1. Запропонований в роботі алгоритм застосування редактора MathCad дозволяє визначити всі власні частоти крутильних коливань багатомасової рядної крутильної динамічної моделі. На практиці це означає, що під час проектування машини з'явилася можливість з метою недопущення білярезонансних режимів (при відомому спектрі частот збуджуючого фактору) отримувати потрібні власні частоти крутильних коливань за рахунок підбору параметрів конструкції (геометричних, інерційних, пружних).

2. Для конкретного металорізального верстату, який взято як приклад, показано алгоритм побудови багатомасової крутильної динамічної моделі його головного приводу. Для цієї моделі проведено розрахунок частот власних крутильних коливань точним і двома наближеними методами.

3. Запропоновані практичні рекомендації щодо застосування методу парціальних систем для спрощення багатомасових динамічних моделей і перевірена значимість дотримання рекомендацій щодо доцільності подальшого спрощення динамічної моделі.

4. Чисельний аналіз показав, що основна (менша) частота крутильних коливань динамічної моделі збіглася при застосуванні трьох способів її визначення.

Перелік використаних джерел:

1. Коливання неконсервативних механічних систем: монографія / Бабенко А. Є., Боронко О. О., Лавренко Я. І., Трубочов С. І. Київ : Нац. техн. ун-т України «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2020. 153 с.
2. Papastavridis J. G. The variational and virial-like theory of oscillations and stability of non-conservative and/or non-linear mechanical systems. *Journal of Sound and Vibration*. 1986. Vol. 104. Iss. 2. Pp. 209-227. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(86\)90264-6](https://doi.org/10.1016/0022-460X(86)90264-6).
3. Galley C. R. Classical mechanics of nonconservative systems. *Physical Review Letters*. 2013. Vol. 110. Iss. 17. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.174301>.
4. Попов В. І., Локтев В. І. Динаміка верстатів. Київ : Техніка, 1975. 135 с.
5. Welbourn D. B., Smith J. D. Machine-tool dynamics: an introduction. Cambridge University Press, 1970. 152 p.
6. Liljerehn A. Machine tool dynamics. A constrained state-space substructuring approach: thesis for the degree of doctor of philosophy in solid and structural mechanics. Göteborg, Sweden, 2016. 55 p.
7. Fast flexible multibody dynamic analysis of machine tools using modal state space models / Chang-Ju Kim, Jeong-Seok Oh, Chun-Hong Park, Chang-Ho Lee. *CIRP Annals*. 2023. Vol. 72. Iss. 1. Pp. 341-344. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2023.04.064>.
8. Білик Б. В., Кусий А. Г. Частоти власних крутильних коливань трансмісій повнопривідних колісних машин. *Науковий вісник НЛТУ України: Проектування, виробництво та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів*. Львів : НЛТУУ, 2003. Вип. 12.7. С. 6-12.
9. Galvagno E., Velardocchia M., Vigliani A. Torsional oscillations in automotive transmissions: experimental analysis and modelling. *Shock and Vibration*. 2016. Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/5721960>.
10. Павловський М. А. Теоретична механіка. Київ : Техніка, 2002. 512 с.
11. Lüdde C. S., Dreizler R. M. Theoretical Mechanics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. 402 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11138-9>.
12. Ilisie V. Lectures in Classical Mechanics. With Solved Problems and Exercises. Springer Nature Switzerland AG, 2020. 359 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-38585-9>.

References:

1. A.Є. Babenko, O.O. Boronko, Ya.I. Lavrenko, and S.I. Trubachov, *Kolyvannia nekonservatyvnykh mekhanichnykh system: monohrafiia* [Oscillations of non-conservative mechanical systems: monograph]. Kyiv, Ukraine: Nats. tekhn. un-t Ukrainy «KPI imeni Ihoria Sikorskoho» Publ., 2020. (Ukr.)

2. J.G. Papastavridis, «The variational and virial-like theory of oscillations and stability of non-conservative and/or non-linear mechanical systems», *Journal of Sound and Vibration*, vol. 104, iss. 2, pp. 209-227, 1986. doi: **10.1016/0022-460X(86)90264-6**.
3. C.R. Galley, «Classical mechanics of nonconservative systems», *Physical Review Letters*, vol. 110, iss. 17, pp. 1-5, 2013. doi: **10.1103/PhysRevLett.110.174301**.
4. V.I. Popov, and V.I. Loktev, *Dynamika verstativ* [Dynamics of machines]. Kyiv, Ukraine: Tekhnika Publ., 1975. (Ukr.)
5. D.B. Welbourn, and J.D. Smith, *Machine-tool dynamics: an introduction*. Cambridge University Press Publ., 1970.
6. A. Liljerehn, «Machine tool dynamics. A constrained state-space substructuring approach», thesis for the degree of doctor of philosophy in solid and structural mechanics. Göteborg, Sweden, 2016.
7. Chang-Ju Kim, Jeong-Seok Oh, Chun-Hong Park, and Chang-Ho Lee, «Fast flexible multibody dynamic analysis of machine tools using modal state space models», *CIRP Annals*, vol. 72, iss. 1, pp. 341-344, 2023. doi: **10.1016/j.cirp.2023.04.064**.
8. B.V. Bilyk, and A.H. Kusi, «Chastoty vlasnykh krutylnykh kolyvan transmisii povnoprivodnykh kolisnykh mashyn» [«Frequencies of natural torsional oscillations of transmissions of four-wheel drive vehicles»], *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy: Proektuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia avtotrans-portnykh zasobiv i poizdiv – Scientific bulletin of NLTU of Ukraine: Design, production and operation of vehicles and trains*, vol. 12.7, pp. 6-12, 2003. (Ukr.)
9. E. Galvagno, M. Velardocchia, and A. Vigliani, «Torsional oscillations in automotive transmissions: experimental analysis and modelling», *Shock and Vibration*, pp. 1-14, 2016. doi: **10.1155/2016/5721960**.
10. M.A. Pavlovskiy, *Teoretychna mekhanika* [Theoretical mechanics]. Kyiv, Ukraine: Tekhnika Publ., 2002. (Ukr.)
11. C.S. Lüdde, and R.M. Dreizler, *Theoretical Mechanics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. doi: **10.1007/978-3-642-11138-9**.
12. V. Iisie, *Lectures in Classical Mechanics. With Solved Problems and Exercises*. Springer Nature Switzerland AG, 2020. doi: **10.1007/978-3-030-38585-9**.

Стаття надійшла 10.03.2024

Стаття прийнята 08.04.2024

133 ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.91

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310673

© Іщенко А.О.,¹ Карпенко Т.М.², Капустін С.В.³

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ СКЛАДОВИХ РЕАКЦІЙ В ПІДШИПНИКАХ ДИСКОВОГО ВАЛУ РОТОРНИХ ПИЛ (ПОВІДОМЛЕННЯ 2)

Для сучасного прокатного виробництва актуальним є питання міцності та надійності конструкцій роторних пилок, які призначені для різання гарячого прокату. Одним із факторів, що знижує надійність роторної пили, є недостатня довговічність підшипників валу швидкохідного диска, який сприймає зусилля різання. Практика показує, що застосовані методи розрахунку на міцність опорних підшипників не дозволяють врахувати всі можливі фактори, що впливають на надійність підшипників у процесі різання. По-перше, як з'ясувалося, в процесі експлуатації пильний диск має радіальне биття, можливо через помилку при нарізанні зубів диска і ексцентричну посадку диска на посадочне місце при його заміні. Також у зв'язку з тим, що процес різання роторною пилою дуже короткочасний, силу різання прийнято вважати силою удару. Метою даної роботи є визначення довговічності підшипників дискового валу роторної пили, враховуючи такі фактори, як радіальне биття диску та ударне навантаження в процесі різання. Як відомо, при тривалій експлуатації об'єкту місце для посадки ріжучого диску на планиайбі зношується, інколи виникає похибка в отворі при виготовленні нового диску. Тому має місце ексцентриситет центру ваги диску. Наявність цього ексцентриситету враховується в роботі при визначенні шуканих сил за допомогою принципу Д'Аламбера умовного зрівноваження сил. Враховуючи те, що тривалість різання це короткочасний процес (триває 0,105 с), то при визначенні реакцій в опорах дискового валу, що виникають під дією сил різання, можливо розглядати процес різання як ударне явище. Через те, що процес різання дисковою пилою дуже короткочасний, силу різання вважаємо силою удару. Величини сил реакцій в підшипниках визначаються під час різання з використанням теорем динаміки при ударі: теореми імпульсів та про зміну кінетичного моменту. Для можливості теоретичного визначення впливу биття диску на реакції в опорах підшипникового валу проведені експериментальні дослідження биття диска та визначені зусилля різання.

Ключові слова: реакції підшипників, ексцентриситет, ударний імпульс, ріжучий диск.

A.O. Ishchenko, T.M. Karpenko, S.V. Kapustin. Determination of dynamic component reactions in support bearings of rotor saws for cutting hot rolled (message 2). For modern rolling production, the issue of strength and reliability of rotary saw designs, which are designed for cutting hot rolled products, is relevant. One of the factors that reduces the reliability of a rotary saw is the insufficient durability of the bearings of the shaft of the high-speed disk, which perceives the cutting forces. Practice shows that the applied methods of calculating the strength of support bearings do not allow taking into account all possible factors that affect the reliability of bearings in the cutting process. First, as it turned out, during operation, the saw blade has a radial beat, possibly due to an error

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6189-7830, ischenko50@ukr.net

² канд. фіз.-мат. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-4042-0301, taisn2013@gmail.com

³ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0000-4204-8449, stanislav.kapustin.engineer@gmail.com

when cutting the teeth of the blade and the eccentric landing of the blade on the seat when replacing it. Also, due to the fact that the process of cutting with a rotary saw is very short-term, the cutting force is considered to be the impact force. The purpose of this work is to determine the durability of the bearings of the disc shaft of a rotary saw, considering such factors as the radial beating of the disc and the shock load during the cutting process. As you know, during long-term operation of the object, the place for landing the cutting disc on the faceplate wears out, sometimes there is an error in the hole when making a new disc. Therefore, there is an eccentricity of the center of gravity of the disc. The presence of this eccentricity is considered in the work when determining the required forces using D'Alembert's principle of conditional balancing of forces. Given that the duration of cutting is a short-term process (lasts 0.105 sec.), when determining the reactions in the supports of the disk shaft that occur under the action of cutting forces, it is possible to consider the cutting process as an impact phenomenon. Due to the fact that the process of cutting with a circular saw is very short-term, the cutting force is considered the impact force. The magnitudes of the reaction forces in the bearings are determined during cutting using the theorems of impact dynamics: the theorem of impulses and the change of kinetic moment. For the possibility of theoretical determination of the effect of disk beating on the reaction in the bearings of the bearing shaft, experimental studies of disk beating and determined cutting forces were carried out.

Key words: reactions of bearings, eccentricity, impact impulse, cutting disc.

Постановка проблеми. Рішення задачі теоретичного визначення впливу биття диску на реакції в опорах підшипникового валу, визначених в повідомленні 1, відкрило можливість визначення як навантажень на підшипники, так і їх довговічність. Але передувати цьому визначенню повинні як експериментальні дослідження биття диска, так і визначення зусиль різання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В повідомленні 1 даної статті [1] приведений теоретичний підхід к визначенню впливу на реакції в опорах підшипників дискового валу роторної пили таких факторів як радіальне биття диска та короткочасність процесу різання, яка може бути представлена як ударне навантаження. І тому згідно з існуючими методиками визначення сил різання прокату [2-6] виникає можливість оцінки не тільки реакцій в підшипникових опорах, але і довговічності самих підшипників, яка традиційно визначається по відомій методиці, викладеної в [7].

Мета дослідження – визначення довговічності підшипників дискового валу роторної пили з урахуванням таких факторів, як радіальне биття диску та ударне навантаження в процесі різання.

Виклад основного матеріалу. Вихідні дані для наступних розрахунків як зусиль різання, так і навантажень, які діють в підшипникових опорах дискового валу роторної пили 2500 мм з параметрами:

діаметр ріжучого диску 2500 мм з кроком зубців 100 мм;
швидкість обертання диска 100 м/с; швидкість його подачі 2 м/с;
кут зустрічі диска з заготовкою $\Psi=45^\circ$, як це видно з Рис. 1.

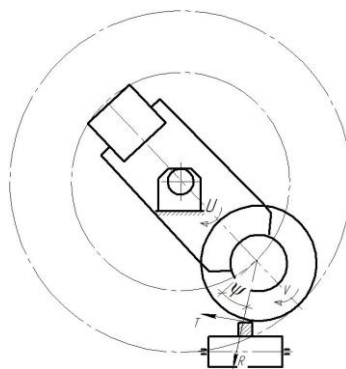


Рис. 1 – Схема різання прокату роторною пилою

Для визначення динамічних складових реакцій в підшипниках А та В, які виникають при наявності ексцентриситету центру ваги ріжучого диска, (без врахування сил різання) маємо розрахункову схему, зображену на рисунку 2.

Вихідні дані для рис. 2 наступні:

$G_1 = 2350$ Н, $G_2 = 16300$ Н, $G_3 = 11200$ Н, $G_4 = 4100$ Н, $l_1 = 30$ мм, $l_2 = 250$ мм, $l_3 = 700$ мм, $l_4 = 750$ мм, $l_5 = 300$ мм.

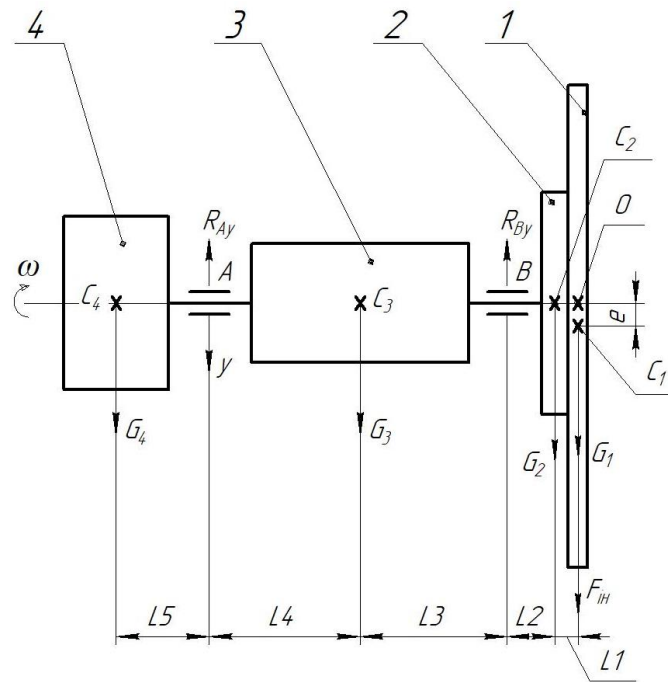


Рис. 2 – Схема навантаження дискового валу під час холостого руху: \vec{G}_1 – вага ріжучого диска, \vec{G}_2 – вага планшайби, \vec{G}_3 – вага шків, \vec{G}_4 – вага маховика

Для подальшого аналізу впливу радіального биття диску (яке виникає при наявності ексцентриситету) на довговічність підшипникових вузлів саме на роторній пилі 2500, яка встановлена у прокатному цеху одного з металургійних комбінатів України, були виконані заміри радіального та торцевого биття нового диска.

На рис. 3 зображена схема виконання замірів радіального биття за допомогою індикатора годинникового типу Dial з ціною ділення 0,01 мм та діапазоном 0-10 мм. Заміри радіального биття виконувались через кожні 10 зубців.

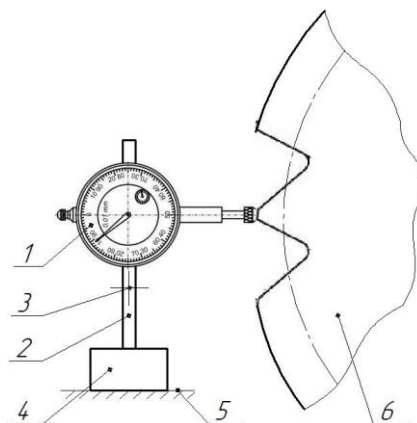


Рис. 3 – Схема виконання замірів радіального биття

Результати замірів показані на рис. 4 та рис. 5. Як видно з рисунків, радіальне биття диску досягає величини 2,6 мм, а торцеве биття досягає 1,6 мм при товщині диску 12 мм.

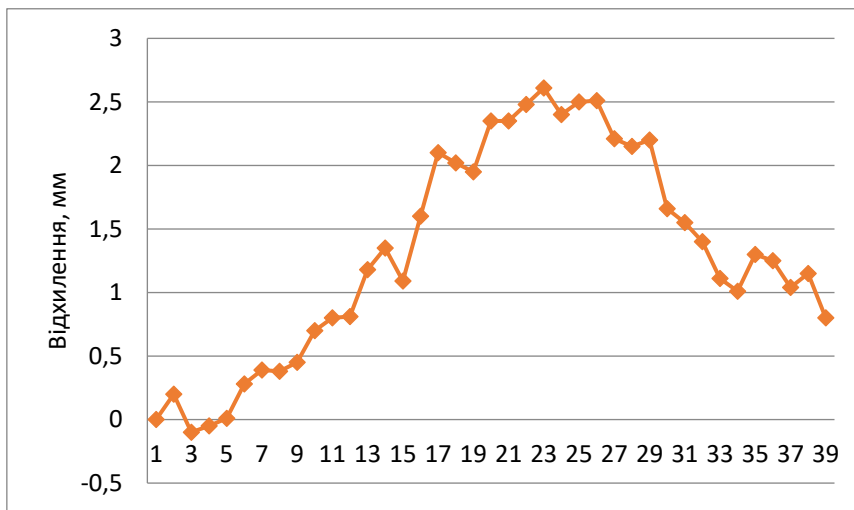


Рис. 4 – Графік радіального биття пильного диску

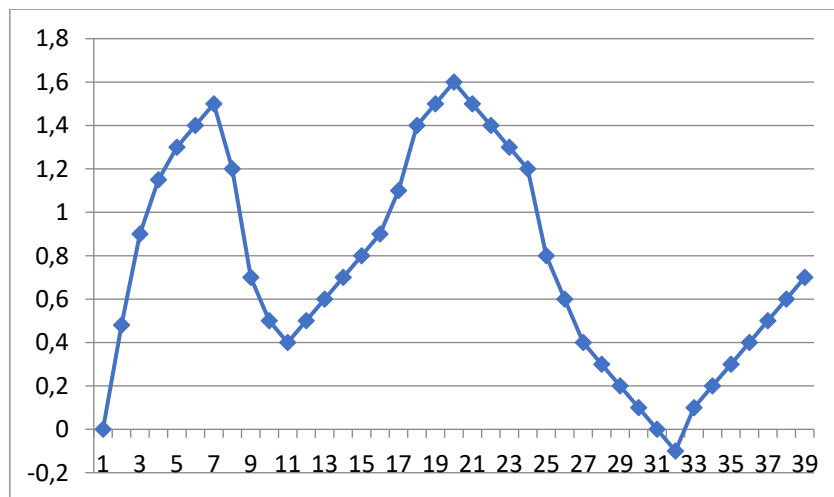


Рис. 5 – Графік торцевого биття пильного диску

Як показали відповідні експерименти, торцеве биття диска при його обертанні зі швидкістю 900 об/хв за рахунок інерційних сил значно зменшується до десятих часток міліметра, і тому можливим збільшенням сил різання у наступному викладі можливо знехтувати.

Розрахунок тангенціальних зусиль різання T і радіальних R виконується за наступними формулами:

$$T = q \cdot m \cdot b \cdot \frac{l}{t_s} \cdot k_3 \cdot k_t \cdot k_M, \quad (1)$$

$$R = k \cdot T, \quad (2)$$

де q – питомий опір різанню, Н/мм²;

m – товщина металу, що зрізується кожним зубом диска, мм;

b – товщина диска, мм;

l – дуга різання, мм;

t_s – крок зубців диска, мм;

k_3 – коефіцієнт, який враховує затушення зубців;

k_t – коефіцієнт, який враховує температуру прокату, що розрізається;

k_M – коефіцієнт, який враховує марку сталі прокату, що розрізається;

k – коефіцієнт, який враховує співвідношення між тангенціальним та радіальним зусиллями різання.

В свою чергу, величина m визначається за формулою

$$m = \frac{U \cdot t_s}{V} \cdot \cos \varphi, \quad (3)$$

де U – швидкість подачі, м/с;

t_s – крок зубців диска, мм;

V – швидкість різання диском, м/с;

Ψ – кут зустрічі диска з прокатом.

При цьому, отримана з цієї формули величина є розрахунковою. З врахуванням ексцентриситету диска середнє значення товщини зрізу можна знаходити за формулою

$$m_{cp} = \frac{m+l}{2}. \quad (4)$$

Виконані розрахунки, згідно з рекомендаціями, приведеними в [2], дозволили отримати наступні значення;

$$T = 42120 \text{ Н};$$

$$R = 29480 \text{ Н}.$$

Для наступних розрахунків необхідно знати тривалість процесу різання, який в наступному розглядається, через його короткочасність, як тривалість удару.

Маємо:

$$t_{\text{різа}} = \frac{D_{\text{заготов.}}}{U} \cdot \cos \Psi = \frac{0,3}{2} \cdot 0,7 = 0,105 \text{ с}. \quad (5)$$

Для наступних розрахунків необхідно вибрати величини зниження (просадки) швидкості диска під час різання; приймаємо ці величини 20%, що було підтверджено численними експериментами [2]. Таким чином, кутова швидкість зменшиться за час одного різання з $90 \frac{1}{c}$ до $72 \frac{1}{c}$

Крім того, в наступних розрахунках необхідно використовувати величини

$$I_{zC1} = \frac{GD^2}{4 \cdot 9,8} = 638 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (6)$$

$$I_{zO1} = I_{zC1} + \frac{G_1}{g} e^2 = 638 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (7)$$

де I_{zO1} – осьовий момент інерції валу у зборі відносно осі обертання OZ;

I_{zC1} – осьовий момент інерції диску відносно центральної осі диску.

Розглянемо спочатку вплив Даламберової сили інерції F^{in} , яка має місце при наявності ексцентриситету, на реакції в опорах дискового валу при його обертанні до початку різання, тобто на «холостому ході».

Визначаємо силу інерції:

$$F^{in} = \frac{G_1}{g} \times \omega_{\text{поч}}^2 \times e = 4660 \text{ Н}; \quad (8)$$

де $\omega_{\text{поч}}$ – номінальна швидкість обертання диску;

e – ексцентриситет диску;

g – прискорення вільного падіння.

У відповідності з залежностями, які отримані в повідомленні 1, визначаємо реакції в опорах А і В з врахуванням сили інерції:

$$R_{By} = \frac{1}{L_4+L_3} [(G_1 + F^{in}) (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) + G_2(L_2 + L_3 + L_4) + G_3L_4 - G_4L_5]; \quad (9)$$

$$R_{Ay} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + F^{in} - R_{By}; \quad (10)$$

$$R_{By} = 32418,8 \text{ Н};$$

$$R_{Ay} = 6191,2 \text{ Н}.$$

Реакції в опорах А і В без врахування сили інерції дорівнюють:

$$R_{By} = 26858,96 \text{ Н};$$

$$R_{Ay} = 7091 \text{ Н}.$$

Як видно з отриманих результатів, в найбільш навантаженій опорі В внаслідок биття диску навантаження збільшується на 20%.

Враховуючи те, що тривалість різання – короткочасний процес (триває 0,105 с), визначимо реакції в опорах дискового валу, що виникають під дією сил різання, розглядаючи процес різання як ударне явище.

На рис. 6 зображена схема для визначення імпульсів реакцій опор при відомих значеннях ударних імпульсів сил різання.

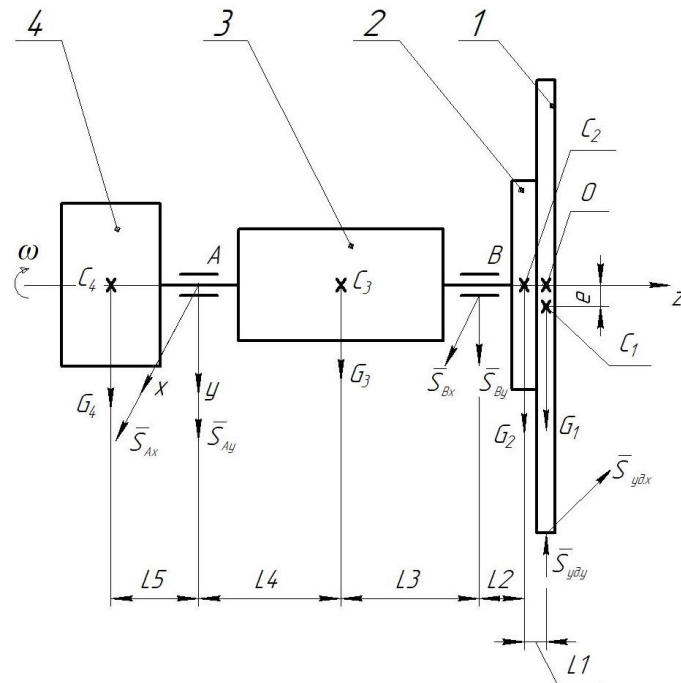


Рис. 6 – Схема навантаження валу під час різання, де $\bar{S}_{Ax}, \bar{S}_{Ay}, \bar{S}_{Bx}, \bar{S}_{By}$ – складові імпульсів реакцій опор, $\bar{S}_{удх}, \bar{S}_{уду}$ – складові ударного імпульсу сил різання

З врахуванням того, що тривалість удару дорівнює 0,105 с, маємо

$$S_{удх} = T \cdot \tau = 42120 \text{ Н} \cdot 0,105 \text{ с} = 4422,6 \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (11)$$

$$S_{уду} = R \cdot \tau = 29480 \text{ Н} \cdot 0,105 \text{ с} = 3095,4 \text{ Н} \cdot \text{с}; \quad (12)$$

$\omega_k = 72 \text{ рад/с}; \omega_n = 90 \text{ рад/с}; D_{\text{диска}} = 2,5 \text{ м}; GD^2_{\text{вала}} = 25000 \text{ Нм}^2;$

Визначаємо імпульси реакцій в опорах згідно з формулами, які отримані в повідомленні 1 [1]:

$$S_{Bx} = \frac{S_{удх} \cdot AO}{AB} = 5276,6 \text{ Н}; \quad (13)$$

$$S_{Ax} = S_{удх} - S_{Bx} + m_1 \cdot e(\omega_k - \omega_n) = -865 \text{ Н}; \quad (14)$$

$$S_{By} = S_{уду} \frac{AO}{AB} = 3693,13 \text{ Н}; \quad (15)$$

$$S_{Ay} = S_{уду} - S_{By} = -597,73 \text{ Н}. \quad (16)$$

Таким чином, складові реакцій найбільші в опорі В.

Без врахування ексцентриситету та ударних імпульсів сил різання реакція в підшипниковій опорі $R_B = 13600 \text{ Н}$, з врахуванням дорівнює 19600 Н.

Порівнюючи отримані результати з величиною реакцій в опорах на холостому ході, слід відзначити, що наступні розрахунки довговічності підшипника варто вести за величинами реакцій холостого ходу, враховуючи, що, в основному, тривалість процесу різання складає 0,5% від загального циклу роботи пили.

Розглянемо графік навантаження опорних підшипників з часом. Враховуючи, що період між різаними складає від 10 до 30 секунд, маємо графік навантаження опори В, зображений на рис. 7.

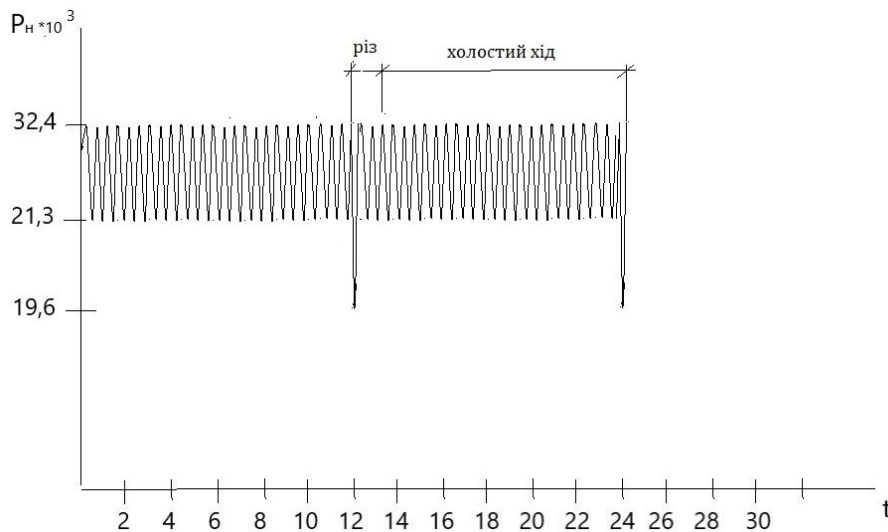


Рис. 7 – Графік навантаження опори В

Враховуючи ці величини, визначаємо еквівалентне навантаження на підшипникову опору В для цих двох випадків по відомій формулі [7, 8]

$$P = (V \cdot x \cdot F_r + Y \cdot y \cdot F_a) \cdot k_\sigma \cdot k_m, \quad (17)$$

де F_r, F_a – радіальна та осьова сили;

V – коефіцієнт обертання внутрішнього кільця відносно вектору навантаження, $V = 1,0$;

x, y – коефіцієнти радіального та осевого навантажень в залежності від типу підшипника;

k_r – коефіцієнт, який враховує вплив температурного режиму роботи, $k_r = 1,05$;

k_σ – динамічний коефіцієнт: $k_\sigma = 1-1,2$ для легких поштовхів під час роботи, $k_\sigma = 3,0$ – для значних поштовхів та вібрацій.

При цьому довговічність підшипника в годинах визначається за формулою:

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^n, \quad (18)$$

де C – динамічна вантажопідйомність, $C = 49600$ Н;

n – степеневий показник для роликпідшипників, що дорівнює 3,33.

Виконані розрахунки показали, що довговічність підшипників складає:

У випадку встановлення одного підшипника серії 32240:

- з врахуванням сили інерції 0,5 року;

- без врахування сили інерції 18 років.

При встановленні двох підшипників:

- з врахуванням сили інерції 4 роки;

- без врахування сили інерції 20 років.

Висновки

Таким чином, як показали відповідні експерименти, підводячи підсумок проведеним експериментальним дослідженням та оцінюючи результати розрахунків, можна зробити наступні висновки:

1. Розрахунки довговічності підшипників необхідно виконувати з врахуванням можливого максимального радіального биття диска, через те що різниця довговічності може дорівнювати від 5 до 36 разів.

2. Необхідна розробка заходів, які забезпечать мінімізацію радіального биття диска.

Перелік використаних джерел:

1. Іщенко А. О., Карпенко Т. М., Капустін С. В. Визначення динамічних складових реакцій в підшипниках дискового валу роторних пил (повідомлення 1). *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки»*. 2023. № 47. С. 165-169. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300053>.

- Ищенко А. А., Лоза Е. А. Пилы горячей резки проката. Конструкции и расчёт : монография. Мариуполь : ГВУЗ «ПГТУ», 2012. 251 с.
- Effects of operation temperature on thermal expansion and main parameters of radial ball bearing / Mitrović R. M., Atanasovska I. D., Soldat N. D., Momčilović D. B. *Thermal Science*. 2015. Vol. 19. Iss. 5. Pp. 1835-1844. DOI: <https://doi.org/10.2298/TSCI141223091M>.
- Иванченко Ф. К., Гребеник В. М., Ширяев В. И. Розрахунок машин та механізмів прокатних цехів. Частина 6. Ножиці и пили : підручник / за ред. А.В. Ширяева. Мариуполь : ПДТУ, 2012. 84 с.
- Гребеник В. М., Иванченко Ф. К., Ширяев В. И. Розрахунок металургійних машин та механізмів : підручник. Київ : Вища школа, 1988. 448 с.
- Influence study of oil film thrust bearing on thermal characteristics of high-speed precision roll grinding head / Wu H., Wang K., Sun G., Zhao L. *Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 18. No. 2. Pp. 330-336. DOI: <https://doi.org/10.21062/ujep/101.2018/a/1213-2489/MT/18/2/330>.
- Гайдамака А. В. Підшипники кочення. Харків : НТУ «ХПІ», 2009. 248 с.
- Добронос Ю. К. Механічне обладнання металургійних заводів (устаткування прокатних цехів). Краматорськ : ДДМА, 2019. 50 с.

References:

- A.O. Ishchenko, T.M. Karpenko, and S.V. Kapustin, «Vyznachennia dynamichnykh skladovykh reaktsii v pidshypanykakh diskovoho valu rotornykh pyl (povidomlennia 1)» [«Determination of dynamic component reactions in support bearings of rotor saws for cutting hot rolled (message 1)»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, № 47, pp. 165-169, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.47.2023.300053**. (Ukr.)
- A.A. Ishchenko, and E.A. Loza, *Pylы horiachei rezky prokata. Konstruktsyy y raschët : monohrafiya* [Hot cutting saws for rolled products. Designs and calculations: monograph]. Mariupol, Ukraine : HVUZ «PHTU» Publ., 2012. (Rus.)
- R.M. Mitrović, I.D. Atanasovska, N.D. Soldat, and D.B. Momčilović, «Effects of operation temperature on thermal expansion and main parameters of radial ball bearing», *Thermal Science*, vol. 19, iss. 5, pp. 1835-1844, 2015. doi: **10.2298/TSCI141223091M**.
- F.K. Yvanchenko, V.M. Hrebennyk, and V.Y. Shyriaev, *Rozrakhunok mashyn ta mekhanyzmiv prokatnykh tsekhiv. Chastyna 6. Nozhytsi y pyly : pidruchnyk* [Calculation of machines and mechanisms of rolling shops. Part 6. Scissors and saws: a textbook], A.V. Shyriaev, Ed. Mariupol, Ukraine: PDTU Publ., 2012. (Ukr.)
- V.M. Hrebennyk, F.K. Ivanchenko, and V.Y. Shyriaev, *Rozrakhunok metalurhiinykh mashyn ta mekhanyzmiv : pidruchnyk* [Calculation of metallurgical machines and mechanisms: textbook]. Kyiv, Ukraine: Vyshcha shkola Publ., 1988. (Ukr.)
- H. Wu, K. Wang, G. Sun, and L. Zhao, «Influence study of oil film thrust bearing on thermal characteristics of high-speed precision roll grinding head», *Manufacturing Technology*, vol. 18, no. 2, pp. 330-336, 2019. doi: **10.21062/ujep/101.2018/a/1213-2489/MT/18/2/330**.
- A.V. Haidamaka, *Pidshypanyky kochennia* [Rolling bearings]. Kharkiv, Ukraine: NTU «KhPI» Publ., 2009. (Ukr.)
- Yu.K. Dobronosov, *Mekhanichne obladdnannia metalurhiinykh zavodiv (ustatkuvannia prokatnykh tsekhiv)* [Mechanical equipment of metallurgical plants (equipment of rolling shops)]. Kramatorsk, Ukraine: DDMA Publ., 2019. (Ukr.)

Стаття надійшла 03.03.2024

Стаття прийнята 28.03.2024

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 622.781

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310674

© Чупринов Є.В.¹, Кассім Д.О.², Реков Ю.В.³**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОКАТИШІВ
ЗА РАХУНОК КРАЩОГО МЕТОДУ ПІДГОТОВКИ
ДОННОЇ ТА БОРТОВОЇ ПОСТІЛІ**

Проаналізовано методи управління якістю окатишів за рахунок управління донною і бортовою постіллю. Показано, що даний метод може бути ефективним для підвищення властивостей залізородної продукції, але не використовується в промисловості через недостатню обґрунтованість. Запропонована нова технологія термозміцнення окатишів, яка дозволяє істотно поліпшити їх міцність при відновленні в доменній печі. Проведені дослідження по термозміцненню окатишів в обпалювальній чаші діаметром 300 мм і висотою шару 400 мм. Результати досліджень показали, що питома продуктивність обпалювального агрегату аналогічна технологічним режимам, міцність на стиск обпалених, проте, міцність на удар і стирання при відновленні у придатної фракції обпалених окатишів, отриманих за запропонованою технологією, істотно краще, ніж за прийнятою. Впровадження розробленої технології в промислових умовах в цехах з виробництва окатишів без реконструкції є досить простим і не вимагає суттєвих капіталовкладень.

Ключові слова: залізородні окатиші, донна і бортова постіль, термозміцнення, міцність, відновлення, доменна піч.

Ye.V. Chuprynov, D.O. Kassim, Yu.V. Rekov. Study of the possibility of improving the quality of pellets through a better method of bottom and side bed preparation. The methods of managing the quality of pellets due to the management of the bottom and side beds are analyzed. A literature review of existing technologies in this area was carried out and it was shown that this issue is not fully resolved in science. Approximate technologies are studied, their advantages and disadvantages are analyzed. In particular, it is shown that the use of existing technology will require additional burning of pellets in another unit, which is technologically impossible and economically impractical. It is shown that this method can be effective for improving the properties of iron ore products, but is not used in industry due to insufficient justification. A new technology of thermal strengthening of pellets is proposed, which allows to significantly improve their strength during recovery in a blast furnace. Conducted studies on thermal strengthening of pellets in a firing bowl with a diameter of 300 mm and a layer height of 400 mm. The results of the research showed that the specific productivity of the firing unit during heat hardening of raw pellets according to the proposed technology is practically similar to the technological regimes adopted in the operating workshops for the production of pellets. The compressive strength of fired pellets according to the proposed technology and accepted in workshops also practically does not differ. However, the impact strength and abrasion resistance during recovery from a suitable fraction of fired pellets obtained by the proposed technology is significantly better than by the accepted one. It has been proven that the developed technology allows to

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-1750-1237, kassim@duet.edu.ua

³ канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0009-0006-0318-0168, yuriy.rekov@mipolytech.education

significantly improve the strength characteristics of fired pellets during the recovery process in the blast furnace, which leads to an improvement in the technical and economic performance of the blast furnace. Implementation of the developed technology in industrial conditions in pellet production shops without reconstruction is quite simple and does not require significant capital investments.

Key words: iron ore pellets, bottom and side bedding, heat hardening, strength, recovery, blast furnace.

Постановка проблеми. При виробництві залізорудних окатишів використовують донну і бортову постіль, які здійснюють важливий вплив на технологічний процес термозміцнення. В якості постілі застосовують готові обпалені окатиші у кількості 30-35% від маси готової продукції. Головним недоліком її застосування є те, що обпалені окатиші донної і бортової постілі повторно нагріваються до температури 900-1300°C і їх скляна залізо-силікатна зв'язка рудних зерен, що є джерелом міцності обпалених окатишів при відновленні, розкристалізовується, що призводить до утворення великої кількості дріб'язку після їх завантаження у доменну піч.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класична технологія термозміцнення сирих окатишів на конвеєрній обпалювальній машині включає виділення на грохоті з охолоджених обпалених окатишів трьох фракцій: 0-5 мм – дріб'язок (обпалений зворот), 5-10 мм – проміжна фракція (готова продукція) і 10-18 або 10-20 мм – обмежувальна фракція (постіль і готова продукція). Частина готових окатишів, яка направляється в донну і бортову постіль, укладається на колосникові решітки певною товщиною (до 100 мм) з готових обпалених окатишів крупністю 10-18 або 10-20 мм, після чого відбувається укладка на постіль безпосередньо сирих окатишів для їх термозміцнення.

Недоліком класичної технології є те, що в процесі термозміцнення сирих окатишів обпалені окатиші донної і бортової постілі повторно нагріваються до температури 900-1300°C і їх скляна залізо-силікатна зв'язка рудних зерен, що є джерелом міцності обпалених окатишів при відновленні, розкристалізовується [1]. Це тягне за собою істотне зниження міцності обпалених окатишів при відновленні в доменній печі при виплавці чавуну з утворенням великої кількості дріб'язку після їх завантаження у відновлювальний агрегат, що порушує її газодинамічний режим, рівний схід матеріалу та істотно погіршує техніко-економічні показники роботи доменної печі.

Протягом багатьох десятиліть питанню ефективного застосування донної і бортової постілі через призму її рекристалізації не приділялось багато уваги. Досвід авторів та проведений літературний аналіз свідчить про те, що зарубіжні дослідники розглядали постіль в більшій мірі, як частину загального шару окатишів, не виділяючи її в окрему систему, в котрій відбуваються власні газодинамічні та фізико-хімічні процеси. Так, канадські вчені [2] виконали аналіз цілого ряду математичних моделей процесів термозміцнення окатишів із використанням донної і бортової постілі та показали ефективність застосування термокінетичних моделей обпалення на прикладі Канадської залізорудної компанії (ЮСС). Недостатність досліджень в цій області відмічають і в роботі [3], проте, хоч автори і розглядають високотемпературні процеси, що відбуваються в шарі окатишів на обпалювальній машині, головний акцент зроблено на вплив температури дуття, швидкості дуття та реакції окислення на температуру шару та загальні процеси в ньому. Трохи далі пішли дослідники в роботі [4], які на основі аналізу механіки теплообміну, фізико-хімічних змін процесу сушки та попереднього нагрівання окатишів на колосниковій решітці створили математичну модель, яка пройшла перевірку на фабриці з виробництва окатишів підприємства Shougang Mining Company. Модель дозволяє досліджувати газодинамічні параметри шару окатишів і постілі для практичного контролю виробництва та оптимізації дизайну колосників. В роботі [5] показано, що домінуючим механізмом теплообміну при термозміцненні окатишів є конвекція, яка визначається порізністю шару.

Найближче до вирішення цього питання підійшли в СРСР [6]. Авторське свідоцтво описує спосіб обпалення окатишів на конвеєрній машині, що включає укладку на колосникові решітки донної постілі і сирих окатишів діаметром 6-22 мм, їх сушку, обпалення і охолодження; для донної постілі виділяють обпалені окатиші, середній діаметр яких перевищує в 1,08-1,75 рази середній діаметр сирих окатишів. Проте, в промисловості він не був застосований через те, що в обпалених окатишах заявленої крупності (6-22 мм) за мінімальним коефіцієнтом 1,08 (від середнього діаметра

14 мм це 15,12 мм) 69,1% окатишів донної постілі будуть потрапляти в готову продукцію. За максимальним коефіцієнтом діаметр окатишів постілі повинен бути на 2,5 мм більше максимального розміру готових окатишів (від середнього діаметра 14 мм це 24,5 мм), тобто такі окатиші в початкових обпалених окатишах за відомим способом відсутні. В цьому випадку для донної і бортової постілі необхідно буде в окремому агрегаті обпалювати спеціально підготовлені великі окатиші (24,5 мм), що істотно ускладнює і підвищує вартість технології отримання постілі.

Якщо ж врахувати, що в доменній плавці використовують обпалені окатиші з меншим діаметром 5-18 або 5-20 мм (за мінімальним коефіцієнтом, це 12,42 і 13,5 мм), то в готову продукцію потрапить 69 і 67,5% (від їх максимального розміру 18 і 20 мм) обпалених окатишів донної і бортової постілі, які пройшли повторний високотемпературний нагрів, з розкристалізацією залізо-силікатної зв'язки рудних зерен і, відповідно, з низькою міцністю при відновленні, що після завантаження окатишів в доменну піч призведе до порушення її газодинамічного режиму і зниження техніко-економічних показників роботи: зменшення продуктивності доменної печі і збільшення питомої витрати коксу. За максимальним коефіцієнтом – 20,125 і 21,875 мм (перевищення на 2,125 і 1,875 мм від максимального розміру обпалених окатишів) окатиші для донної і бортової постілі в готовій продукції просто відсутні, і постіль необхідно буде також отримувати в окремому агрегаті, що практично неможливо.

Мета статті – дослідження можливості підвищення якості сировини за рахунок удосконалення технології підготовки донної та бортової постілі в цехах з виробництва залізородних окатишів.

Виклад основного матеріалу. Донна постіль використовується для запобігання забивання живого перетину колосникового поля обпалювальних візків сирими окатишами, захисту колосників від перегріву в високотемпературних зонах горна, поліпшення якості готового продукту за рахунок створення раціональної мінімальної різниці температури на границі шар-постіль і верху шару, а також для підвищення ступеня термозміцнення сирих окатишів нижньої частини шару. Бортова постіль використовується для поліпшення якості обпалення сирих окатишів у бортів випалювальних візків, вирівнювання ступеню термозміцнення сирих окатишів по ширині машини і захисту бортів випалювальних візків від перегріву в високотемпературних зонах горна.

Для розробки технологічних рішень з покращення якості залізородних окатишів за рахунок управління донною і бортовою постіллю були проведені наступні дослідження. З підготовленої шихти виготовляли сирі окатиші крупністю, яка забезпечувала отримання окатишів фракції 5-18 або 5-20 мм і виділення з них донної і бортової постілі +18 або +20 мм. Зокрема враховували, що в процесі термозміцнення при максимальній температурі випалу 1300°C ступінь усадки окатишів, в залежності від складу, становить 2-7%. Термозміцнення окатишів здійснювали в обпалювальній чаші [7] діаметром живого перетину 300 мм і висотою шару 400 мм. Висота шару донної і бортової постілі 100 і 70 мм, відповідно.

Результати випробувань наведені в таблиці, з якої видно, що питома продуктивність обпалювального агрегату при термозміцненні сирих окатишів за пропонованою технологією практично аналогічна технологічним режимам, що прийняті в діючих цехах з виробництва окатишів, за винятком використання максимального (1,75) коефіцієнта крупності, при якому питома продуктивність трохи нижче. Аналогічні тенденції стосуються і показника міцності на стиск обпалених окатишів за пропонованою технологією і прийнятою у цехах. А ось міцність на удар і стирання при відновленні у придатної фракції обпалених окатишів, отриманих за пропонованою технологією, істотно краще, ніж за прийнятою, так як вони не проходили повторного високотемпературного нагріву і мають залізоокисну зв'язку рудних зерен.

У окатишах, обпалених по способу, що прийнятий в діючих цехах, в значній частині залізо-силікатна зв'язка розкристалізована, що тягне за собою їх більше руйнування при відновленні. Ступінь відновлення обпалених за розробленим способом окатишів незначно нижчий, ніж за існуючим.

Таким чином, розроблена технологія дозволяє істотно поліпшити характеристики міцності обпалених окатишів в процесі відновлення в доменній печі, що призводить до поліпшення техніко-економічних показників роботи доменної печі.

Таблиця

Порівняння показників якості окатишів, отриманих за діючою та розробленою технологіями

Показники	Діюча техно- логія	Технологія згідно [6]	
		$k_{\min} = 1,08$	$k_{\max} = 1,75$
Питома продуктивність ОКМ, т/м ² ·год	0,96	0,96	0,91
Міцність на стиск окатишів, кг/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)	237	233	235
Міцність при відновленні (+6,3 мм), % (ДСТУ ISO 4700:2005)	63,4	62,9	66,7
Стиранність при відновленні (-5) мм, % (ДСТУ ISO 4700:2005)	9,3	9,4	8,7
Ступінь відновлення, % (ДСТУ ISO 7215:2007)	88,5	88,6	86,7

Продовження таблиці

Показники	Розроблена технологія					
	+18 мм			+20 мм		
	18-20 мм	18-22 мм	18-24 мм	20-22 мм	20-24 мм	20-26 мм
Питома продуктивність ОКМ, т/м ² ·год	0,96	0,96	0,95	0,96	0,95	0,87
Міцність на стиск окатишів, кг/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)	231	235	236	234	232	238
Міцність при відновленні (+6,3 мм), % (ДСТУ ISO 4700:2005)	85,8	84,1	81,5	83,4	83,7	82,6
Стиранність при відновленні (-5) мм, % (ДСТУ ISO 4700:2005)	4,2	3,9	4,1	3,7	3,8	4,3
Ступінь відновлення, % (ДСТУ ISO 7215:2007)	87,4	88,1	87,2	86,9	86,3	84,2

Впровадження розробленої технології в промислових умовах в цехах з виробництва окатишів без реконструкції є досить простим і не вимагає суттєвих капіталовкладень. Необхідно тільки змінити величину отворів деяких зон існуючих грохотів. Виходячи з виробництва максимального розміру придатної фракції обпалених окатишів (18 або 20 мм) і певної експериментальної величини її зменшення за рахунок усадки (зазвичай в діапазоні 2-7 % або, відповідно, для кожного максимального розміру обпалених окатишів 0,4-1,5 або 0,5-1,7 мм вихідного діаметра сирих окатишів в процесі їх термозміцнення), визначають розмір максимального діаметра сирих окатишів, щоб максимальний діаметр обпалених окатишів був на 2-4 мм більше максимального діаметра придатної фракції. Таким чином, максимальний діаметр сирих окатишів повинен бути, з урахуванням максимального діаметра придатної фракції обпалених окатишів і діапазону величини усадки, відповідно, 22,5-23,5 або 24,5-25,7 мм. Після термозміцнення з обпалених окатишів виділяють послідовно на грохоті наступні фракції: 0-5 мм – дріб'язок у зворот; 5-18 або 5-20 мм – придатна фракція готової продукції; +18 або +20 мм – донна і бортова постіль.

Висновки

1. Проаналізовані технологічні рішення по вдосконаленню процесу термозміцнення залізрудних окатишів за рахунок управління донною та бортовою постіллю. Визначено, що потенціал цього механізму в промисловості повністю не реалізований через відсутність відповідних досліджень.

2. Проведені лабораторні спікання для відпрацювання нової технології, яка передбачає використання у якості донної та бортової постілі тільки обпалених окатишів діаметром на 2-4 мм більше діаметру, що обмежує максимальний діаметр придатної фракції обпалених окатишів.

3. Аналіз характеристик процесу термозміцнення та якості отриманих залізородних окатишів показав, що при застосуванні нової технології питома продуктивність обпалювального агрегату не змінюється, залишається стабільним показник міцності на стиск обпалених окатишів, але відбувається збільшення міцності на удар і стирання при відновленні, що позитивно відображається на роботі доменної печі.

Перелік використаних джерел:

1. Теория и технология подготовки шихтовых материалов для доменной и бездоменной металлургии железа: учебник / Ф. М. Журавлев и др. Кривой Рог : Издатель Чернявский Д.А., 2020. 663 с.
2. Cross M., Blot P. Optimizing the operation of straight-grate iron-ore pellet induration systems using process models. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 1999. Vol. 30. Pp. 803-813. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-999-0042-5>.
3. Feng J.-X., Xie Z.-Y., Chen Y.-M. Temperature distribution of iron ore pellet bed in grate. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012. Vol. 19. Pp. 7-11. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60052-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60052-1).
4. Development and application of thermal mathematical model of iron ore pellet bed in grate / J.-X. Feng et al. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2011. Vol. 16. Pp. 312-315. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12204-011-1150-3>.
5. Ljung A.-L., Lundström T. S., Tano K. Simulation of heat transfer and fluid flow in a porous bed of iron ore pellets during up-draught drying. *Proceedings of the Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*, Melbourne, Australia, 13-15 December 2006. Pp. 1-6.
6. Способ обжига окатышей на конвейерной машине: а.с. 1010144 СССР: МПК: С22В 1/20. № 3332634/22-02; заявл. 23.07.81; опубл. 07.04.83, Бюл. № 13. 4 с.
7. Офлюсовані локальні спеки – огрудкована залізородна моносировина для сучасної доменної плавки / Є.В. Чупринов та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2020. № 41. С. 60-70. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.41.2020.226183>.

References:

1. F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, N.I. Stupnik, V.S. Morkun, E.V. Chuprinov, and D.A. Kassim, *Teoriya y tekhnolohiya podhotovky shykhtovykh materyalov dlia domennoi y bezdomennoi metallurhyy zheleza: uchebnyk* [Theory and technology of preparation of charge materials for blast furnace and blast furnace metallurgy of iron: textbook]. Kryvyj Rih, Ukraine: Yzdatel Cherniavskiy D.A. Publ., 2020. (Rus.)
2. M. Cross, and P. Blot, «Optimizing the operation of straight-grate iron-ore pellet induration systems using process models», *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 30, pp. 803-813, 1999. doi: **10.1007/s11663-999-0042-5**.
3. J.-X. Feng, Z.-Y. Xie, and Y.-M. Chen, «Temperature distribution of iron ore pellet bed in grate», *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 19, pp. 7-11, 2012. doi: **10.1016/S1006-706X(12)60052-1**.
4. J.-X. Feng, K.-. Liang, C. Zhang, J.-H. Xu, Y.-M. Zhang, and J.-B. Yang, «Development and application of thermal mathematical model of iron ore pellet bed in grate», *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, vol. 16, pp. 312-315, 2011. doi: **10.1007/s12204-011-1150-3**.
5. A.-L. Ljung, T.S. Lundström, and K. Tano, «Simulation of heat transfer and fluid flow in a porous bed of iron ore pellets during up-draught drying», in *Proceedings of the Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*, Melbourne, Australia, 2006, pp. 1-6.
6. F.A. Riabokon et al., «Sposob obzhyha okatishei na konveiernoi mashyne» [«Method of firing pellets on a conveyor machine»], *author's certificate 1010144 USSR Appl. 3332634/22-02*, Apr. 07, 1983. (Rus.)

7. E.V. Chuprinov, F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, D.O. Kassim, and K.O. Shmeltser, «Ofliusovani lokalni speky – ohrudkovana zalizorudna monosyrovyna dlia suchasnoi domennoi plavky» [«Fluxed local cakes – lumped mono-raw materials for modern blast furnace»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, № 41, pp. 60-70, 2020. doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226183. (Ukr.)

Стаття надійшла 06.03.2024

Стаття прийнята 28.03.2024

УДК 669.715.22

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310676

© Фон Прусс М.А.*

МЕТОДИ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ЗАЛІЗОВМІСНИХ ФАЗ В ЛИВАРНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ СИСТЕМИ Al-Si-Cu З ВМІСТОМ ЗАЛІЗА ДО 1,5 % МАС.

У статті представлено результати експериментальних досліджень, які демонструють можливість нейтралізації несприятливих залізовмісних фаз в алюмінієвих сплавах системи Al-Si-Cu, отриманих методом лиття, за допомогою модифікування Cr, Mo, V і Co. Проведено аналіз впливу цих елементів на процес кристалізації, мікроструктуру та фазовий склад алюмінієвих сплавів. Отримані результати свідчать про суттєві зміни у морфології та розподілі залізовмісних фаз, що дозволяє покращити механічні та експлуатаційні характеристики алюмінієвих сплавів.

Ключові слова: модифікування, мікроструктура, алюмінієві сплави, вторинне виробництво, залізовмісні фази.

M.A. Fon Pruss. Methods of neutralization of iron-containing phases in cast aluminum alloys of the Al-Si-Cu system with iron content of up to 1,5 mass. %. The article discusses the effectiveness of various modifiers, namely chromium (Cr), molybdenum (Mo), vanadium (V), and cobalt (Co), in neutralizing the negative impact of iron on the properties of aluminum alloys in the Al-Si-Cu system by altering the morphology of iron-containing phases. The current advancements in the modification of aluminum alloys are examined, focusing on the influence of these elements on microstructural changes and mechanical properties. An in-depth analysis of the microstructure was conducted, and the optimal concentrations of the modifying elements were identified to achieve enhanced mechanical characteristics. The study highlights that the addition of Cr, Mo, V, or Co facilitates the formation of a fine-grained structure and significantly reduces the size of iron-containing phases to approximately 10 μm . Furthermore, the research elaborates on the thermodynamic interactions between iron and the modifying elements, providing insights into the mechanisms by which these modifiers influence the crystallization process and phase distribution within the alloy. This study opens new avenues for the development of high-performance aluminum alloys with optimized microstructures through precise control of modifier concentrations. The improved alloys exhibit superior mechanical properties, making them suitable for applications in various industrial sectors, including automotive and other industries, where high strength and reliability are critical. Experimental results demonstrate that the strategic addition of Cr, Mo, V, and Co can effectively mitigate the adverse effects of iron inclusions, leading to alloys with enhanced ductility, tensile strength, and

* мол. наук. співробітник, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, м. Київ, ORCID: 0000-0002-0450-5490, m.fonpruss@gmail.com

overall performance. The findings suggest that these modifiers not only refine the grain structure but also promote a more uniform distribution of phases, thus improving the alloy's resistance to cracking and other forms of mechanical failure. The insights gained from this research provide a valuable foundation for further exploration and optimization of aluminum alloys for high-demand applications, emphasizing the critical role of microstructural engineering in achieving desired material properties.

Key words: *modification, microstructure, aluminum alloys, secondary production, iron-containing phases.*

Постановка проблеми. Алюмінієві сплави широко використовуються у ливарному виробництві завдяки своїм добрим механічним властивостям, корозійній стійкості та легкості обробки. Ці сплави визнані ідеальними матеріалами для застосування у сфері автомобілебудування завдяки високій міцності при малій вазі, корозійній стійкості та хорошій оброблюваності [1, 2]. Вони дозволяють значно зменшити вагу автомобіля, що, в свою чергу, підвищує його паливну ефективність та зменшує викиди шкідливих речовин [3].

Однак, високі витрати на первинне виробництво алюмінію часто обмежують широке використання цього металу в конструкції транспортних засобів. Щоб досягти подальшого зменшення ваги легких транспортних засобів, зберігаючи доступність за ціною, важливо знизити вартість виробництва алюмінієвих компонентів.

Алюміній є економічно-вигідним, бо придатний для повторного використання. Тобто алюмінієві вироби можуть бути багаторазово перероблені в нові продукти із винятковою швидкістю відновлення, де енергія, необхідна для виробництва вторинного або переробленого алюмінію, становить лише 5% енергії, яка використовується для виробництва первинного алюмінію. Таке скорочення підкреслює значні економічні та екологічні переваги використання переробленого алюмінію у виробництві деталей для автомобільної промисловості [3].

За технологією виготовлення виробів, найрозповсюдженішою є група ливарних алюмінієвих сплавів на основі системи Al-Si-Cu (6...13 мас. % Si, 1..5 мас. % Cu) [2], які називають силумінами, мають високі ливарні властивості і вирізняються високою рідкотекучістю, малою лінійною усадкою (0,9...1,2%) та схильністю до утворення гарячих тріщин [1, 2]. Крім того, чудова ливарна здатність алюмінієвих сплавів на основі Al-Si-Cu, дозволяє виготовляти складні компоненти, а також консолидувати зварні або з'єднані підсистеми в єдину литу деталь за менших витрат.

Однак недолік таких сплавів у тому, що при виготовленні та повторній переробці цих сплавів утворюються залізовмісні фази з різною особливою морфологією [1, 4]. Найбільш небезпечною є фаза β -Al₃FeSi [1]. Маючи голкоподібну форму, вона зменшує міцність та пластичність алюмінієвих сплавів, окрихчує їх і погіршує здатність оброблення різанням [5]. З огляду на це, оптимізація властивостей таких сплавів є важливим напрямом досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найкращий спосіб позбутися цього недоліку – це зміна морфології цієї фази на більш сприятливу за допомогою модифікування [6]. Модифікування змінює процес евтектичної та перитектичної реакцій (за останньою реакцією утворюються залізовмісні фази), а також процес первинної кристалізації [1-3, 5]. При модифікуванні не тільки змінюється структура, але й істотно поліпшуються механічні та ливарні властивості сплаву. Модифікування – термодинамічні, хімічні, а також енергетичні впливи, ефект від яких полягає в змінах структурно-фазового стану сплавів, у порівнянні з необробленим станом. Одним із загально визнаних і високоефективних підходів модифікування є метод введення окремих елементів або їхніх з'єднань у невеликій кількості до сотих відсотка в металевий розплав [7]. Варто зауважити, що зміна морфології у силумінах з'являється тільки при певному вмісті модифікатора у розплаві [5, 6].

Вибір модифікатора залежить від конкретного складу сплаву, бажаних властивостей і передбачуваного застосування. Також вибір модифікатора вимагає ретельного розгляду хімічного складу сплаву та бажаних структурних і механічних поліпшень.

Існують тенденції поширення багатокомпонентних модифікаторів, які утворюють більш складні хімічні сполуки, які не тільки змінюють морфологію залізовмісної фази, а й грають роль додаткових зміцнювачів [7]. Один з негативних факторів застосування комплексного

модифікатору полягає у тому, що він має складний фазовий склад і високий модифікуючий ефект, що може призвести як до поганого засвоєння, так і до перемодифікування.

Тому розробка процесів комплексного модифікування повинна також брати до уваги допустимі концентрації складових модифікуючих компонентів, їх здатність до утворення комплексних високотемпературних інтерметалідів, тощо.

Переваги застосування комплексного модифікування полягають в наступному [2-7]:

1) дія одночасно двох або більше модифікаторів може мати синергетичний мультиплікаційний вплив на зміну структурно-фазових параметрів сплавів;

2) з'являється можливість знизити відсоток вмісту кожного елемента, що дає виконання умов обмеження складу сплаву за домішками та забезпечує від перемодифікування;

3) можливість створити дрібнокристалічні та нестандартні структури, у тому числі – армовані композитні сплави.

Для здійснення ефективного комплексного модифікування, яке забезпечує всебічний вплив на матеріал, необхідно врахувати два типи модифікаторів:

- Зерноподрібнюючі модифікатори, що включають елементи, такі як Co, Cr, Ti, Zr, Sc, Mo, V, Hf, PЗМ, а також деякі сполуки, наприклад, карбіди, бориди тощо [3-7].

- Зміцнюючі модифікатори, які містять фази, що утворюються у сплаві завдяки присутності певних елементів, що сприяють дисперсійному зміцненню матриці. До таких елементів належать Sc, Mn, Cr та інші [2-7].

За результатами огляду наукової літератури було обрано модифікатори першого типу, а саме: Cr, Mo, V та Co [6, 7]. Змінюючи мікроструктуру та хімічні взаємодії всередині матеріалу, ці елементи ефективно запобігають утворенню шкідливих залізовмісних голкоподібних фаз.

Хром також має сильну спорідненість із залізом і діє як марганець в плані модифікування залізовмісних фаз. Він є слабшим модифікатором, ніж марганець, проте сильнішим, ніж кобальт. Хром сприяє утворенню інтерметалічних сполук $Al_{13}Si_4(CrFe)_4$, які є компактними та більш сприятливими, ніж $\beta-Al_5FeSi$.

Ванадій чинить незначну зерноподрібнюючу дію і сприяє збільшенню легованості твердого розчину на основі алюмінію кремнієм. Здатність до зерноподрібнення може ефективно перешкоджати зростанню залізовмісних фаз і не дозволяти їм досягти великих розмірів через обмеження місця для їх утворення.

Молібден за механізмами впливу на структурно-фазові характеристики силумінів є схожим на ванадій, проте за участі молібдену частіше виникають первинні залізовмісні фази зіркоподібної форми.

Кобальт вибрано у якості модифікатора, через його сильну спорідненість із залізом. Вона зумовлена насамперед їхніми схожими атомними структурами та хімічними властивостями (утворення різних сполук). Коли кобальт вводять в алюмінієвий розплав, він легко реагує з атомами заліза, замінюючи його в залізовмісних фазах. Це призводить до утворення залізовмісних фаз, які будуть мати морфологію, відмінну від голкоподібної форми. В цьому випадку дія кобальту є схожою на дію марганцю.

Модифікатори Cr, Mo, V та Co за типом відносяться до 1 групи, які створюють в розплаві високодисперсну суспензію, частки якої є зародками, навколо яких буде рости кристал [7]. Тобто ці модифікатори виступають як центри кристалізації. Однак застосування цих модифікаторів для модифікування залізовмісних фаз має зовсім інший механізм їх утворення, як було зазначено в [4-7]. Ванадій, хром, молібден, кобальт утворюють тверді розчини з малою граничною розчинністю елемента в твердому розчині на основі алюмінію та інтерметалідні з'єднання з алюмінієм. Тому вони можуть входити у залізовмісні фази чи зв'язувати залізо у інтерметаліди з неголчастою морфологією.

Таким чином, модифікатори Cr, Mo, V та Co для нейтралізації заліза будуть виступати як елементи впровадження і заміщення в кристалічній решітці заліза, яке здійснюється шляхом обміну у співвідношенні 4 атома модифікатора на атом заліза, що вплине на кристалографічні і термодинамічні характеристики майбутніх залізовмісних фаз [2, 6].

Метою статті є визначення впливу модифікування елементами Cr, Mo, V та Co, на зміну морфології залізовмісних фаз у вторинних силумінах з підвищеним вмістом заліза для покращення їхніх механічних властивостей.

Виклад основного матеріалу. В якості шихтових матеріалів брали відходи ливарних алюмінієвих сплавів АК8М3 та АК18 для одержання базового сплаву AlSi9Cu3. Виплавку базового сплаву проводили в лабораторній шахтній печі опору СШОЛ-1.1,6/12 в графітошамотному тиглі до температури $800 \pm 10^\circ\text{C}$ і витримували протягом 5 хвилин для забезпечення розчинення всіх тугоплавких фаз та нівелювання можливої структурної спадковості. Дошихтовували розплав необхідною кількістю компонентів, а саме лігатурою Al-33Cu. Для дослідження впливу модифікування при підвищеній концентрації заліза в розплав вводили чисте залізо у кількості 1,5% мас.

Температуру розплаву вимірювали термопарою типу А (вольфрам-ренієвий сплав, ВР5/ВР20), захищеною керамічним чохлам.

Після розплавлення і перегріву рідкого алюмінієвого розчину проводили рафінування та флюсову обробку. Для убезпечення від надмірного насичення домішками застосовували процедуру рафінування розплаву, використовуючи сольовий флюс із складом 47,5% NaCl, 47,5% KCl та 5% NaF (% мас.) у кількості 0,5% від маси сплаву, який має однакову температуру плавлення.

Модифікатори Cr, Mo, V та Co вводили в розплав за допомогою лігатур Al-5Cr, Al-10Mo, Al-10V, Al-5Co (вміст яких не перевищував 0,1% мас.), що є більш доцільним з технологічної точки зору. Для роботи було використано лігатури, виплавлені методом електронно-променевої ливарної технології. Такі лігатури містять найдрібніші модифікуючі інтерметалідні фази, розмір яких в 10-250 разів менший за промислові аналоги та може складати 1...10 мкм [7]. Таким чином, їх засвоєння відбувається швидше та рівномірніше, що позитивно впливає як на ефективність модифікування, так і на енергозбереження.

Розплав перемішували за допомогою титанової мішалки для однорідності сплаву та витримували до 7 хвилин. Після цього з поверхні розплаву видаляли шлаки.

Після витримки температуру розплаву знижували та підстужували до 780°C для подрібнення мікро- та макроструктури, зменшення внутрішніх напружень та короблення, що забезпечується завдяки наближенню температури розплаву до температури ліквідус. Потім розплав виймали з печі, перемішували та розливали за температури 760°C . Така завищена температура розливи дозволила зменшити імовірність утворення тугоплавких фаз та їх коагуляції в розплаві, а не у формі під час кристалізації.

Далі розплав повільно заливали у підігріту до 200°C металеву форму, яку нагрівали для запобігання тріщиноутворення. Щоб забезпечити повільне охолодження розплаву, його залишали охолоджуватися на повітрі.

Після виготовлення зразків було досліджено хімічний склад та міроструктуру цих матеріалів. Мікроструктуру досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа з енергодисперсним мікроаналізатором РЕМ 106И. Зразки механічно обробляли, після чого з них робили шліфи для подальших досліджень.

Хімічний склад досліджуваних зразків сплаву AlSi9Cu3 з підвищеним вмістом заліза після модифікування наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад дослідних зразків сплаву AlSi9Cu3 з підвищеним вмістом заліза у вихідному немодифікованому стані та після модифікування

Сплав	Хімічний склад, % мас., Al – основа							
	Si	Cu	Fe	Mn	Модифікатори			
					Co	Cr	V	Mo
Вихідний	8,8	2,74	1,53	0,56	-	-	-	-
Модифікований	10,14	3,09	1,72	0,45	0,07	0,09	0,08	0,07

Марганець, який можна також вважати модифікатором, що постійно присутній в сплаві, містився у кількості 0,45...0,56% мас. За звичайних умов така кількість марганцю буде недостатньою для утворення більш розгалужених залізовмісних фаз $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$ у формі так званого «китайського шрифту» [1], які містять залізо. За загальноприйнятими правилами, співвідношенням Mn:Fe повинно бути близько 0,5. Збільшення вмісту марганцю призводить до суттєвого погіршення технологічних властивостей та механічних характеристик, тому при вмісті заліза у сплаві на рівні 1,5% мас. потрібно залучати додаткові елементи, які або також зв'яжуть залізо,

або підсилять дію марганцю. Додавання ванадію також змінює морфологію залізовмісних фаз, підсилюючи дію марганцю. Це дозволяє забезпечити утворення більшої кількості компактних залізовмісних фаз у сплаві при підвищеному вмісті заліза до 1,5% мас. Також хром та кобальт зможуть замінити собою частину марганцю, виконуючи аналогічні реакції в алюмінієвому сплаві.

Такий підхід в дослідженні сприяє більш широкому розумінню синергії модифікаторів між собою та їх впливу на структуру і зміну морфології та розмірів залізовмісних фаз.

Репрезентативна мікроструктура сплаву AlSi9Cu3 після лиття без модифікування проілюстрована на рисунку 1.

Якість відливок оцінюється по дендритній структурі α -Al, розміру Si пластин, залізовмісних фаз та механічним властивостям. Морфологія зерен твердого розчину вихідних сплавів принципово не відрізняється одна від одної. Зерна в теорії повинні мати форму дендритів з довгими гілками першого порядку, що мають гострі кінці, і розвинутими гілками другого порядку. Однак з мікроструктур не спостерігаються дендрити, а пластинчастий Si зовсім відсутній. Структура цього зразка виражається в утворенні переважно дрібнодисперсної та доволі рівномірної структури. Так як залізовмісні фази представляють найбільший інтерес, тому основну увагу було зосереджено на них.

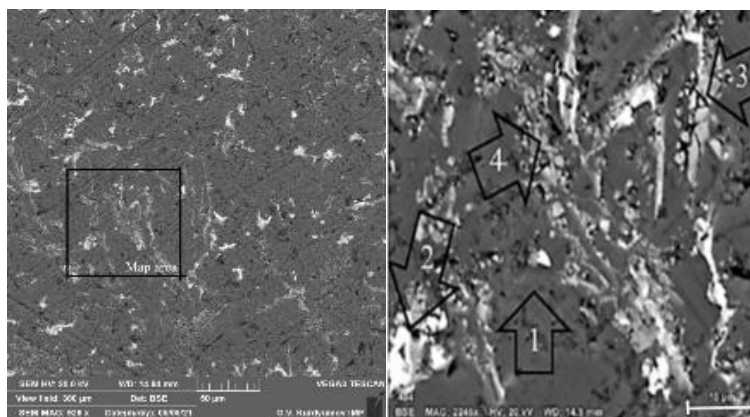


Рис. 1 – Мікроструктури дослідного зразка вихідного сплаву AlSi9Cu3(Fe)

Залізовмісні фази концентрувались на певних ділянках шліфа та зустрічались у вигляді невеликих за розміром загалом розгалужених кристалів до 30 мкм. Їх розподіл був досить рівномірний за перетином шліфа.

Випробований сплав AlSi9Cu3(Fe) є багатокомпонентний, тому в ньому кристалізуються більш складні евтектичні суміші. Після завершення кристалізації дендритів α -Al відбувається кристалізація складних евтектичних сумішей: потрійних – $\alpha(\text{Al}) + \text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2 + \beta(\text{Si})$.

Для визначення будови зразків та визначення локального хімічного складу виділених зон застосовували метод скануючої електронної мікроскопії (SEM), обладнаної енергетично дисперсійною рентгенівською спектроскопією (EDS) (табл. 2).

Таблиця 2

Локальний хімічний склад досліджуваних зразків, виділених на рисунках 1 та 2

Сплав	Точка	Хімічний склад, % мас., Al – основа							
		Si	Cu	Fe	Mn	Co	Cr	V	Mo
Базовий	1	2,65	0,58	0,08	-	-	-	-	-
	2	1,95	54,98	1,82	0,55	-	-	-	-
	3	20,88	1,13	22,77	6,72	-	-	-	-
	4	8,80	1,28	7,05	2,02	-	-	-	-
Модифікований	1a	1,05	1,7	0,24	-	-	-	-	0,10
	2б	8,08	2,75	17,06	6,62	0,93	2,58	1,48	2,65
	3в	0,94	48,53	0,03	0,01	-	0,03	-	-

Детально проаналізуємо хімічний склад кожного зразка, наведеного у таблиці 1, для більш глибокого розуміння утворених структурних складових.

Точка 1. У структурі литого силуміну виявлено наявність твердого розчину на основі алюмінію. У структурі за рахунок модифікування також присутні стабільні інтерметаліди, які є центрами кристалізації й тим самим подрібнюють α -Al, надаючи гілкам дендритів більш округлу конфігурацію. У результаті цього відбувається зменшення міждендритних відстаней та подрібнюється складна евтектика та вторинні інтерметалідні фази.

Точка 2. У точці 2 перебувають елементи: Al та Cu. Ці фази мають вигляд компактних утворювань округленої форми, які дещо витягнуті у напрямку міждендритних ділянок. Розміри фази Al_2Cu становлять до 10 мкм.

Точки 3, 4 відповідають залізовмісній фазі, морфологія якої нагадує «китайські ієрогліфи». Кількість марганцю невелика, але підсиленню його впливу сприяє мідь у кількості від 1,28% мас [1, 2]. Але так як вміст заліза становить 1,53% мас. (табл. 1), то у структурі також спостерігаються голчасті залізовмісні фази β - Al_5FeSi . Розмір залізовмісних фаз становить 30 мкм (т. 3) та 25 мкм (т. 4).

При одночасному додаванні Co, Cr, V та Mo утворюється дрібнодисперсна і рівномірна мікроструктура (рис. 2). У порівнянні з базовим зразком дана мікроструктура більш виразна у наявних структурних складових, які рівномірно розподілені по об'єму зразка, однак помітно їх невелике скупчення у нижній частині.

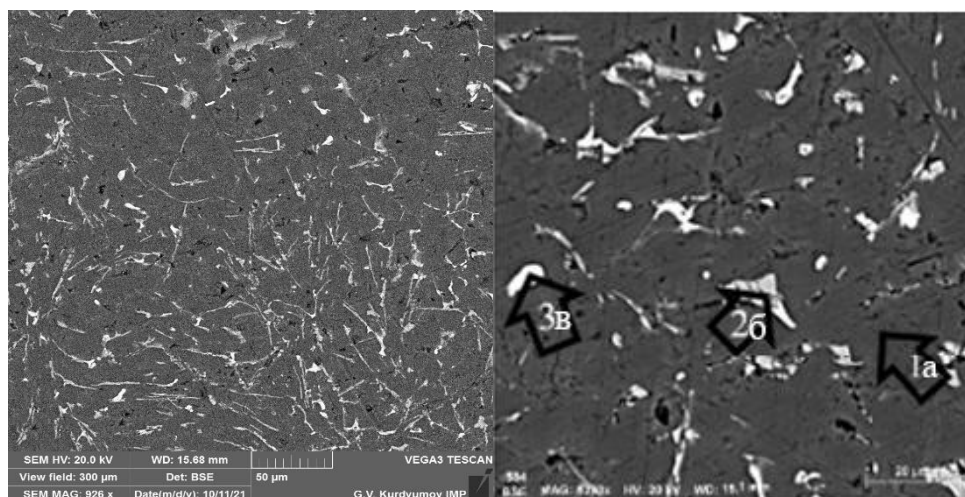


Рис. 2 – Мікроструктура дослідного сплаву $AlSi_9Cu_3(Fe)$, модифікованого Cr, Mo, V та Co

Локальний хімічний аналіз показав, що точка 1a відповідає α -Al твердому розчину, до якого ввійшов молібден у кількості до 0,1% мас., що може впливати на механічні властивості сплаву, зокрема, може покращити його міцність або стійкість до впливу високих температур. Порівнюючи з точкою 1 базового сплаву, можна зазначити, що процес модифікування призводить до утворення стійких інтерметалідів. Ці інтерметаліди виступають центрами кристалізації, що сприяє подрібненню α -Al та формуванню дендритів більш округлої форми. Це може призвести до зменшення міждендритних відстаней осей 2-го порядку та подрібнення складної евтектики й вторинних інтерметалідів.

Точка 2b відповідає залізовмісній фазі, морфологія якої вказує на більш виражену розгалужену будову, бо містить до 17,06% мас. заліза за складом (табл. 2, т. 26). Розмір такої фази становив до 10 мкм, що говорить про суттєве подрібнення цих складових. У склад даної залізовмісної фази ввійшли усі 4 модифікуючих елементи, хром та молібден були присутні у найбільших кількостях до 3% мас. Пари елементів хром-молібден і кобальт-ванадій були виявлені у рівних кількостях. Виявлений рівноважний розподіл елементів у парах вказує на важливі взаємодії між компонентами та можливу синергію їхніх властивостей у розглянутій системі. Цей феномен можна пояснити хімічним балансом у складі залізовмісної фази. Зауважено, що пари елементів утворюються у рівних кількостях у разі подібних масових відношень цих елементів у фазі.

Зокрема, більша кількість хрому та молібдену свідчить про їхнє більш ефективне модифікування, що сприяє їхньому більш інтенсивному впливу на залізовмісну фазу.

Модифікування з додаванням хрому, молібдену, кобальту та ванадію призвело до кращого розподілу фаз, зменшуючи їх розміри та покращуючи механічні властивості.

До евтектики Al_2Cu з розміром до 10 мкм (табл. 2, т. 3в) ввійшов хром у кількості 0,03% мас. Фаза Al_2Cu у базовому сплаві не мала чіткої виразної округлої форми, як у модифікованому сплаві, що зменшує можливість концентрації напружень. Модифікований сплав має ще більш розгалужені фази з меншими розмірами, що підвищує міцність та зменшує крихкість. Це можна пояснити наявністю хрому, який ввійшов до її складу. Хром, будучи перехідним металом, може займати частину місць міді. Також хром може впливати на розподіл фаз у сплаві, сприяючи більш однорідному розподілу фаз і покращуючи механічні властивості.

Висновки

Проаналізовано особливості ефектів додавання елементів Mo, V, Cr, Co, у ливарний алюмінієвий сплав системи Al-Si-Cu.

Встановлено, що сумісне додавання одразу усіх чотирьох модифікаторів сприяло зв'язанню заліза у сприятливі за морфологією фази та подрібненню структурних складових, утворюючи дрібнодисперсну та рівнорозподілену структуру.

Модифікатори Mo, V, Cr та Co дещо посилюють вплив дії марганцю шляхом залучення більшої кількості цього елемента до залізовмісних фаз, що може позитивно впливати на механічні характеристики. Усі чотири елемента ввійшли до складу залізовмісних фаз.

Отримані результати можуть бути використані для розробки нових технологій виготовлення ливарних алюмінієвих сплавів з підвищеним вмістом заліза до 1,5% мас., що матимуть покращені експлуатаційні характеристики. Це, у свою чергу, дозволить розширити сферу застосування таких сплавів у різних галузях промисловості, включаючи автомобілебудування, авіацію та будівництво. Подальші дослідження у цьому напрямі передбачають оптимізацію складу сплавів та режимів термічної обробки для досягнення максимальних показників міцності та довговічності.

Перелік використаних джерел:

1. A formation map of iron-containing intermetallic phases in recycled cast aluminum alloys / Cinkling E., Rsdgeway C.D., Yan X., Luo A.A. *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*. 2019. Vol. 50. Pp. 5945-5956. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05469-6>.
2. Kasińska J., Bolibruchová D., Matejka M. The influence of remelting on the properties of AlSi9Cu3 Alloy with higher iron content. *Materials*. 2020. Vol. 13. Pp. 575-567. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma13030575>.
3. Alshmiri F. Lightweight material: aluminium high silicon alloys in the automotive industry. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 774-776. Pp. 1271-1276. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1271>.
4. Mondolfo L. F. Aluminium alloys. Structure and properties. Butterworth, 1976. 640 p.
5. Belov N. A., Aksenov A. A., Eskin D. G. Iron in aluminium alloys: impurity and alloying element. 1st ed. CRC Press, 2002. 360 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781482265019>.
6. Fundamentals of aluminium metallurgy / ed. by Roger N. Lumley. 1st ed. Woodhead Publishing, 2011. 862 p.
7. Фон Прусс М. А. Способы та методы зміни морфології залізовмісних фаз у силумінах. *Прогресу лиття*. 2020. № 1(139). С. 30-41. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2020.01.030>.

References:

1. E. Cinkling, C.D. Rsdgeway, X. Yan, and A.A. Luo, «A formation map of iron-containing intermetallic phases in recycled cast aluminum alloys», *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, vol. 50, pp. 5945-5956, 2019. doi: 10.1007/s11661-019-05469-6.
2. J. Kasińska, D. Bolibruchová, and M. Matejka, «The influence of remelting on the properties of AlSi9Cu3 Alloy with higher iron content», *Materials*, vol. 13, pp. 575-567, 2020. doi: 10.3390/ma13030575.

3. F. Alshmri, «Lightweight material: aluminium high silicon alloys in the automotive», *Advanced Materials Research*, vols. 774-776, pp. 1271-1276, 2013. doi: [10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1271](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.774-776.1271).
4. L.F. Mondolfo, *Aluminium alloys. Structure and properties*. Butterworth, 1976.
5. N.A. Belov, A.A. Aksenov, and D.G. Eskin, *Iron in aluminium alloys: impurity and alloying element*, 1st ed. CRC Press, 2002. doi: <https://doi.org/10.1201/9781482265019>.
6. *Fundamentals of aluminium metallurgy*, Roger N. Lumley, Ed., 1st ed. Woodhead Publishing, 2011.
7. M.A. Fon Pruss, «Sposoby ta metody zminy morfolohii zalizovmisnykh faz u syluminakh» [«Ways and methods of changing the morphology of iron-containing phases in silumins»], *Protsesy lyttia – Casting processes*, № 1(139), pp. 30-41, 2020. doi: [10.15407/plit2020.01.030](https://doi.org/10.15407/plit2020.01.030). (Ukr.)

Стаття надійшла 07.05.2024

Стаття прийнята 28.05.2024

УДК 671.774.35

doi: [10.31498/2225-6733.48.2024.310682](https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310682)

© Григоренко В.У.¹, Алексєєнко С.В.², Головченко О.П.³

РОЗВИТОК МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПЛАНУЄМОЇ ПОПЕРЕЧНОЇ РІЗНОСТІННОСТІ ХОЛОДНОКАТАНИХ ТРУБ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРИ РІЗНИХ ВАРІАНТАХ ВИКОНАННЯ ПОДАЧІ ТА ПОВОРОТУ

В останні роки в Україні почали застосовувати стани холодної прокатки труб, де можна виконувати різні режими подачі та повороту труби. Постановка проблеми. Потрібен метод, що дає можливість планувати при цьому поперечну різностінність труб. Ціль. Розробка методу визначення плануємої різностінності для проектування технології виробництва з забезпеченням регламентованої підвищеної якості труб по їх геометрії. Методика. Отримання експериментальних результатів з впливу режимів виконання подачі та повороту при холодній прокатці на поперечну різностінність труб. Режим 1 – подачу виконують перед прямим ходом, а поворот перед зворотним ходом кліті; режим 2 – подачу виконують перед прямим ходом, а поворот перед прямим та зворотним ходом кліті; режим 3 – подачу виконують у передньому і задньому положенні кліті, а поворот у задньому положенні; режим 4 – подачу та поворот виконують перед прямим та зворотним ходом кліті). Результати. З випробуваних режимів найбільш ефективним (з погляду виправлення поперечної різностінності труб заготовок, є режим 2 та режим 4. Наукова новизна. Вперше отримані додаткові експериментальні дані по величині поперечної різностінності труб при веденні процесу холодної прокатки труб з різними режимами виконання подачі і повороту перед прямим і зворотним ходом кліті. Показано, що ведення процесу холодної прокатки труб з подачею перед прямим і поворотом перед прямим і зворотним ходом кліті дає в 1,5 разу кращі показники по точності труб в порівнянні з подачею перед прямим ходом кліті та поворотом перед зворотним ходом кліті. Такі ж показники дає процес з подачею і поворотом перед прямим і зворотним ходом кліті. Практична значимість. Отримані результати потрібні при розробці технології з виготовлення труб з підвищеними вимогами до поперечної різностінності.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1809-2842, gvu135gvu@i.ua

² д-р техн. наук, професор, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-0320-989X

³ аспірант, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3439-205X

Ключові слова: холодна прокатка труб, подача, поворот, поперечна різностінність.

V.U. Hryhorenko, S.V. Alekseyenko, O.P. Holovchenko. Development of the method for determining the plane cross-wall diversity of cold-rolled pipes on the basis of experimental research with different options of feeding and turning. In recent years, cold pipe rolling mills have been used in Ukraine, where it is possible to perform different modes of feeding and turning the pipe. Formulation of the problem. We need a method that makes it possible to plan the cross-wall variation of the pipes. Goal. Development of a method for determining the planned diversity for the design of production technology to ensure the regulated increased quality of pipes according to their geometry. Methodology. Obtaining experimental results on the effect of feeding and turning modes during cold rolling on the cross-wall variation of pipes. Mode 1 – the feed is performed before the forward movement, and the turn before the reverse movement of the cage; mode 2 - the feed is performed before the forward movement, and the turn is performed before the forward and reverse movement of the cage; mode 3 – feeding is performed in the front and back position of the cage, and the turn is in the back position; mode 4 – feeding and rotation are performed before the forward and reverse movement of the cage). The results. Of the tested modes, mode 2 and mode 4 are the most effective (from the point of view of correcting the cross-sectional variation of the pipe blanks. Scientific novelty. First, additional experimental data were obtained on the magnitude of the cross-sectional variation of the pipes during the cold rolling process of the pipes with different modes of feeding and turning in front of the straight and It is shown that the process of cold rolling of pipes with feed in front of the direct and turning before the direct and reverse movement of the cage gives 1.5 times better indicators in terms of tube accuracy compared to feeding in front of the direct movement of the cage and turning before the reverse movement of the cage. The indicators are given by the process with forward and reverse motion of the cage. Practical significance. The obtained results are needed in the development of technologies for the production of pipes with increased requirements for transverse diversity.

Key words: cold rolling of pipes, feed, turn, transverse diversity.

Постановка проблеми. Одним з основних призначень процесу холодної прокатки труб є одержання високої точності їх геометричних параметрів (за поперечною різностінністю, розкидом середньої стінки у партії труб, овальністю труб та хвилястістю). В останні роки збільшуються об'єми поставок труб за європейськими нормами EN та американськими стандартами ASTM. Холодну пільгерну прокатку труб використовують ще й для виробництва труб з вуглецевих сталей, сплавів на основі титану, так і у виробництві труб з кольорових металів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням підвищення точності труб, що працюють під високим тиском, приділяють належну увагу [1].

Є дослідження з забезпечення якості труб регламентованими нормами та стандартам за точністю труб [2] та за мікроструктурою [3].

В Україні почали використовувати сучасні імпортовані стани холодної прокатки труб (стани КРВ-25, ХПТ 40-8, ХПТ 6-20 та ін.), де можливо виконувати різні величини і сполучення подач і повороту труби в передньому та задньому положенні кліті [4].

Питаннями підвищення точності холоднодеформованих труб займаються також і в технологіях з застосуванням станів холодної періодичної роликів прокатки труб [5].

Велику кількість холоднодеформованих труб з підвищеною точністю по поперечній різностінності та спеціального і відповідального призначення виробляють з корозійностійких сталей та з сплавів титану [6].

Було проведено ряд досліджень мікроструктур, механічних властивостей та точності [7-9] при веденні процесу холодної прокатки труб з виконанням подачі та повороту труби з подачею та поворотом у передньому та задньому положеннях кліті.

Мета статті – розвинути метод визначення поперечної різностінності труб, що потрібно для розробки технологій виробництва точних труб, на основі представлених експериментальних

результатів по величині поперечної різностінності труб при веденні процесу холодної пільгерної прокатки труб з різними варіантами виконання подачі і повороту перед прямим і зворотним ходом кліті на стані ХПТ 6-20 (режим 1 – подачу виконують перед прямим ходом, а поворот перед зворотним ходом кліті; режим 2 – подачу виконують перед прямим ходом, а поворот перед прямим та зворотним ходом кліті; режим 3 – подачу виконують у передньому і задньому положенні кліті, а поворот у задньому положенні; режим 4 – подачу та поворот виконують перед прямим та зворотним ходом кліті).

Виклад основного матеріалу. Проведені дослідження впливу режиму повороту труби на поперечну різностінність. Для експерименту обрано маршрут 25x2,5 - 16x1,5 (стан ХПТ 6-20, сталь 08X18H10T). Прокатку здійснювали за наступними режимами:

- 1 – подача в задньому положенні кліті та поворот у передньому;
- 2 – подача в задньому положенні кліті та поворот у передньому й задньому положенні кліті;
- 3 – подача в передньому й задньому положенні кліті та поворот у передньому;
- 4 – подача в передньому й задньому положенні кліті та поворот у передньому й задньому положенні кліті.

При проведенні експерименту по кожному з режимів було прокатано по відрізьку труби довжиною близько метра із труби – заготовки рівної різностінності з різними подачами, отриманні дані представлені у таблиці 1.

Величини подачі склали: режим 1 і режим 2 – $m = 2, 3, 4$ і 5 міліметрів; режим 3 і режим 4 – $m = 2+2, 2,5+2,5, 3+3, 3,5+3,5$, міліметра.

Таблиця 1

Експериментальні дані з абсолютної і відносної поперечної різностінності труб при веденні процесу ХПТ (стан ХПТ 6-20, сталь 08X18H10T)

Режим	Подача мм	Smax	Smin	Scp	Товщина стінки в крапках поперечного переріза, мм				Різностінність	
					S1	S2	S3	S4	мм	%
1	2	1,63	1,59	1,61	1,61	1,61	1,62	1,62	0,04	2,48
	3	1,67	1,63	1,64	1,64	1,67	1,66	1,63	0,04	2,56
	4	1,67	1,61	1,64	1,67	1,64	1,65	1,64	0,06	3,66
	5	1,7	1,65	1,67	1,66	1,66	1,67	1,65	0,05	3,01
2	2	1,64	1,61	1,62	1,63	1,62	1,62	1,61	0,03	1,85
	3	1,65	1,62	1,64	1,64	1,62	1,63	1,62	0,03	1,84
	4	1,64	1,60	1,62	1,61	1,6	1,62	1,64	0,04	2,47
	5	1,64	1,60	1,62	1,62	1,64	1,63	1,62	0,04	2,47
3	2+2	1,65	1,61	1,63	1,64	1,65	1,62	1,61	0,04	2,45
	2,5+2,5	1,65	1,61	1,63	1,61	1,63	1,64	1,64	0,04	2,46
	3+3	1,65	1,60	1,63	1,64	1,63	1,64	1,65	0,05	3,07
	3,5+3,5	1,65	1,60	1,62	1,61	1,61	1,62	1,65	0,05	3,08
4	2+2	1,65	1,63	1,64	1,65	1,64	1,64	1,63	0,02	1,22
	2,5+2,5	1,65	1,61	1,63	1,65	1,65	1,63	1,61	0,05	2,45
	3+3	1,66	1,62	1,64	1,64	1,66	1,62	1,64	0,04	2,44
	3,5+3,5	1,65	1,61	1,63	1,63	1,64	1,63	1,63	0,04	2,45

При подачі в задньому положенні кліті й повороті в передньому (таблиця 1, рис 1, режим 1) величина відносної різностінності склала з 2,48% до 3,66%.

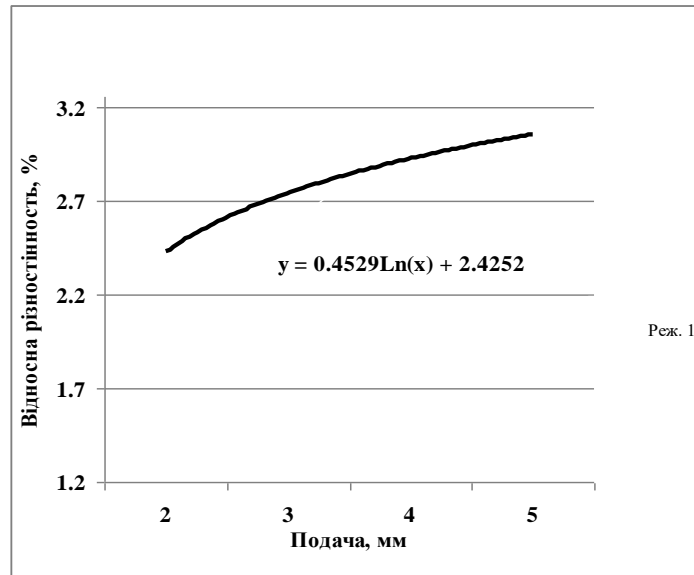


Рис. 1 – Відносна різностінність труб, прокатаних з подачею в задньому положенні кліті + поворот у передньому (25x2,5-16x1,5, стан ХПТ 6-20, сталь 08X18Н10Т)

При подачі в задньому положенні кліті й повороті у передньому й задньому положенні кліті (таблиця 1, рис. 2, режим 2) коливання товщин стінки стали менші (при подачі 2 мм відносна різностінність була 1,85%, а при подачі 5 мм – 2,47%).

З подвійною подачею в передньому й задньому положенні кліті і поворотом у передньому положенні кліті (таблиця 1, рис. 3, режим 3) коливання відносної різностінності були від 2.45% до 3.48%.

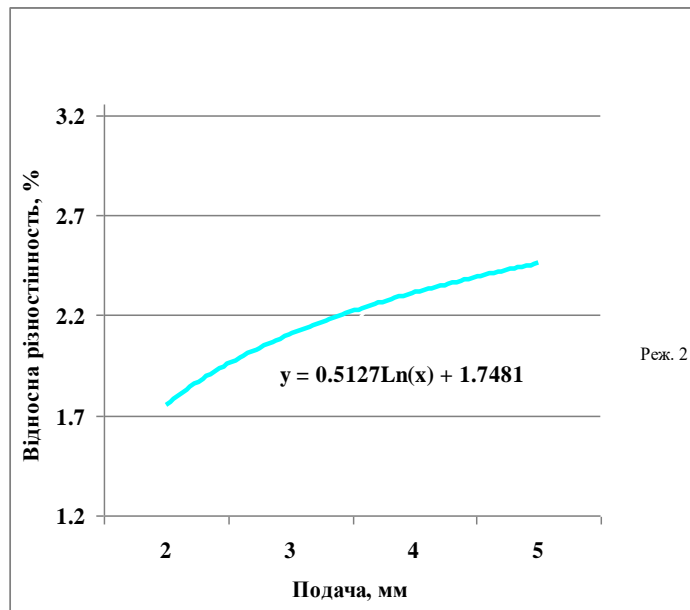


Рис. 2 – Відносна різностінність труб, прокатаних з подачею в задньому положенні кліті + поворот у передньому й задньому положенні кліті (25x2,5-16x1,5, стан ХПТ 6-20, сталь 08X18Н10Т)

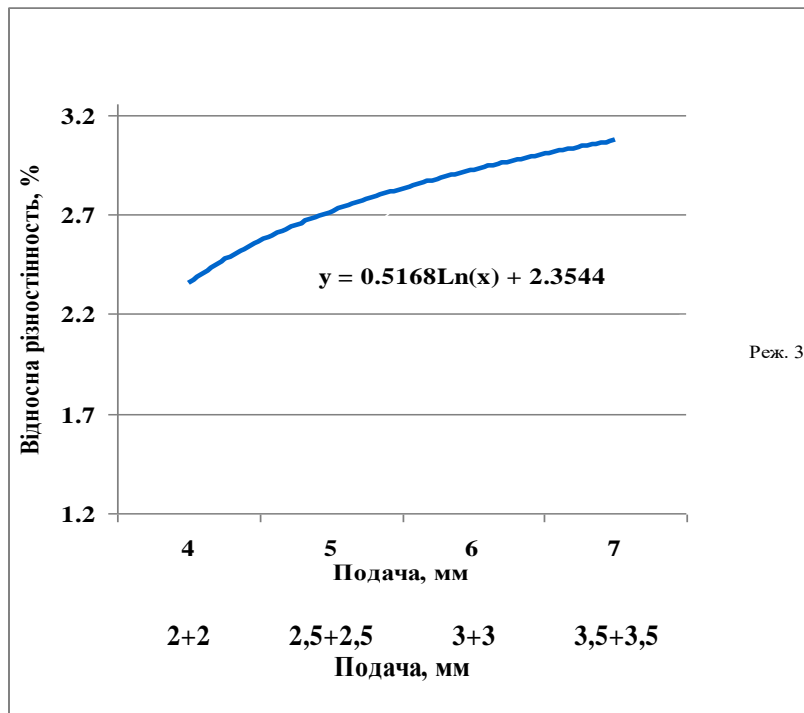


Рис. 3 – Відносна різностінність труб, прокатаних з подачею в передньому й задньому положенні кліті + поворот у передньому положенні кліті (25x2,5-16x1,5, стан ХПТ 6-20, сталь 08X18Н10Т)

Для процесу прокатки з подачею й поворотом у передньому й задньому положенні кліті (режим 4, рис. 4) рівень різностінності приблизно дорівнює режиму 2.

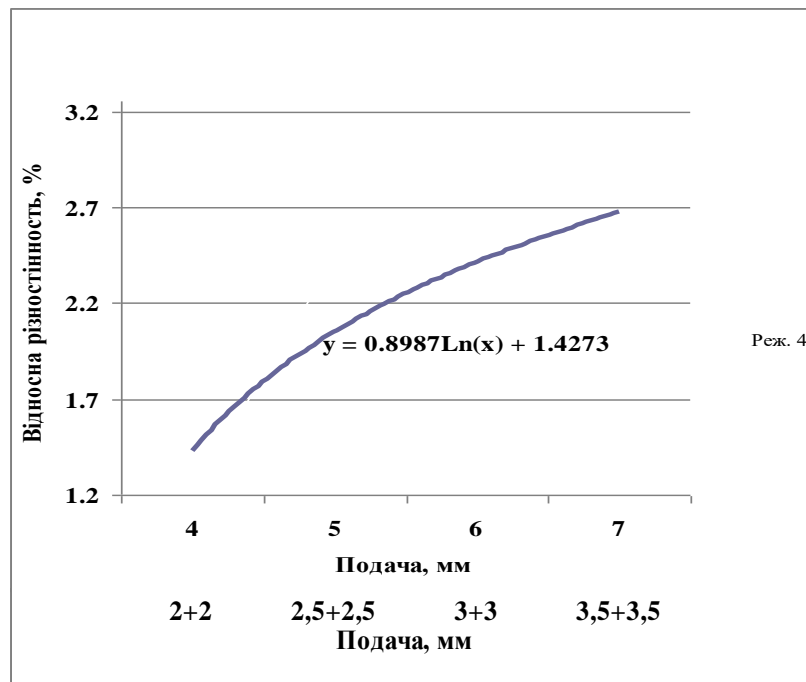


Рис. 4 – Відносна різностінність труб, прокатаних з подачею в передньому й задньому положенні кліті + поворот у передньому й задньому положенні кліті (25x2,5-16x1,5, стан ХПТ 6-20, сталь 08X18Н10Т)

Порівнюючи величини поперечної різностінності труб, отриманих при прокатці з одинарними й подвійними подачами, відповідно, при подачі в задньому й при повороті в передньому положеннях кліті (рис. 1) та при подачі в передньому й задньому положенні кліті й поворот у передньому й задньому положенні кліті (рис. 4), можна зробити висновок, що в процесі прокатки з подвійною подачею й поворотом навіть при подвійній подачі поперечна різностінність була менше, ніж при режимі прокатки з одинарною подачею в передньому положенні кліті й поворотом у задньому положенні кліті.

Наведені результати промислового експерименту по визначенню поперечної різностінності труб по чотирьом вищеназваним схемам ведення процесу холодної прокатки труб показали, що з випробуваних схем найбільш прийнятною з погляду виправлення поперечної різностінності є схема з подачею в передньому й задньому положенні кліті й поворотом у передньому й задньому положенні кліті.

Отримані експериментальні промислові результати з впливу режиму виконання подачі та повороту на поперечну різностінність труб є основою розвинутого методу з визначення планованої різностінності труб.

На основі результатів, представлених на рисунках 1-4 у вигляді значень поперечної різностінності чи у вигляді формул, що враховують величину подачі, можливо визначити плановану поперечну різностінність з урахуванням величин подачі та вибрати необхідний режим виконання подачі і повороту для забезпечення регламентованих значень поперечної різностінності.

Висновки

Вперше отримані додаткові експериментальні дані по величині поперечної різностінності труб при веденні процесу холодної пільгерної прокатки труб з різними варіантами виконання подачі і повороту перед прямим і зворотним ходом кліті на стані ХПТ 6-20 (подача в задньому положенні кліті та поворот в передньому положенні кліті; подача в задньому положенні кліті та поворот в передньому і задньому положенні кліті; подача в передньому і задньому положенні кліті та поворот в передньому і задньому положенні кліті; подача в передньому і задньому положенні кліті та поворот в передньому і задньому положенні кліті.).

Показано, що ведення процесу ХПТ з подачею перед прямим і поворотом перед прямим і зворотним ходом кліті дає в 1,5 разу кращі показники по точності труб в порівнянні з подачею перед прямим ходом кліті та поворот перед зворотним ходом кліті. Такі ж показники дає процес з подачею і поворотом перед прямим і зворотним ходом кліті.

Перелік використаних джерел:

1. Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems / S. McNair et al. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Vol. 118(3-4). Pp.667-681. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07982-8>.
2. Мищенко А. В., Григоренко В. У. Експериментальне дослідження характеру перетинної різностінності при холодній пільгерній прокатці труб з сплаву титану ПТ1М. *Modern engineering and innovative technologies*. 2021. № 15. Part 2. Pp. 20-24. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2021-1>.
3. Deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3Al-2.5V alloy / Pilipenko V., Grigorenko V., Kozechko V., Bohdanov O. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. Vol. 1. Pp. 078-083. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-1/078>.
4. Григоренко В. У., Пилипенко С. В., Головченко О. П. Розвиток методу розрахунку параметрів процесу холодної пільгерної прокатки труб і калібровки інструмента: монографія. Дніпропетровськ : Пороги, 2010. 120 с.
5. Міщенко О. В., Пилипенко С. В., Григоренко В. У. Дослідження зміни різностінності при прокатці тонкостінних труб на станах ХПТР. *Системні технології*. 2010. № 5(70). С. 37-46.
6. Міщенко О. В. Вплив хімічного складу титанових сплавів на межу міцності холоднокатаних труб. *Метал та лиття України*. 2020. Том 28. № 2. С. 41-49.
7. Головченко О.П., Григоренко В.У. Дослідження впливу на поперечну різностінність труб процесу холодної пільгерної прокатки з подвійною подачею та поворотом на сучасних

станах. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2022. Вип. 71. С. 186-193. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.186>.

8. Holovchenko O., Grigorenko V., Protsiv V. (2023). Microstructures and mechanical properties of cold rolled pipes with increased small deformation. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 3. Pp. 054-059. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-3/054>.
9. Головченко О. П. Дослідження впливу режиму повороту труб в процесі холодної прокатки на мікроструктуру, механічні властивості та точності. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2023. Вип. 75. С. 127-135. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/75.127>.

References:

1. S. McNair et al., «Manufacturing technologies and joining methods of metallic thin-walled pipes for use in high pressure cooling systems», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 118(3-4), pp. 667-681, 2022. doi: **10.1007/s00170-021-07982-8**.
2. O. Mishchenko, and V. Grygorenko, «Eksperymentalne doslidzhennia kharakteru peretynnoi riznostnosti pry kholodnii pilhernii prokattsi trub z splavu tytanu PT1M» [«Experimental research of the nature of transverse wall thickness variation in cold rolling of pipes of titanium alloy PT-1M»], *Modern engineering and innovative technologies*, № 15, part 2, pp. 20-24, 2021. doi: **10.30890/2567-5273.2021-1**. (Ukr.)
3. V. Pilipenko, V. Grigorenko, V. Kozechko, and O. Bohdanov, «Deformation mode in a cold rolling condition to provide the necessary texture of the Ti-3AL-2.5V alloy», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 1. pp. 078-083, 2021. doi: **10.33271/nvngu/2021-1/078**.
4. V.U. Hryhorenko, S.V. Pylypenko, and O.P. Holovchenko, *Rozvytok metodu rozrakhunku parametriv protsesu kholodnoi pilhernoї prokatky trub i kalibrovky instrumenta: monohrafiia* [Development of the method of calculating parameters of the process of cold mill rolling of pipes and calibration of the tool: monograph]. Dnipropetrovsk, Ukraine: Porohy Publ., 2010. (Ukr.)
5. O.V. Mishchenko, S.V. Pylypenko, and V.U. Hryhorenko, «Doslidzhennia zminy riznostnosti pry prokattsi tonkostinnykh trub na stanakh KhPTR» [«Study of the change in wall thickness during rolling of thin-walled pipes on KPTR mills»], *Systemni tekhnolohii – System technologies*, № 5(70), pp. 37-46, 2010. (Ukr.)
6. O.V. Mishchenko, «Vplyv khimichnoho skladu tytanovykh splaviv na mezhu mitsnosti kholodnokatanykh trub» [«Influence of the chemical composition of titanium alloys to the ultimate strength of coldrolled pipes»], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, № 3-4(322-323), pp. 41-49, 2020. (Ukr.)
7. O. Holovchenko, and V. Hrigorenko, «Doslidzhennia vplyvu na poperechnu riznostnist trub protsesu kholodnoi pilhernoї prokatky z podviinoiu podacheiu ta povorotom na suchasnykh stanakh» [«Investigation of the influence on the cross-wall difference of tubes of the double-feed and return cold pillar rolling process at the present conditions»], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu – Collection of scientific works of the National Mining University*, vol. 71, pp. 186-193, 2022. doi: **10.33271/crpnmu/71.186**.
8. O. Holovchenko, V. Grigorenko, and V. Protsiv, «Microstructures and mechanical properties of cold rolled pipes with increased small deformation», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 3, pp. 054-059, 2023. doi: **10.33271/nvngu/2023-3/054**.
9. O. Holovchenko, «Дослідження впливу режиму повороту труб в процесі холодної прокатки на мікроструктуру, механічні властивості та точності» [«Study of the influence of the mode of rotation of pipe in the cold rolling process on the microstructure, mechanical properties and accuracy»], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu – Collection of scientific works of the National Mining University*, vol. 75, pp. 127-135, 2023. doi: **10.33271/crpnmu/75.127**.

Стаття надійшла 13.02.2024

Стаття прийнята 02.04.2024

**ЯВИЩЕ ТЕРМОДИФУЗІЇ В РІДКИХ І ТВЕРДИХ МЕТАЛАХ
У РОБОТАХ О. М. СКРЕБЦОВА**

У 2024 році відзначається 100-річний ювілей ученого зі світовим ім'ям, нашого земляка, професора Олександра Михайловича Скребцова. Крім досліджень застосування радіоактивних ізотопів у металургії, розвитку теорії рідкого стану металевих розплавів значну увагу він приділив явищу термодифузії в рідких і твердих металах. Цю роботу присвячено аналізу цієї частини наукової спадщини О. М. Скребцова. Рух атомів під дією градієнта температури (термодифузія) відбувається під час різних природних явищ і в багатьох технологічних процесах. Однак при вивченні рушійних сил і механізмів термодифузії, до тепер, як правило, переважав академічний підхід. Це дозволило досить добре розвинути теорію термодифузії стосовно газів, розчинів солей і твердих металів. Ця стаття присвячена аналізу досліджень, спрямованих на можливість практичного використання цього явища для підвищення ресурсу деталей, що працюють в умовах температурного градієнта, та оптимізації процесів, що протікають з градієнтом температури. Такі процеси відбуваються в металургійних агрегатах, супроводжують біметалеве лиття, зварювання, наплавлення тощо. На основі аналізу наявних у літературі експериментальних даних описано встановлений зв'язок між теплою термодифузії та співвідношенням атомних радіусів елементів, що дифундують, R_d , і основного металу R_b . Показано принципову можливість використання термодифузії для керування процесами десульфурзації рідкого чавуну та створення захисних покриттів на деталях із сірого чавуну під час їх експлуатації при високих температурах.

Ключові слова: градієнт концентрації, градієнт температури, термодифузія, тепловий ефект термодифузії, температура.

L. Dan, L. Trofimova. The phenomenon of thermodiffusion in liquid and solid metals in the works of O. M. Skrebtsov. The year 2024 marks the 100th anniversary of a world-renowned scientist, our countryman, Professor Olexandr Mikhailovich Skrebtsov. In addition to research on the use of radioactive isotopes in metallurgy and the development of the theory of the liquid state of metal melts, he paid considerable attention to the phenomenon of thermodiffusion in liquid and solid metals. This paper is devoted to the analysis of this part of the scientific heritage of O. M. Skrebtsov. The movement of atoms under the action of a temperature gradient (thermodiffusion) occurs during various natural phenomena and in many technological processes. However, when studying the driving forces and mechanisms of thermodiffusion, as a rule, the academic approach prevailed. This allowed the theory of thermodiffusion to be well enough developed concerning gases, salt solutions, and solid metals. This article is focused on the analysis of research aimed at the possibility of practical use of this phenomenon to improve the service life of parts operating under conditions of a temperature gradient and optimize processes occurring with a temperature gradient. Such processes occur in metallurgical units, accompanying bimetallic casting, welding, surfacing, etc. Based on the analysis of the experimental data available in the literature, a relationship between the heat of thermodiffusion and the ratio of the atomic radii of the diffusing elements, R_d , and the base metal, R_b , was found. The fundamental possibility of using thermodiffusion for controlling the desulfurization processes in liquid cast iron and

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0002-1954-4871, danleonid.alex@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь-Дніпро, ORCID: 0000-0003-4576-2589, trofimova.pstu@gmail.com

creating protective coatings on gray cast iron parts during their operation at high temperatures was also shown.

Key words: *concentration gradient, temperature gradient, thermodiffusion, heat of transfer for thermodiffusion, temperature.*

Постановка проблеми. Після відкриття Людвігом ефекту термодифузії в газах [1], Соре в сольових розчинах [2], а Тіндалом – явища руху дрібних твердих частинок у газі під дією градієнта температури [3] минуло вже понад 160 років. У роботі [4] наведено аналіз еволюції уявлень про це явище та його практичне використання. Якщо на початковому етапі йшлося про переміщення атомів у полі градієнта температури в рідкому і газоподібному середовищі, то згодом описуване явище було виявлено й описано в плазмі [5, 6], а також у твердих тілах на макро- і мікроскопічних рівнях [7-14]. З появою можливості здійснення експериментів у космічному просторі було проведено дослідження термодифузії в умовах зниженої гравітації [15, 16]. Результати протікання дифузійного поділу елементів були виявлені під час протікання геологічних процесів [17].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Крім суто наукового інтересу, явище термодифузії має і практичне значення. Воно вже давно широко використовується для розділення ізотопів [18], паяння, зварювання і поверхневого зміцнення металів, при отриманні біметалевих виливків [19-21]. Крім того, в роботах [22, 23] показано роль термодифузії в процесах кристалізації рідких металів.

При цьому звертається увага на те, що під час металургійних процесів у плавильних агрегатах, у ливарному виробництві, при роботі металургійного та енергетичного обладнання, двигунів внутрішнього згоряння виникають значні температурні градієнти – змінні, що змінюються в часі за певними законами, або постійні протягом тривалого часу. За таких умов термодифузія елементів може суттєво впливати на перебіг процесів і структурних перетворень, більшою чи меншою мірою впливаючи на працездатність деталей.

Тому аналіз цього явища стосовно описаного переліку процесів і деталей становить значний інтерес.

Мета статті – аналіз можливостей застосування законів термодифузії до опису металургійних та суміжних процесів.

Виклад основного матеріалу.

Термодифузія у твердому чавуні. Для повного опису термодифузії в бінарній системі прийнято розглядати чотири потоки: а) атомів розчинника; б) розчиненої речовини; в) вакансій; г) енергії (тепла) [8, 23]. На практиці, однак, розрахунки зазвичай обмежуються більш простим випадком двох потоків – розчиненої речовини (j) і тепла (q). На думку авторів [24], таке спрощення справедливе для бінарних розчинів.

Якщо спочатку вважати, що вміст домішок у всіх точках зразка однаковий ($\text{grad}C = 0$), то під дією градієнта температури виникає потік речовини (j_i). Це призводить до виникнення градієнта концентрації і зустрічного дифузійного потоку, який збільшується до тих пір, поки не врівноважить термодифузійний рух атомів. В результаті встановлюється стаціонарний стан, коли повне переміщення речовини відсутнє (тепловий потік зберігається). Наприклад, для розведеного розчину в [7, 25] показано наступне:

$$\frac{dC}{dX} = -\left(\frac{C \cdot Q^*}{R \cdot T^2}\right) \cdot \frac{dT}{dX}, \quad (1)$$

де:

$\frac{dC}{dX}$ і $\frac{dT}{dX}$ – відповідно, градієнт концентрації та температури;

C – концентрація дифундуючої речовини, молярні долі;

R – універсальна газова константа, кДж/моль·град;

T – температура, К;

Q^* – теплота переносу термодифузії, кДж/моль.

Автори [7, 25] характеризують величину Q^* як відношення теплового потоку до потоку речовини за відсутності градієнта температури:

$$Q^* = \left(\frac{q}{j}\right)_{\text{grad}T=0}.$$

Коли $Q^* > 0$, концентрація зростає на холодному кінці, а коли $Q^* < 0$ – на гарячому.

У більш складних задачах з багатьма потоками, наприклад, пов'язаних з термодифузією елементів в промислових сталях і чавунах, аналітичне визначення теплоти термодифузії є складним.

Термодифузію елементів у сірому чавуні експериментально досліджували в роботі [26]. Зразки довжиною 150 мм вирізали з конструктивних частин термічної печі після 1 року її експлуатації. Під час експлуатації гаряча частина зразків перебувала при температурі 800-850°C, а холодна – при температурі 150-200°C. Тривалий період витримки металу за таких умов дозволив стверджувати про настання стаціонарного стану. Отримані дані про перерозподіл C, Si, Mn, S і P лягли в основу розрахунку величин теплоти перенесення під час термодифузії цих елементів.

Для розрахунку значення Q^* цих елементів у чавуні за методикою [7, 25] рівняння (1) було перетворено наступним чином:

$$\frac{Q^*}{R} = \frac{d \ln C}{d\left(\frac{1}{T}\right)} \approx \frac{\Delta \ln C}{\Delta\left(\frac{1}{T}\right)}. \quad (2)$$

При розрахунку значень Q^* автори [26] припустили лінійний розподіл температури по довжині деталей під час експлуатації і побудували залежність величини $\ln C$ від $1/T$. Тангенс кута нахилу лінії, як впливає з рівняння (2), дорівнює величині Q^*/R .

За експериментальними даними, використовуючи значення тангенса кута нахилу прямих до осей координат, автори [26] розраховували значення Q^* для різних елементів. Виявилось, що для C, Si, Mn, S і P залежність $\ln C - 1/T$ лінеаризується у вигляді трьох відрізків, що відповідають ділянкам зразка довжиною ~50 мм на гарячому, холодному кінцях і в його середній частині. Таким чином, значення Q^* виявилось різним для всіх досліджуваних елементів для різних температур [26, 27]. Привертає увагу той факт, що на відміну від концентраційної дифузії з підвищенням температури абсолютне значення теплоти термодифузії для C, Si, Mn і P зменшується (рисунок). Для S виявлено протилежну залежність (рисунок).

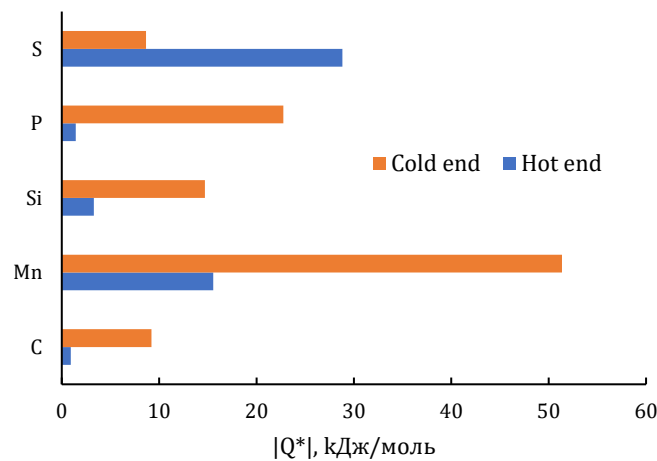


Рисунок – Абсолютне значення теплоти термодифузії на гарячому (Hot) та холодному (Cold) кінцях зразків, на основі [26]

Результати термодифузійних теплових розрахунків різних елементів і велику кількість літературних даних автори [26, 28] пов'язують зі співвідношенням атомних радіусів елементів, що дифундують, R_d , і основного металу, R_b . Було виявлено, що при наближенні R_d/R_b до 1 значення $|Q^*|$ різко зростає. Це, на думку авторів [26], свідчить на користь вакансійного механізму термодифузії, підтвердженого також Шьюмоном [7].

Аналіз закономірностей руху атомів у твердих металах в полі температурного градієнта дозволив розробити принципово новий підхід до підвищення експлуатаційної стійкості деталей, що працюють в умовах нерівномірного нагріву. Ідея полягала в насиченні робочих поверхонь деякими елементами в процесі експлуатації [27-29]. На основі лабораторних досліджень та розрахунків величини Q^* було запропоновано перелік матеріалів, компоненти яких концентруються на робочій поверхні та запобігають її окисленню.

За результатами експериментів автори [28] намагалися знайти залежність інтенсивності зниження твердості чавуну на гарячому кінці зразків внаслідок окиснення від сумарної електро-негативності сумішей, що контактували з ним під час експерименту. Всупереч припущенням авторів [28], на нашу думку, виходячи з представлених даних, такої залежності не виявлено.

Термодифузія в рідкому чавуні. Дослідженням термодифузії в рідких металах присвячено відносно невелику кількість публікацій [30-32].

О.М. Скребцов та ін. [32] на прикладі роботи доменної печі показали, що явище термодифузії активно проявляється в рідкому чавуні. Вони обробили результати унікального експерименту.

Як відомо, при виплавці чавуну в доменній печі розплав накопичується в її нижній частині (горні) [33]. Він поступово вимиває вогнетриви, утворює конусоподібну порожнину і заповнює її.

На Магнітогорському металургійному комбінаті одна з доменних печей працювала близько 13 років без значного капітального ремонту [33]. Після цього, під час капітального ремонту, з поглиблення в горні було випущено ~800 т рідкого чавуну і ~30 т шлаку. Глибина рідкого розплаву становила 3,55 м. Тим не менш, авторам [32] вдалося виміряти температуру, відібрати зразки металу і виконати їх хімічний аналіз на вміст елементів (Si, Mn, C, S, P) на 20 рівнях розплаву (відстань між сусідніми рівнями становила 0,18 м). Температура у верхньому шарі чавуну до ремонту печі становила 1360°C, а на глибині 2,85 м – 1160°C. Отже, температурний градієнт становив ~70 град/м.

Автори [33] припустили, що протягом 13 років у всьому об'ємі рідкого чавуну встановився стаціонарний рівноважний розподіл концентрацій елементів і температур за рахунок дифузії і термодифузії. Теплова ізоляція була ідеальною. Її забезпечував товстий шар вогнетривів. «Досить чітка закономірність зміни складу чавуну по висоті горна свідчила про відсутність конвекції» [33].

Для знаходження теплоти термодифузії елементів, що містяться в рідкому чавуні, відповідно до методики [7, 25] автори [13, 32] побудували залежність між логарифмами концентрації ($\ln C$) і зворотної температури ($1/T$). Розраховані точки добре лягли на прями, обробка яких дала наступні результати (таблиця).

Таблиця

Теплота термодифузії різних елементів у рідкому чавуні, на основі [32]

Елементи	C	Si	Mn	S	P
Q*, кДж/моль	-6,2	-64,6	-53,5	+74,2	-7,9

Згідно з експериментальними даними [32] та розрахованими значеннями теплоти термодифузії (таблиця), видно, що в рідкому чавуні сірка перемістилася на більш холодну сторону, а решта елементів – на більш гарячу.

Порівняння отриманих результатів з результатами робіт [26, 27, 32, 34] показує, що виявлена закономірність має універсальний характер. Термодифузія елементів у рідкому залізі протікає за тими самими закономірностями, що й у твердому.

Крім того, висновок про аномальну поведінку сірки під час термодифузії може бути використаний при описі існуючих і створенні нових процесів десульфурзації металів.

Іншим прикладом термодифузії в рідкому металі є виробництво біметалевих виливків шляхом заливання розплаву на попередньо нагріту тверду заготовку [20, 21, 35, 36]. Градієнт температури, що виникає під час заливки та кристалізації, спричиняє термодифузію елементів.

Автори [20, 21] досліджували вміст різних елементів чавуну на різних відстанях від межі сплавлення в металі-основі та залитому металі. Вони показали, що перерозподіл хімічних елементів за рахунок термодифузії має суттєве значення для формування структури перехідної зони та її властивостей. Аналіз отриманих закономірностей показує, що вони не суперечать закономірностям, отриманим в інших роботах [13, 25-27, 32], і мають універсальний характер. Тому використання цих закономірностей дозволить вибрати оптимальний температурний режим технологічного процесу для отримання якісних біметалевих виливків.

Висновки

Термодифузія широко розповсюджена в природі та техніці. Аналіз публікацій показав, що існують універсальні закони, які описують це явище як у рідких, так і в твердих металах. Їх розуміння та використання дозволить:

- збільшити термін служби деталей, що працюють в умовах градієнта температур;
- підвищити якість металу, що виплавляється в металургійних агрегатах;
- оптимізувати режим виробництва біметалевих виливків.

Перелік використаних джерел:

1. Ludwig C. Diffusion Zwischen Ungleich Erwarmten Orten Gleich Zusammengesetzter Losun gen. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*. 1856. No. 65. Pp. 539.
2. Soret C. Concentrations differentes d'une dissolution dont deux parties sont a'des temperatures differentes. *Archives des sciences physiques et naturelles*. 1879. No. 2. Pp. 48.
3. Tyndall J. Scientific addresses. New Haven : C.C. Chatfield & Co, 1870. 74 p.
4. Rahman M. A., Saghir M. Z. Thermodiffusion or Soret effect: historical review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014. No. 73. Pp. 693-705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheat-masstransfer.2014.02.057>.
5. Chapman S. Thermal diffusion in ionized gases. *Proceedings of the Physical Societ*. 1958. No. 72(3). Pp. 353-362. DOI: <https://doi.org/10.1088/0370-1328/72/3/305>.
6. Ajrapetyan M. Yu., Uryupin S. A. Anomalous diffusion and thermodiffusion of light ions in a non-isothermal plasma. *Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2008. Vol. 87(12). Pp. 777-781. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0021364008120060>.
7. Shewmon P. G. Diffusion in solids. New York : McGraw-Hill Book Company, Inc., 1963. 203 p.
8. Bokstein B. S. Diffusion in metals. Springer Nature, 1978. 248 p.
9. Nowacki W. Certain problems of thermodiffusion in solids. *Archive of Applied Mechanics*. 1971. No. 26. Pp. 731-755.
10. Nowacki W. Dynamical problems of thermodiffusion in solids. *The Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*. 1974. No. 22. Part I. Pp. 55-64; Part II, pp. 205-211.
11. Nowacki W., Olesiak Z. S. Termodyfuzja w ciałach stałych. Warszawa : PWN, 1991. 289 p.
12. Olesiak Z. S. Problems of thermodiffusion of deformable solids. *Materials Science*. 1998. No. 34. Pp. 297-303. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02355619>.
13. Термодиффузия элементов в металлах, обобщение экспериментальных данных по тепловым эффектам процесса / А.М. Скребцов и др. *Процессы литья*. 2015. № 2. С. 64-69.
14. Asaro R. J., Farkas D., Kulkarni Ya. The Soret effect in diffusion in crystals. *Acta Materialia*. 2008. Vol. 56. Pp. 1243-1256. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2007.11.019>.
15. Ahadi A., Varenbergh S., Saghir M. Z. Measurement of Soret coefficients for a ternary hydrocarbon mixture in low gravity environment. *The Journal of Chemical Physics*. 2013. Vol. 138(20). Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4802984>.
16. Ahadi A., Saghir M. Z. An extensive heat transfer analysis using Mach Zehnder interferometry during thermodiffusion experiment on board the International Space Station. *Applied Thermal Engineering*. 2014. Vol. 62. Pp. 351-364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.048>.
17. Walker D., DeLong S. E. Soret separation of mid-ocean ridge basalt magma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1982. Vol. 79. Pp. 231-240. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00371514>.
18. Aleksander K. Isotope separation by thermodiffusion in liquid phase. *Advances in physical science*. 1962. Vol. 24(8). Pp. 711-748.
19. Chepak-Gizbrekht M. V. Estimation of thermodiffusion influence on formation of transition zones during brazing. *Key Engineering Materials*. 2016. Vol. 712. Pp. 379-383. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.379>.
20. Скребцов А. М., Дан Л. А., Павлюк Б. А. Формирование переходной зоны в литом биметалле на основании чугунов различных составов. *Теория и практика процессов получения биметаллических и многослойных отливок*. 1987. С. 31-35.
21. Дан Л. А. Технологический процесс восстановления шахтных межпутевых роликов переливом жидкого металла по изношенной поверхности : автореф. дис. ... канд. техн. наук :

- 05.16.04. Київ, 1988. 18 с.
22. Alexandrov D. V., Aseev D. L. Directional solidification with a two-phase zone: thermodiffusion and temperature-dependent diffusivity. *Computational Materials Science*. 2006. Vol. 37(1). Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.12.019>.
 23. Alexandrov D. V., Pinigin D. A. On the theory of dendritic growth: soret and temperature dependent diffusion effects. *Metallurgy (Metally)*. 2013. Vol. 2013. No. 2. Pp. 123-129. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029513020031>.
 24. Bokshitejn B. S., Bokshitejn S. Z., Zhuhovickij A. A. Thermodynamics and kinetics of diffusion in solids. Springer Nature, 1974. 280 p.
 25. Кузьменко П. П. Электроперенос, термоперенос и диффузия в металлах. Киев : Вища школа, 1983. 151 с.
 26. Дан Л. А., Скребцов А. М. Анализ движущих сил и механизмов термодиффузии элементов в сером чугуна. *Вестник Приазовского государственного технического университета*. 2007. Вып. 17. С. 89-92.
 27. Скребцов А. М., Дан Л. А., Вылегжанина Т. В. Изменение свойств серого чугуна после термоциклирования с градиентом температуры. *Теория и практика металлургических процессов*. Киев : Издательство УМК, 1990. С. 94-102.
 28. Термодиффузия и электроотрицательность элементов в металлах / Скребцов А. М., Терзи В. В., Качиков А. С., Дан Е. Л. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2012. Вып. 24. С. 131-135.
 29. Дан Л. А. Использование ФГМ как способ повышения разгаростойкости чугуновых и стальных отливок. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2009. № 15(1). С. 112-115.
 30. Sondermann E., Kargl F., Meyer A. In situ Measurement of Thermodiffusion in Liquid Alloys. *Physical Review Letters*. 2019. Vol. 123. 255902. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.123.255902>.
 31. Jafar-Salehi E., Eslamian M., Saghir M. Z. Effect of thermodiffusion on the fluid flow, heat transfer, and solidification of molten metal alloys. *Engineering Science and Technology*. 2016. Vol. 19(1). Pp. 511-517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.09.007>.
 32. Скребцов О. М., Терзі В. В., Проценко Д. М. Унікальний експеримент із термодифузії елементів у рідкому чавуні. *Чорна металургія*. 2015. № 58(10). С. 785-786. DOI: <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2015-10-785-786>.
 33. Lepihin L. A., Manaenko I. P. The condition of the scaffold after blowing of one of the blast furnaces of Magnitogorsk Iron and Steel Works. *Steel in translation*. 1961. No. 3. Pp. 41-48.
 34. Стародубов К. Ф., Свечников В. Н. Изложницы. Харьков, Днепропетровск : Сталь, 1932. 188 с.
 35. Wróbel T. Bimetallic layered castings alloy steel – grey cast iron. *Archives of Materials Science and Engineering*. 2011. Vol. 48(2). Pp. 118-125.
 36. Костенко Г. Д., Брик В. Б., Горский В. В. Основные закономерности диффузионного перераспределения легирующих элементов при формировании переходных слоев биметаллических отливок на основе железа. *Теория и практика процессов получения биметаллических и многослойных отливок*. Киев: Институт Проблем Литья, 1987. С. 10-15.

References:

1. C. Ludwig, «Diffusion Zwischen Ungleichen Erwärmten Orten Gleich Zusammengesetzter Losungen», *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse*, no. 65, pp. 539, 1856. (Germ.)
2. C. Soret, «Concentrations differentes d'une dissolution dont deux parties sont a des temperatures differentes», *Archives des sciences physiques et naturelles*, no. 2, pp. 48, 1879.
3. J. Tyndall, *Scientific addresses*. New Haven, USA: C.C. Chatfield & Co, 1870.
4. M.A. Rahman, and M.Z. Saghir, «Thermodiffusion or Soret effect: Historical Review», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, no. 73, pp. 693-705, 2014. doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.057](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.057).
5. S. Chapman, «Thermal Diffusion in Ionized Gases», *Proceedings of the Physical Society*, no. 72(3), pp. 353-362, 1958. doi: [10.1088/0370-1328/72/3/305](https://doi.org/10.1088/0370-1328/72/3/305).

6. M.Yu. Ajrapetyan, and S.A. Uryupin, «Anomalous diffusion and thermodiffusion of light ions in a non-isothermal plasma», *Letters to the Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 87(12), pp. 777-781, 2008. doi: **10.1134/S0021364008120060**.
7. P.G. Shewmon, *Diffusion in solids*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1963.
8. B.S. Bokshitejn, *Diffusion in metals*. Springer Nature, 1978.
9. W. Nowacki, «Certain problems of thermodiffusion in solids», *Archive of Applied Mechanics*, no. 26, pp. 731-755, 1971.
10. W. Nowacki, «Dynamical problems of thermodiffusion in solids», *The Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, no. 22, part I, pp. 55-64; part II, pp. 205-211, 1974.
11. W. Nowacki, and Z.S. Olesiak, *Termodyfuzja w ciałach stałych*. Warszawa, Poland: PWN, 1991. (Pol.)
12. Z.S. Olesiak, «Problems of thermodiffusion of deformable solids», *Materials Science*, no. 34, pp. 297-303, 1998. doi: **10.1007/BF02355619**.
13. A.M. Skrebtsov, V.V. Terzy, D.N. Protsenko, A.O. Sekachev, and A.S. Kachykov, «Termodyfuzyia elementov v metallakh, obobshchenye eksperymentalnykh dannikh po teplovim efektam protsessu» [«Thermal diffusion of elements in metals, generalization of experimental data on thermal effects of the process»], *Protsessi lytia – Casting Processes*, № 2, pp. 64-69, 2015. (Rus.)
14. R.J. Asaro, D. Farkas, and Ya. Kulkarni, «The Soret effect in diffusion in crystals», *Acta Materialia*, vol. 56, pp. 1243-1256, 2008. doi: **10.1016/j.actamat.2007.11.019**. (Rus.)
15. A. Ahadi, S. Varenbergh, M.Z. Saghir, «Measurement of Soret coefficients for a ternary hydrocarbon mixture in low gravity environment», *The Journal of Chemical Physics*, vol. 138(20), pp. 1-17, 2013. doi: **10.1063/1.4802984**.
16. A. Ahadi, and M.Z. Saghir, «An extensive heat transfer analysis using Mach Zehnder interferometry during thermodiffusion experiment on board the International Space Station», *Applied Thermal Engineering*, vol. 62, pp. 351-364, 2014. doi: **10.1016/j.applthermaleng.2013.09.048**.
17. D. Walker, and S.E. DeLong, «Soret separation of mid-ocean ridge basalt magma», *Contributions to Mineralogy and Petrology*, vol. 79, pp. 231-240, 1982. doi: **10.1007/BF00371514**.
18. K. Aleksander, «Isotope separation by thermodiffusion in liquid phase», *Advances in physical science*, vol. 24(8), pp. 711-748, 1962.
19. M.V. Chepak-Gizbrekht, «Estimation of Thermodiffusion Influence on Formation of Transition Zones during Brazing», *Key Engineering Materials*, vol. 712, pp. 379-383, 2016. doi: **10.4028/www.scientific.net/KEM.712.379**.
20. A.M. Skrebtsov, L.A. Dan, and B.A. Pavliuk, «Formyrovanye perekhodnoi zoni v lytom bymetalle na osnovany chuhunov razlychnykh sostavov» [«Formation of a transition zone in a cast bimetal based on cast irons of various compositions»], *Teoriya y praktyka protsessov polucheniya bymetallicheskykh y mnogoslainykh otlivok – Theory and practice of processes for producing bimetallic and multilayer castings*, pp. 31-35, 1987. (Rus.)
21. L.A. Dan, «Tekhnolohycheskyi protsess vosstanovleniya shakhtnykh mezhputevykh rolykov perelyvom zhydkoho metalla po yznoshennoi poverkhnosti» [«Technological process of restoration of mine inter-track rollers by pouring liquid metal over the worn surface»], PhD thesis, Kyiv, Ukraine, 1988. (Rus.)
22. D.V. Alexandrov, and D.L. Aseev, «Directional solidification with a two-phase zone: thermodiffusion and temperature-dependent diffusivity», *Computational Materials Science*, vol. 37(1), pp. 1-6, 2006. doi: **10.1016/j.commatsci.2005.12.019**.
23. D.V. Alexandrov, and D.A. Pinigin, «On the Theory of Dendritic Growth: Soret and Temperature Dependent Diffusion Effects», *Metallurgy (Metally)*, vol. 2013, no. 2, pp. 123-129, 2013. doi: **10.1134/S0036029513020031**.
24. B.S. Bokshitejn, S.Z. Bokshitejn, and A.A. Zhuhovickij, *Thermodynamics and kinetics of diffusion in solids*. Springer Nature, 1974.
25. P.P. Kuzmenko, *Elektroperenos, termoperenos y dyffuzyia v metallakh* [Electrical transfer, thermal transfer and diffusion in metals]. Kyiv, Ukraine: Vyshcha shkola Publ., 1983. (Rus.)
26. L.A. Dan, and A.M. Skrebtsov, «Analyz dvyzhushchykh syl y mekhanyzmov termodyfuzyy elementov v serom chuhune» [«Analysis of driving forces and mechanisms of thermal diffusion of elements in gray cast iron»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu – Reporter of the Priazovskiy State Technical University*, vol. 17, pp. 89-92, 2007. (Rus.)

27. A.M. Skrebtsov, L.A. Dan, and T.V. Vilezhanyina, «Yzmenenye svoystv seroho chuhuna posle termotsyklyrovaniya s hradyentom temperaturi» [«Changes in the properties of gray cast iron after thermal cycling with a temperature gradient»], *Teoriya y praktyka metallurhicheskikh protsessov – Theory and practice of metallurgical processes*, pp. 94-102, 1990. (Rus.)
28. A.M. Skrebtsov, V.V. Terzy, A.S. Kachykov, and E.L. Dan, «Termodyffuziya y elektrootrytsatelnost elementov v metallakh» [«Thermal diffusion and electronegativity of elements in metals»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu – Reporter of the Priazovskyi State Technical University*, vol. 24, pp. 131-135, 2012. (Rus.)
29. L.A. Dan, «Yspolzovanye FHM kak sposob povysheniya razgharostoikosty chuhunnikh y stalnikh otlivok» [«Using FGM as a method to improve the fire resistance of cast iron and steel castings»], *Visnyk Donbaskoi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii – Bulletin of the Donbas State Machine-Building Academy*, № 15(1), pp. 112-115, 2009. (Rus.)
30. E. Sondermann, F. Kargl, and A. Meyer, «In situ Measurement of Thermodiffusion in Liquid Alloys», *Physical Review Letters*, vol. 123, 255902, 2019. doi: **10.1103/PhysRevLett.123.255902**.
31. E. Jafar-Salehi, M. Eslamian, and M.Z. Saghri, «Effect of thermodiffusion on the fluid flow, heat transfer, and solidification of molten metal alloys», *Engineering Science and Technology*, vol. 19(1), pp. 511-517, 2016. doi: **10.1016/j.jestch.2015.09.007**.
32. O.M. Skrebtsov, V.V. Terzi, and D.M. Protsenko, «Unikalnyi eksperyment iz termodyfuzii elementiv u ridkomu chavuni» [«A unique experiment on thermal diffusion of elements in liquid cast iron»], *Chorna metalurhiia – Ferrous metallurgy*, № 58(10), pp. 785-786, 2015. doi: **10.17073/0368-0797-2015-10-785-786**. (Rus.)
33. L.A. Lepihin, and I.P. Manaenko, «The condition of the scaffold after blowing of one of the blast furnaces of Magnitogorsk Iron and Steel Works», *Steel in translation*, no. 3, pp. 41-48, 1961.
34. K.F. Starodubov, and V.N. Svechnykov, *Yzlozhnytsi [Molds]*. Kharkiv, Dnepropetrovsk, Ukraine: Stal Publ., 1932. (Rus.)
35. T. Wróbel, «Bimetallic layered castings alloy steel – grey cast iron», *Archives of Materials Science and Engineering*, vol. 48(2), pp. 118-125, 2011.
36. H.D. Kostenko, V.B. Bryk, and V.V. Horskyi, «Osnovnie zakonomernosty dyffuzyonnoho pereraspredeleniya lehyruiushchyykh elementov pry formirovaniyu perekhodnykh sloev bymetallycheskyykh otlivok na osnove zheleza» [«The main patterns of diffusion redistribution of alloying elements during the formation of transition layers of bimetallic castings based on iron»], *Teoriya y praktyka protsessov polucheniya bymetallycheskyykh y mnohosloinnykh otlivok – Theory and practice of processes for producing bimetallic and multilayer castings*, pp. 10-15, 1987. (Rus.)

Стаття надійшла 13.05.2024

Стаття прийнята 08.06.2024

УДК 621.771

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310685

© Григоренко В.У.¹, Заболотній О.М.²

СКЛАДОВІ РОЗВИТКУ МЕТОДІВ КАЛІБРУВАННЯ ВАЛКІВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШВЕЛЕРІВ НА ОСНОВІ ЗМЕНШЕННЯ НЕРІВНОМІРНОСТІ ДЕФОРМУВАННЯ

Вступ. В металургії заключним етапом виробництва є обробка металу в прокатних цехах. Основною складовою розробки технології прокатки сортових профілів є

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1809-2842, gvu135gvu@i.ua

² аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8458-176X, zabolotnii_o_m@aspirants.pstu.edu

калібрування валків. 90% сталі, що виплавляється, переробляється прокаткою. Методи калібрування прокатних валків постійно удосконалюються. Застосовують методи калібрування, в яких присутня значна нерівномірність деформування елементів профілю, що приводить до швидкого зношування валків і збільшення витрат. Постановка проблеми. Потрібно розвивати метод калібрування валків у виробництві швелерів на основі зниження нерівномірності деформування. Мета. Ціллю статті є аналіз методів калібрування валків для виробництва швелерів з зазначенням їх переваг та недоліків та обґрунтування застосування компонентів розвинутого методу калібрування валків на основі зниження нерівномірності деформування. Результати. Аналіз різних методів калібрування валків швелерів показав, що найменша нерівномірність деформації присутня у способі прокатки методом згинання. Досягається найбільша рівномірність деформації по ширині профілю, знижується знос валків у зв'язку із забезпеченням мінімальної різниці діаметрів валків у калібрі, зменшуються енерговитрати. Для зменшення нерівномірності деформування металу пропонується використовувати прямокутну заготовку чи штрипс. Наукова новизна. Вперше детально проаналізовані методи калібрування валків для прокатки швелерів. Для зменшення нерівномірності деформування полок та фланців в осередку деформації запропоновано застосовувати метод калібрування згинанням. Запропоновано вперше в якості заготовки застосовувати штрипс. Практичне значення. Застосування технології прокатки швелерів на основі розвинутого методу калібрування валків зі зниженою нерівномірністю деформування на перших проходах дозволяє знизити собівартість продукції та дати економічний ефект. **Ключові слова:** швелер, метод калібрування валків згинанням, нерівномірність деформування.

V.U. Hryhorenko, O.M. Zabolotnii. Components of the development of methods for calibrating rollers for rolling channels based on changed non-uniformity of deformation.

Introduction. In metallurgy, the final stage of production is metal processing in rolling shops. The main component of the development of technologies for rolling graded profiles is the calibration of rolls. 90% of the steel that is smelted is processed by rolling. Rolling mill calibration methods are constantly being improved. Calibration methods are used in which there is a significant uneven deformation of the profile elements, which leads to rapid wear of the rolls and an increase in costs. Formulation of the problem. It is necessary to develop a method of calibrating rolls in the production of channels based on the reduction of deformation unevenness. Goal. The purpose of the article is to analyze the methods of calibrating rolls for the production of channels with an indication of their advantages and disadvantages and to justify the application of the components of the developed method of calibrating rolls based on the reduction of unevenness of deformation. The results. The analysis of various methods of calibrating channel rolls showed that the smallest unevenness of deformation is present in the method of rolling by the bending method. The greatest uniformity of deformation along the width of the profile is achieved, the wear of the rolls is reduced in connection with ensuring a minimum difference in the diameters of the rolls in the gauge, and energy costs are reduced. To reduce the uneven deformation of the metal, it is suggested to use a rectangular blank or strip. Scientific novelty. For the first time, the methods of calibrating rolls for channel rolling were analyzed in detail. To reduce uneven deformation of shelves and flanges in the center of deformation in the gauge, it is proposed to use the bending calibration method. It is proposed to use strips as a blank for the first time. Practical meaning. The application of channel rolling technology based on the developed method of calibrating rolls with reduced unevenness of deformation in the first passes allows to reduce the cost of products and give an economic effect.

Key words: channel, method of calibrating rolls by bending, non-uniformity of deformation.

Постановка проблеми. В даний час, в зв'язку з кон'юнктурою, що постійно змінюється на ринку металопродукції, у виробників виникає необхідність застосування оригінальних технологічних та технічних рішень. Також зі зростанням вартості енергоносіїв постає питання зменшення витрат на одиницю продукції на виробництві. Тому методам калібрування валків, що є основою розробок технологій, приділяють постійно увагу [1].

При виробництві швелерів значні перспективи з удосконалення технології полягають у зменшенні кількості прокатних клітей, зниження енерговитрат, зменшенні зносу валків – витрат прокатних валків. Такий підхід для виробництва швелерів можливо реалізувати на основі зниження нерівномірності деформування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Швелер це важливий вид металургійної продукції, використовується для надання жорсткості та стійкості конструкції. Його особлива форма дає добрі результати при навантаженні на вигин і сприймає поздовжні навантаження. Така форма збільшує міцність і зменшує масу металопродукції. Сталевий швелер використовують як у капітальних будівлях, так і в будівництві металевих будівель: ангари, павільйони, автозаправки тощо. Різні швелери застосовується і у машинобудуванні.

Швелера виробляють в Україні за ДСТУ, в Європі – за DIN, EN, в Сполучених Штатах Америки – за ASTM, а також і за технічними умовами.

Для виробництва швелерів, що відповідають перспективним та сучасним критеріям якості, конкурентоспроможності, експлуатаційної надійності тощо в Україні введені такі стандарти:

- ДСТУ 3436-96 «Швелери сталеві гарячекатані. Сортамент» [2];
- ДСТУ 8807:2018 «Балки двотаврові і швелери сталеві спеціальні. Сортамент» [3];
- ДСТУ 7551:2014 «Швелери. Сортамент» [4];
- ДСТУ 7549:2014. «Швелери сталеві гарячекатані з відігнутою полицею для вагонеток. Сортамент» [5].

Сортамент» [5].

Розвитку методів калібрування валків для прокатки сортової продукції в наш час приділяють увагу [6-8]. Це потрібно з причини потреби в підвищенні якості металопродукції і зниження витрат на її виробництво.

Процес швелерної прокатки має 3 основних етапи:

- 1 етап – формування чорнового швелерного профілю в різних калібрах;
- 2 етап – подальша прокатка в чорнових калібрах з отриманням передчистового профілю;
- 3 етап – отримання готового профілю з контролем довжини полиць у контрольному калібрі.

Для формування чорнового профілю швелера з заготовки прямокутної форми майже у всіх методах використовують різні калібри (рис. 1).

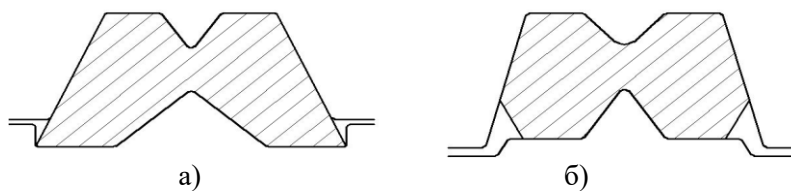


Рис. 1 – Різні калібри: а – напівзакритий; б – закритий знизу

При цьому форми квадратної заготовки не є наближеною до форми профілю і в процесі прокатки виникає велика нерівномірність деформування металу.

Особливістю при прокатці швелерів з заготовки квадратного профілю є забезпечення наявності фальшивих частин фланців в кутах між полкою та фланцями у чорнових калібрах (рис. 2).

Це потрібно для забезпечення в калібрах наступних клітей кута в 90 градусів між полицею та фланцями. Це присутнє у більшості методів калібрування валків [6].

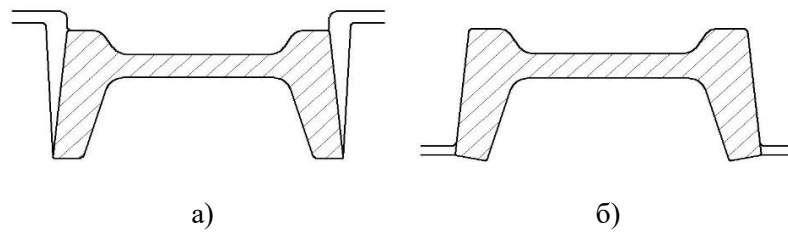


Рис. 2 – Фальшиві фланці (в кутах між полицею та фланцями) у напівзакритому (а) та закритому (б) калібрах

На сьогодні практика з виробництва швелерів має 5 основних способів прокатки швелерів [6] (рис. 3), що відрізняються між собою формою чорнових калібрів:

- балочний спосіб прокатки;
- коритний спосіб прокатки;
- спосіб прокатки в калібрах із збільшеним ухилом дійсних фланців та вигнутої стінкою;
- спосіб прокатки у розгорнутих калібрах;
- прокатка за способом згинання.

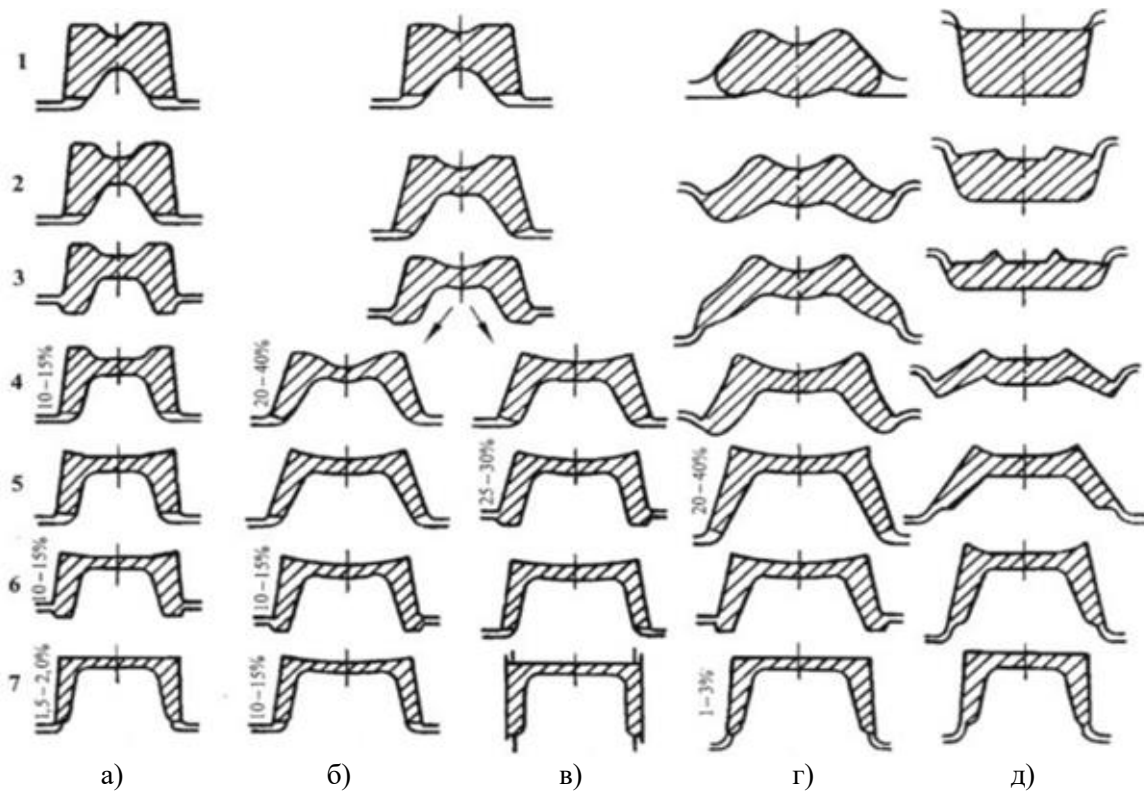


Рис. 3 – Методи калібрування валків для прокатки швелерів: а – зі збільшеним ухилом дійсних фланців та прямою стінкою (коритний спосіб); б – зі збільшеним ухилом дійсних фланців та зігнутою стінкою; в – з застосуванням універсального чистового калібру; г – з розгорнутими дійсними фланцями та зігнутою стінкою; д – згинання прямих дійсних фланців [6]

Деформування фальшивих фланців швелера у калібрах відбувається виключно у закритих частинах калібрів. Наявність фальшивих фланців забезпечує запас металу для уникнення утяжки під час формування малих зовнішніх радіусів закруглень між полкою та фланцями у чистовому калібрі.

Фланці переважно обтискують по товщині. Важливою частиною калібрування валків для прокатки швелера є застосування одного або двох контрольних калібрів. За допомогою таких калібрів здійснюють контроль виконання розмірів дійсних фланців за довжиною та забезпечують необхідну форму поперечного профіля швелера.

Переважно контрольний калібр передує останньому чистовому калібру. Однак у разі необхідності додаткового контролю може використовуватись ще один контрольний калібр, розташований між чорновими калібрами (чорновий контрольний калібр). Існує два типи контрольних калібрів: закритий та напівзакритий (рис. 2).

Завершується калібрування швелерів в 1-2 чистових калібрах, в яких, на відміну від чорнових, немає фальшивих фланців. Чистовий калібр завжди виконують закритим, дійсні фланці остаточно формуються в відкритих частинах калібру, що має забезпечити отримання профілю з гострими зовнішніми кутами.

Як правило, швелер прокатують дійсними фланцями вниз, що полегшує стік охолоджувальної води та видалення окалини, але бувають і винятки [6].

Балковий метод калібрування валків для прокатки швелерів. Балковий метод [6] схожий з калібруванням валків за профілем двотаврової балки.

Перевага даного способу полягає у використанні загальних розрізних та чорнових калібрів (3-4 калібра) для прокатки двотаврових балок для прокатки швелерів. На сьогодні такий спосіб виробництва застосовується досить рідко. Причина – значна нерівномірність деформування в калібрах.

Коритний методи калібрування валків для прокатки швелерів. У цьому методі застосовують збільшені випуски у чорнових та чистових калібрах. При прокатці по коритному способу використовують прямополичні швелерні калібри з прямою стінкою та збільшеним випуском до 10-15% у чорнових калібрах та до 1,5-2,0% у чистовому.

Метод калібрування валків зі збільшеним ухилом дійсних фланців і зігнутою полицею. У цьому способі прокатки практично повністю усуваються недоліки коритного способу прокатки, за рахунок використання калібрів з прямими полицями та зігнутою стінкою. До того ж, коритний спосіб прокатки прийнято вважати окремим випадком прокатки в калібрах зі збільшеним ухилом та зігнутою стінкою.

Метод калібрування валків з розгорнутими дійсними фланцями та зігнутою стінкою [6]. Як показала практика такий метод дає добрі результати при прокатці швелерів. Сутність даного способу прокатки полягає в тому, що перехід від розгорнутого майже до горизонталі калібру до прямополичного здійснюється поступово із застосуванням низки перехідних кривополичних калібрів, які забезпечують плавну формозміну розкату. Це розвиток способу прокатки в калібрах зі збільшеним ухилом дійсних фланців і зігнутою полицею.

Існує низка методів розрахунку розгорнутого калібрування швелерів. Ці методи умовно об'єднані в три групи [9]:

1. Розрахунок серії калібрів за горизонтальними проекціями та регламентованим розкриттям полук;
2. Розрахунок за середньою лінією та кутам розкриття полиць пропорційно обтисненням;
3. Розрахунок калібрів за методом відповідної смуги.

Найбільш розповсюджений є другий метод. Цей метод впроваджено при прокатці швелерів на стані 550 [9-10].

Метод розрахунку калібрування валків для прокатки швелерів у розгорнутих калібрах вперше запропонований Старченко Д.І. Принцип методу є у з'єднанні двох розгорнутих калібрів для прокатки кутиків в один швелерний.

В методі Ілюковича В.М. при розрахунках використовують перші три калібри балочного типу з відкритими фланцями, розрахунок ведуть проти напрямку прокатки. Калібр 4 і наступні – розгорнутого типу. Розрахунок за цим методом проводиться за горизонтальними проекціями, величина поширення приймається конструктивно.

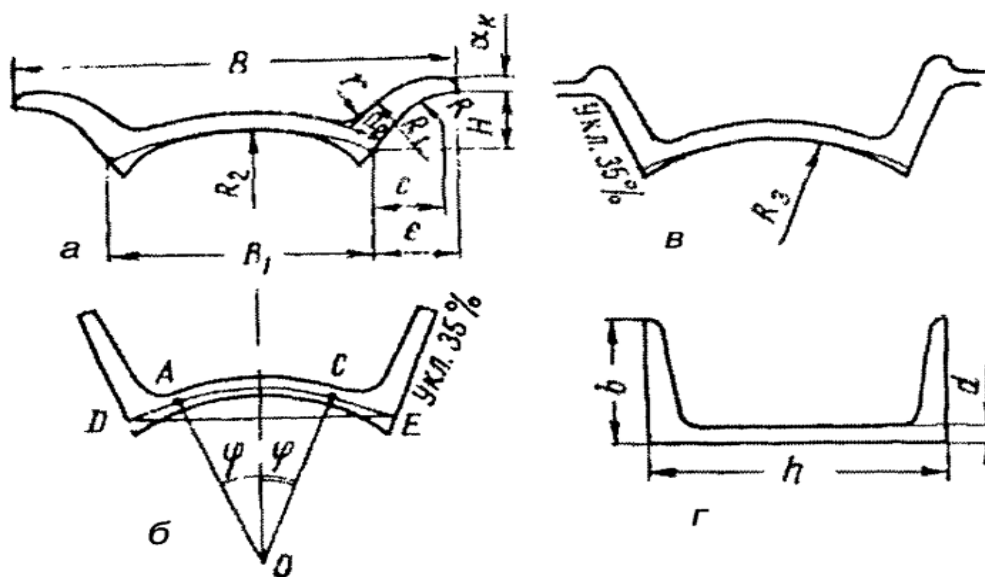


Рис. 4 – Побудова чистових калібрів за методом Ілюковича В. М.: а – кривополичний розгорнутий калібр; б – чистовий калібр; в – передчистовий калібр; г – готовий профіль [9]

Метод Кочетова за принципом майже такий, як і метод Старченко В.М. Цей метод існує у двох варіантах: – із застосуванням контрольного калібру; – без використання контрольного калібру. На практиці ці методи не отримали широкого практичного застосування.

В методі Антонюка С.М. і Бергемана Г.В. функції згинання і контролю висоти полиць поєднані в останньому чорновому кривополичному калібрі (рис. 5). Надалі прокатку ведуть у чистовій групі клітей у відкритому передчистовому прямополичному калібрі. Цей метод на стані 550 «ДМЗ» показав гарні результати і використовується у виробництві на стані 550.

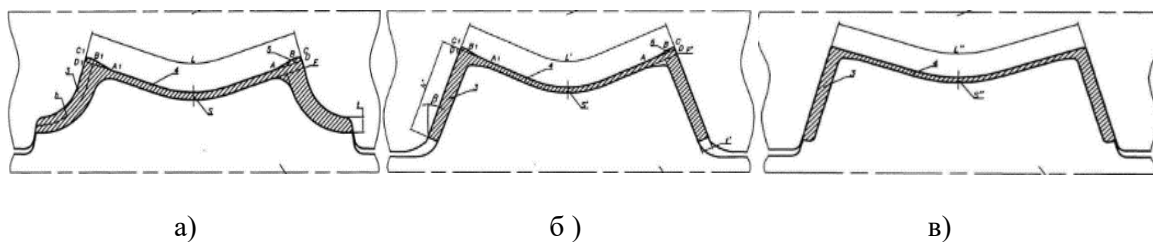


Рис. 5 – Побудова калібрів за методом Антонюка С.М. і Бергемана Г.В.: а – чорновий кривополичний контрольний калібр; б – прямополичний предчистовий відкритий калібр; в – чистовий калібр [9]

При створення калібрування для конкретного сортового профілю розробляють кілька варіантів і найкращий з них вибирають за допомогою послідовних випробувань, що тягне за собою витрати грошових ресурсів та значної кількості часу. Перспективи подальших розробок та удосконалень методів розрахунку розгорнутих калібрів з метою зниження нерівномірності розподілу деформацій потребують математичного моделювання з використанням сучасних програмних комплексів. Це дозволяє моделювати розрахункові моделі калібрування перед впровадженням у виробництво і значно прискорити процеси розрахунків.

Метод калібрування валків для прокатки швелерів за способом згинання. При прокатуванні швелерів за способом згинання у чорнових проходах застосовують калібри смугового типу. У них дають інтенсивне обтиснення заготовки з утворенням спеціальних виступів у місцях формування кутів швелера між полицею та фланцями. Чорнові смугові калібри можуть бути відкритими або закритими, можливе також застосування чорнових валків з гладкою бочкою. У

наступних за смуговими калібрами здійснюють поступове згинання профілю при невеликих обтисканнях у прямополичних калібрах з прямою або зігнутою стінкою (рис. 6). Однак із практики відомі випадки, де згинання профілю здійснюється лише у чистовому калібрі, тобто всі чорнові калібри – смугові.

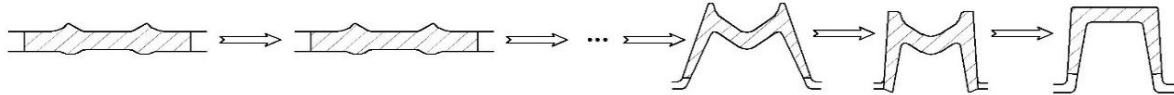


Рис. 6 – Схема швелерного калібрування прокатних валків за способом згинання

Метою статті є аналіз методів калібрування валків для виробництва швелерів із вказанням їх переваг та недоліків, обґрунтування можливості застосування розвинутого «Методу калібрування валків у виробництві швелерів на основі зниження нерівномірності деформування».

Виклад основного матеріалу.

Переваги і недоліки коритного методу калібрування валків для прокатки швелерів:

- підвищене бокове обтиснення фланців;
- можливість переточування валків зі збереженням початкових розмірів калібрів з меншим зніманням металу діаметру;
- термін експлуатації прокатних валків збільшується;
- за рахунок меншої глибини врізу струмків у валки знижується витрата енергії та знос прокатних валків під час прокатки, підвищується міцність валків.

Особливість методу калібрування валків зі збільшеним ухилом дійсних фланців і зігнутою полицею.

Контроль висоти дійсних фланців здійснюється за допомогою контрольних чорнового та передчистового калібрів напівзакритого типу.

Після кожного контрольного проходу прокатки виконують в закритому швелерному калібрі, до того ж рекомендується після кожних чотирьох проходів використовувати контрольний калібр.

Переваги і недоліки методу калібрування з розгорнутими дійсними фланцями та зігнутою стінкою:

- досягається найбільша рівномірність деформації за шириною профілю;
- зменшується знос валків у зв'язку із забезпеченням мінімально можливої різниці діаметрів валка в калібрі валків;
- скорочується витрата енергії при прокатці;
- зростає ширина калібрів, отже, на бочці валків можна розмістити меншу кількість калібрів;
- різко погіршуються умови входу смугового профілю в згинальний прямополичний калібр, а також центрування в ньому.

Цей метод є перспективним при виробництві швелерів.

Переваги і недоліки метод калібрування валків для прокатки швелерів за способом згинання.

При прокатці за способом згинання посилюються такі переваги розгорнутого калібрування, як:

- досягається найбільша рівномірність деформації за шириною профілю;
- зменшується знос валків у зв'язку із забезпеченням мінімально можливої різниці діаметрів валка у калібрі та найменшої різниці діаметрів валка у калібрі;
- скорочується витрата енергії при прокатці.

Такі позитивні переваги є важливими з точки зору розвитку методу калібрування валків для виробництва швелерів.

Незважаючи на перераховані вище переваги, даний спосіб калібрування має ряд істотних недоліків:

- зростає ширина калібрів, отже на бочці валків можна розмістити меншу кількість калібрів, а також збільшується сила прокатки;

– різко погіршуються умови входу смугового профілю в згинальний прямополичний калібр, а також центрування в ньому.

Переваги такого способу формування профілю будуть ефективними у разі застосування його для виробництва малих розмірів швелера. У цих випадках ширини бочки валка буде достатньо для виробництва.

Вище приведений аналіз способів виробництва швелерів показав, що найменша нерівномірність деформації присутня при прокатці за способом згинання. Досягається найбільша рівномірність деформації за шириною профілю, зменшується знос валків у зв'язку із забезпеченням мінімально можливого врізу калібрів у валки через найменшу різницю діаметрів валка у калібрі, скорочується витрата енергії при прокатці. В цьому методі пропонується для зменшення нерівномірності деформування на першому етапі формування профілю використовувати прямокутну сортову заготовку або заготовку з штрипсових станів [11, 12].

В цьому способі основним недоліком є мала площа поперечного перерізу заготовки. Це не дає можливість прокатувати максимально можливу кількість довжин швелерів. Виходом з цього недоліку є застосування прямокутної заготовки достатньою товщиною та довжиною.

Основними перевагами пропозиції є:

- зниження нерівномірності деформації металу у чорнових калібрах;
- зменшення кількості змінного обладнання (валків);
- зменшення часу нагріву заготовки;
- зменшення зносу валків, обумовлене зменшенням часу деформування металу в чорновій групі та підвищенням температури прокатки в чистовій групі;
- зменшення витрат електроенергії в чорновій групі;
- вирівнювання температури по перерізу розкату.

Розробка і застосування технологій прокатки швелерів на основі розвитку методу калібрування валків згинанням з прямокутної заготовки чи з штрипса із зниженням нерівномірності деформування у перших проходах знижує витрати на впровадження змін та дає значний економічний ефект у вигляді зниження собівартості продукції.

Висновки

В металургії в прокатних цехах при виробництві швелерів переходять на використання розгорнутого методу калібрування. Використовують квадратну заготовку. При цьому у перших чорнових калібрах відбувається інтенсивне нерівномірне деформування, що обумовлено неналежним наближенням форми вихідної квадратної заготовки до фасонного профілю.

Для зниження нерівномірності деформування металу в осередку деформування в калібрах запропоновано застосовувати розвинутий метод калібрування згинанням з використанням прямокутної заготовки або штрипса. При цьому у перших проходах аналогічних смуговій прокатці пропонується застосовувати максимальні коефіцієнти деформації. Кількість проходів в чорновій групі може зменшитися. Коефіцієнти деформації в чорновій групі будуть максимальні. Подальші передчистові і чистові калібри можливо залишити, в основному, без змін, що мінімізує витрату грошових ресурсів і часу для впровадження змін, а також гарантує отримання профіля належної якості.

Перелік використаних джерел:

1. Максименко О. П., Штода М. М., Нікулін О. В. Основи калібровки прокатних валків: Навчальний посібник. Кам'янське : ДДТУ, 2023. 156 с. URL: <https://dspace.mipolytech.educa-tion/handle/mip/570> (дата звернення: 15.05.2023).
2. ДСТУ 3436-96. Швелери сталеві гарячекатані. Сортамент. [Чинний від 1999-01-01]. Вид. офіц. Київ, 1998. 13 с. (Інформація та документація).
3. ДСТУ 8807:2018. Балки двотаврові і швелери сталеві спеціальні. Сортамент. [Чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2018. 7 с. (Інформація та документація).
4. ДСТУ 7551:2014. Швелери. Сортамент. [Чинний від 2015-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2014. 3 с. (Інформація та документація).
5. ДСТУ 7549:2014. Швелери сталеві гарячекатані з відігнутою полицею для вагонеток. Сортамент. [Чинний від 2015-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2014. 3 с. (Інформація та документація).

6. Илюкович Б. М., Нехаев Н. Е., Меркурьев С. Е. Прокатка и калибровка : в 6 т. Днепропетровск : Днепро-ВАЛ, 2002. Т. 5 : Калибровка двутавровых профилей, рельсовых профилей и профилей особо сложной формы. 482 с.
7. Gupta N. K. Steel Rolling. Principle, Process & Application. London, 2021. 526 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003182399>.
8. Kumar A., Rath S., Kumar M. Simulation of plate rolling process using finite element method. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 42. Part 2. Pp. 650-659. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.050>.
9. Современные технологии производства швеллеров с применением развернутой калибровки валков / Г. В. Бергеман и др. Днепропетровск : АРТ-ПРЕСС, 2007. 64 с.
10. Бергеман Г. В. Освоение производства крупногабаритного профиля швеллера № 30П в условиях среднесортного стана «550». *Металл и литьё Украины*. 2016. № 2(273). С. 36-41.
11. Григоренко В. У., Заболотній О. М. Аспекти з розвитку методів калібровки валків сучасного виробництва сортових профілів. *Проблеми і перспективи розвитку сучасних технологій в контексті відбудови і сталого розвитку України: тези доповідей Міжн. наук.-практ. конф., м. Дніпро, 28-29 листопада 2023 р. Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2023. С. 50-52.*
12. Григоренко В. У., Заболотній О. М. До розробки методу розрахунку калібрування валків горячої прокатки фасонних профілів зі зниженою нерівномірністю деформації. *Університетська наука - 2024 : тези доп. Міжн. наук.-техн. конф., м. Дніпро, 23-24 травня 2024 р. Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2024. Т. 1. С. 29-30.*

References:

1. O.P. Maksymenko, M.M. Shtoda, and O.V. Nikulin, *Osnovy kalibrovky prokatnykh valkiv: Navchalnyi posibnyk* [Basics of rolling mill calibration: Tutorial]. Kamianske, Ukraine: DDTU Publ., 2023. (Ukr.)
2. *Shvelery stalevi hariachekatani. Sortament* [Hot-rolled steel channels. Assortment], State Standart 3436-96, Kyiv, 1998. (Ukr.)
3. *Balky dvotavrovi i shvelery stalevi spetsialni. Sortament* [I-beam beams and special steel channels. Assortment], State Standart 8807:2018, Kyiv, 2018. (Ukr.)
4. *Shvelery. Sortament* [Channels. Assortment], State Standart 7551:2014, Kyiv, 2014. (Ukr.)
5. *Shvelery stalevi hariachekatani z vidihnutoiu polytseiu dlia vahonetok. Sortament* [Hot-rolled steel channels with a bent shelf for trolleys. Assortment], State Standart 7549:2014, Kyiv, 2014. (Ukr.)
6. B.M. Yliukovych, N.E. Nekhaev, and S.E. Merkurev, «Kalybrovka dvutavrovikh profylei, relsovikh profylei y profylei osobo slozhnoi formi» [«Calibration of I-beams, rail profiles and profiles of particularly complex shapes»], in *Prokatka y kalybrovka* [Rolling and calibration], vol. 5, Dnepropetrovsk, Ukraine: Dnepro-VAL Publ., 2002, 482 p. (Rus.)
7. N.K. Gupta, Steel Rolling. Principle, Process & Application. London, 2021. **doi: 10.1201/9781003182399**.
8. A. Kumar, S. Rath, and M. Kumar, «Simulation of plate rolling process using finite element method», *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, part 2, pp. 650-659, 2021. **doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.050**.
9. H.V. Berheman, S.M. Antoniuk, M.V. Kraev, Y.V. Pelikh, and K.S. Antoniuk, *Sovremennye tekhnologii proizvodstva shvellorov s prymenenyem razvernutoi kalybrovki valkov* [Modern technologies for the production of channels using expanded calibration of rolls]. Dnepropetrovsk, Ukraine: ART-PRESS Publ., 2007. (Rus.)
10. H.V. Berheman, «Osvoenye proizvodstva krupnobyarytnoho profylya shvellera № 30P v uslovyiakh sredne-sortnoho stana «550» [«Development of production of large-sized channel section No. 30P in the conditions of medium-grade mill «550»], *Metall y lytë Ukrainy – Metal and casting of Ukraine*, № 2(273), pp. 36-41, 2016. (Rus.)
11. V.U. Hryhorenko, and O.M. Zabolotnii, «Aspekty z rozvytku metodiv kalibrovky valkiv suchasnoho vyrobnytstva sortovykh profiliv» [«Aspects of the development of roll calibration methods for the modern production of graded profiles»], in *Proceedings of Int. sci.-tecn. conf. «Problems and prospects of the development of modern technologies in the context of reconstruction and sustainable development of Ukraine»*, Dnipro, 2023, pp. 50-52. (Ukr.)

12. V.U. Hryhorenko, and O.M. Zabolotnii, «Do rozrobky metodu rozrakhunku kalibruvannia valkiv horiachoi prokatky fasonykh profiliv zi znyzhenoiu nerivnomirnistiu deformatsii» [«To the development of a method for calculating the calibration of hot rolling rolls of shaped profiles with reduced deformation unevenness»], in Proceedings of Int. sci.-tecn. conf. «University science - 2024», Dnipro, 2024, vol. 1, pp. 29-30. (Ukr.)

Стаття надійшла 13.02.2024

Стаття прийнята 02.04.2024

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.316.722

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310686

© Чорна В.О.¹, Кудряшов О.О.²

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАСИВНОГО ТА АКТИВНОГО ФІЛЬТРІВ ВИЩИХ ГАРМОНІК В МЕРЕЖІ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Наявність нелінійного навантаження, підключеного до мережі електроживлення, викликає викривлення синусоїдальної форми кривих струму та напруги, призводячи до виникнення вищих гармонік. Вищі гармоніки призводять до перевантаження та перегріву обладнання, зниження надійності та зменшення терміну його експлуатації, здатні здійснювати негативний вплив на якість електричної енергії. В рамках завдання щодо забезпечення надійності електричних мереж важливим завданням є контроль рівня гармонійних складових та застосування спеціальних пристроїв для мінімізації їх впливу. Для боротьби з вищими гармоніками в електричних мережах роблені та використовують різні пристрої, до яких відносяться лінійні дроселі, пасивні фільтри, активні фільтри. Вибір конкретного пристрою залежить від параметрів електромережі, типу та характеристик підключеного навантаження, рівня гармонійних складових, вимог до якості електричної енергії. Лінійні дроселі здатні знижувати рівень гармонік в електромережі, але, маючи ряд недоліків, потребують додаткового обґрунтування при прийнятті рішення про їх застосування. Пасивний фільтр має контур, що складається з дроселя, резистора та ємності, може мати різні конфігурації та налаштовується на частоту конкретної гармоніки для пригнічення її впливу. Пасивні фільтри більш ефективні в боротьбі з вищими гармоніками, генерованими нелінійним навантаженням, економічніші та простіші в обслуговуванні, але мають обмежений діапазон частот, фіксовані параметри та значні масогабаритні розміри, що обмежує коло їх використання. Активні фільтри мають у своєму складі активні компоненти для генерування сигналів, протифазних гармонійним складовим, завдяки чому компенсують вищі гармоніки. Активні фільтри більш гнучкі, здатні до корекції викривлених та формування сигналів, є значно ефективнішими за дроселі та пасивні фільтри, але менш економічно привабливі та більш енергоємні. В представленій роботі досліджені пасивний шестиланковий LC-фільтр та шунтуючий активний фільтр на основі принципу миттєвої компенсації активного та реактивного струмів. В активному фільтрі компенсація гармонійних викривлень забезпечується пропорційно-інтегральним регулятором. В роботі проведено імітаційне моделювання пасивного та активного фільтрів у складі електротехнічного комплексу термічної обробки металів, проаналізовані отримані результати компенсації гармонійних викривлень.

Ключові слова: електрична мережа, активний фільтр, пасивний фільтр, гармоніка, моделювання, компенсація.

V.O. Chorna, O.O. Kudryashov. Comparative analysis of the effectiveness of passive and active filters of higher harmonics as part of the electrical complex of metal heat treatment. The presence of a nonlinear load connected to the power supply network causes a

¹ канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3641-4152, chornajav@gmail.com

² магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, menetors@gmail.com

distortion of the sinusoidal shape of the current and voltage curves, resulting in higher harmonics. Higher harmonics lead to overloading and overheating of equipment, reduced reliability and reduced service life, and can have a negative impact on the quality of electricity. As part of the task of ensuring the reliability of power grids, an important task is to control the level of harmonic components and use special devices to minimize their impact. To combat higher harmonics in power grids, various devices have been developed and used, including line chokes, passive filters, and active filters. The choice of a particular device depends on the parameters of the power grid, the type and characteristics of the connected load, the level of harmonic components, and the requirements for the quality of electricity. Linear chokes are capable of reducing the level of harmonics in the power grid, but, having a number of disadvantages, require additional justification when deciding on their use. A passive filter has a circuit consisting of a choke, resistor, and capacitor, can have different configurations, and is tuned to the frequency of a specific harmonic to suppress its effects. Passive filters are more effective in combating higher harmonics generated by nonlinear noise, more economical and easier to maintain, but have a limited frequency range, fixed parameters and significant weight and dimensions, which limits their use. Active filters include active components to generate signals that are out of phase with harmonic components, thus compensating for higher harmonics. Active filters are more flexible, capable of correcting distorted and shaped signals, are much more efficient than chokes and passive filters, but are less cost-effective and more power-consuming. In the presented work, a passive six-link LC filter and a shunt active filter based on the principle of instantaneous compensation of active and reactive currents are investigated. In the active filter, harmonic distortion compensation is provided by a proportional-integral controller. In this paper, we have carried out simulation modeling of passive and active filters as part of an electrical complex for metal heat treatment and analyzed the results of harmonic distortion compensation.

Key words: *electrical network, active filter, passive filter, harmonic, modeling, compensation.*

Постановка проблеми. Зростання встановленої потужності нелінійних, несиметричних і різкозмінних навантажень промислових підприємств є причиною істотного збільшення рівня електромагнітних завад в системі електропостачання. Ці перешкоди, залежно від їх характеру, інтенсивності та тривалості, негативно впливають на силові електроустановки, системи автоматики, релейний захист. У ряді випадків це призводить до зниження надійності електропостачання, збільшення втрат електричної енергії, погіршення якості та зменшення кількості випущеної продукції, що обумовлює практичну значимість проблеми.

Найбільш розповсюдженими в промисловості є нелінійні пристрої, які здатні викривляти форму кривих напруги та струму, генерувати гармонійні складові напруги та струму. Ці явища обумовлені режимами роботи нелінійного обладнання, особливостями його внутрішньої структури та способами управління. Прикладом нелінійного навантаження можуть служити імпульсні перетворювачі (ІП), що здійснюють випрямлення змінного струму живлення в постійний струм, завдяки чому забезпечується ефективне регулювання електричними двигунами технологічних механізмів. Маючи значні переваги, такі як: невеликі масогабаритні розміри, невисока вартість, високий ККД, перетворювач має суттєвий недолік, який полягає в генеруванні імпульсних перешкод. Останні виникають через комутацію ключів силової схеми ІП та являють собою вищі гармонійні складові в сигналах струму та напруги, які поширюються електричною мережею та призводять до різного роду проблем [1]. Вони можуть спричинити перегрів провідників, зокрема нейтралі, особливо при наявності однофазних переключених навантажень; призводити до підвищення температури устаткування та, як наслідок, до його пошкодження; спричинити додаткові втрати енергії та погіршення енергетичної ефективності обладнання; створюючи електромагнітні завади, негативно впливати на обладнання, що отримує електроживлення від даної мережі; створювати перешкоди в телекомунікаційних системах та обладнанні [2, 3]. У зв'язку з цим контроль та компенсація вищих гармонік в електричних мережах з нелінійним навантаженням є

важливими задачами на шляху забезпечення стабільності та ефективності функціонування електроенергетичної системи в цілому.

Для захисту від гармонійних спотворень у мережі живлення використовують пасивні фільтри (ПФ) та активні фільтри гармонік (АФ), які допомагають зменшити або вилучити ці небажані компоненти з електричного сигналу. Порівняльний аналіз пасивних та активних фільтрів є об'єктом дослідження даної наукової роботи, виконаної в рамках підготовки випускної кваліфікаційної роботи.

Метою даної роботи є дослідження на імітаційних моделях ефективності застосування ПФ та АФ для боротьби з гармонійними складовими струму в електричній мережі з нелінійним навантаженням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За більш ніж півстоліття наукових пошуків та досліджень було отримано достатньо теоретичних основ для побудови пристроїв боротьби з негативним впливом, спричиненим наявністю вищих гармонік в електричній мережі. До них відносяться: пасивні фільтри гармонік, активні фільтри потужності, гібридні активні фільтри потужності, кожен з яких має певні переваги та недоліки [4, 5]. В [4-6] наводиться порівняльний аналіз схемотехнічних рішень різних видів пристроїв боротьби з гармонійними складовими струму. Автори проводять порівняльну оцінку енергетичної ефективності та економічної доцільності різних методів боротьби з вищими гармоніками. В дослідженнях дано високу оцінку та ефективність застосування ПФ (в частині витрат на їх встановлення) порівняно з іншими відомими методами. В [4] наведено результати дослідження ефективності роботи ПФ. Для підвищення ефективності ПФ гармонік запропоновано відділити фільтр реактором. В [7] представлені результати дослідження однонаштованого ПФ в системі електропостачання промислового підприємства та важливість правильного вибору елементної бази та налаштування фільтра. В [8, 9] показано переваги АФ порівняно з пасивними, пов'язані з масогабаритними розмірами та більш практичними схемними рішеннями перших, та показана реалізація схеми управління, що базується на р-q теорії миттєвої потужності. В [4] запропоновані алгоритми системи керування АФ потужності. В [10] розглянуто питання управління шунтуючим фільтром активної потужності на основі принципу компенсації d-q. Матеріали, викладені в [10], взяті за основу досліджень, проведених авторами даної наукової праці.

Виклад основного матеріалу. Як відомо, для захисту від гармонійних спотворень у мережі живлення використовують різні прилади, у тому числі лінійні дроселі, пасивні та активні фільтри гармонік, які допомагають зменшити або вилучити ці небажані компоненти з електричного сигналу. Вибір пристрою залежить від параметрів електричної мережі, типу та характеристик підключеного до неї навантаження, рівня гармонійних складових, вимог до якості електричної енергії. Лінійні дроселі здатні знижувати рівень гармонік в електромережі, але мають певні недоліки, тому потребують додаткового обґрунтування при прийнятті рішення про їх застосування. ПФ вищих гармонік встановлюється паралельно до навантаження з метою пригнічення небажаних гармонік в електричній мережі. Він має LC-контур, який налаштовується на частоту конкретної гармоніки для пригнічення її впливу. LC-контур створює резонанс на певній частоті гармоніки. Це призводить до розсіювання струмів цієї гармоніки у вигляді теплової енергії, що означає, що фільтр виводить її з електричної мережі, не допускаючи подальшого розповсюдження. Таким чином, ПФ «відсікає» небажані гармоніки, що дозволяє забезпечити чистий сигнал у мережі. Для пригнічення кількох гармонік доцільно встановити ряд ПФ з паралельним з'єднанням, кожен з яких налаштований на певну частоту гармоніки, формуючи ефективний бар'єр від небажаних гармонік в системі електропостачання.

Принцип роботи АФ полягає в тому, що він аналізує струм основної частоти та ідентифікує гармоніки вищих порядків, які можуть виникати в результаті використання несинусоїдальних навантажень. Після цього фільтр генерує компенсуючий струм і подає його до навантаження. Струм компенсації має протилежну фазу від гармонік, тобто компенсує негативний вплив гармонік шляхом їх анулювання. Цей процес призводить до зниження рівня гармонік у мережі та сприяє наближенню кривої струму до синусоїдальної форми. Аналіз швидкого розкладання Фур'є для різних навантажень показує значуще зменшення показника гармонійних спотворень (THD) вихідного струму [8]. Отже, АФ гармонік здатний компенсувати гармоніки у вихідному струмі, що виникають від імпульсного перетворювача як нелінійного навантаження.

В представленій роботі досліджена система «трифазний імпульсний перетворювач – двигун постійного струму» (ПІ–ДПС). Дослідження проведені на імітаційній моделі, створеній в середовищі Matlab Simulink (рис. 1, а). Модель включає, крім двигуна потужністю 50 к.с. та ПІ на базі тиристорної трифазної мостової схеми, трифазну мережу живлення 6 кВ, силовий трансформатор потужністю 630 кВт, генератор імпульсів для управління перетворювачем, блоки вимірювання напруги та струму.

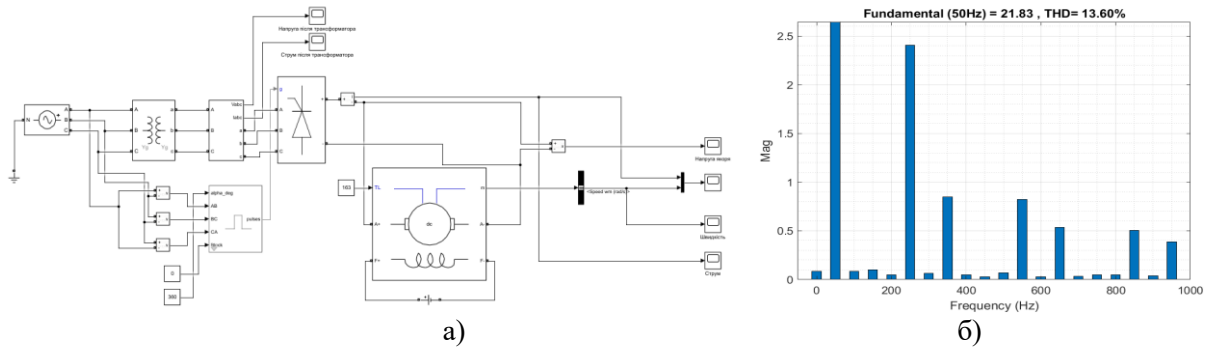


Рис. 1 – Модель системи «ПІ–ДПС» в середовищі MatLab Simulink (а) та результати швидкого розкладу Фур’є струму вищої сторони трансформатора (б)

Результати моделювання, наведені на рис. 2 та рис. 3, свідчать про те, що ПІ спотворює синусоїдальні сигнали напруги (рис. 2) та струму (рис. 3). При цьому спотворення збільшуються зі зміною кута управління ПІ від $\pi/6$ до $\pi/2$, призводячи до збільшення THD на стороні вищої напруги трансформатора до рівня 13,6% (рис. 1, б).

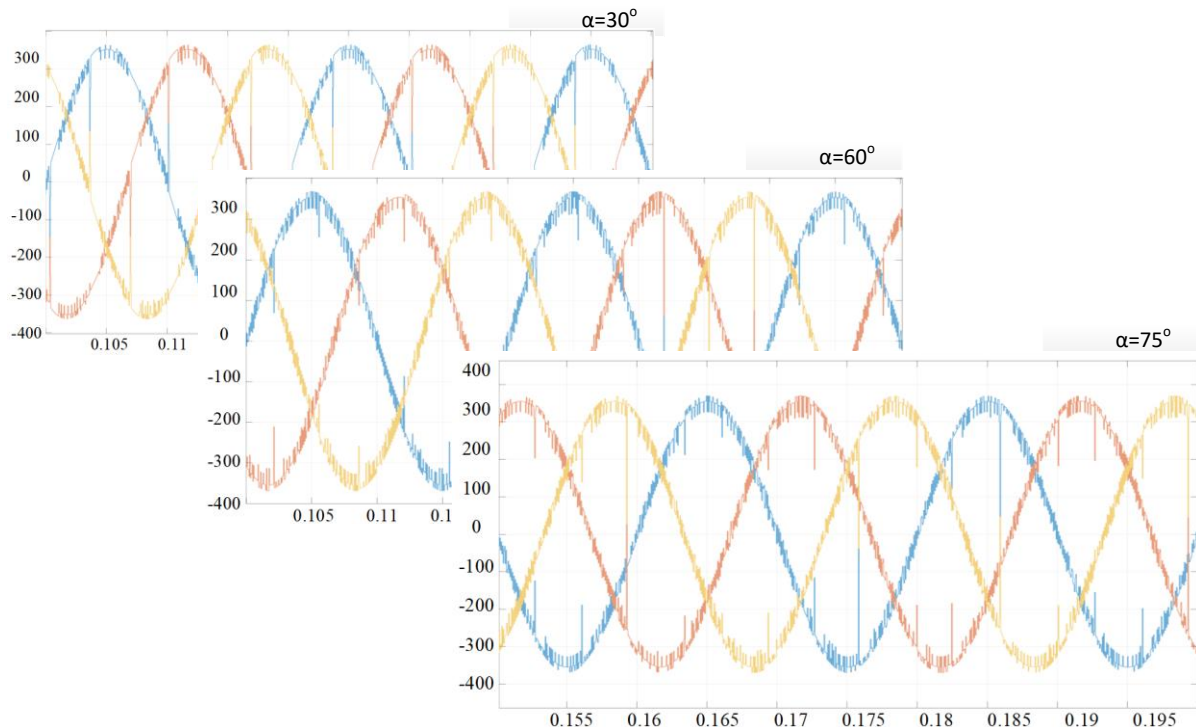


Рис. 2 – Сигнал напруги на перетворювачі

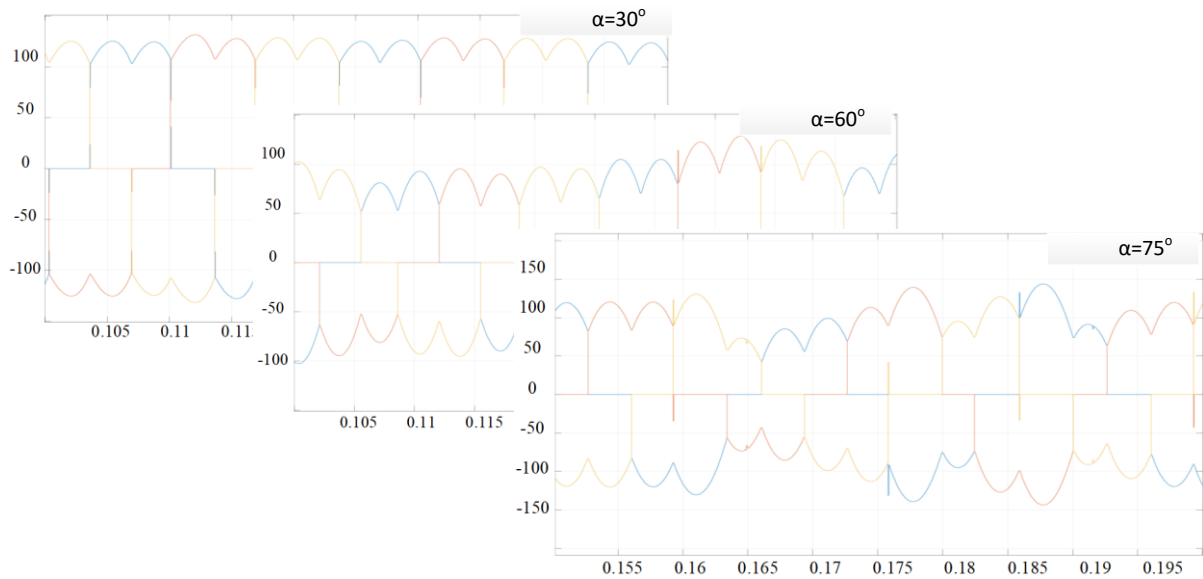


Рис. 3 – Сигнал струму на перетворювачі

В роботі було досліджено ПФ, імітаційна модель якого наведена на рис. 4, а. Фільтр представляє собою 6 блоків (Single tuned Filter), кожний з яких налаштований на компенсацію 5, 7, 11, 13, 17 та 19 гармонік, підключених безпосередньо між мережею живлення та нелінійним навантаженням. Потужність, яку повинен компенсувати кожний з фільтрів розраховується як $Q_n = I_n U_n$, тобто використовуючи значення струмів I_n та наруг U_n n-ої гармоніки. В ході виконання роботи фільтр налаштовувався окремо для кожної з ситуацій. В результаті моделювання вдалось з'ясувати, що ПФ обраної структури дозволяє підвищити ККД до 95-98% та знизити THD₁ до рівня 6,99% (рис. 4, б). При цьому струм фільтра при різних режимах роботи ПП має різну форму, що показано на рис. 5.

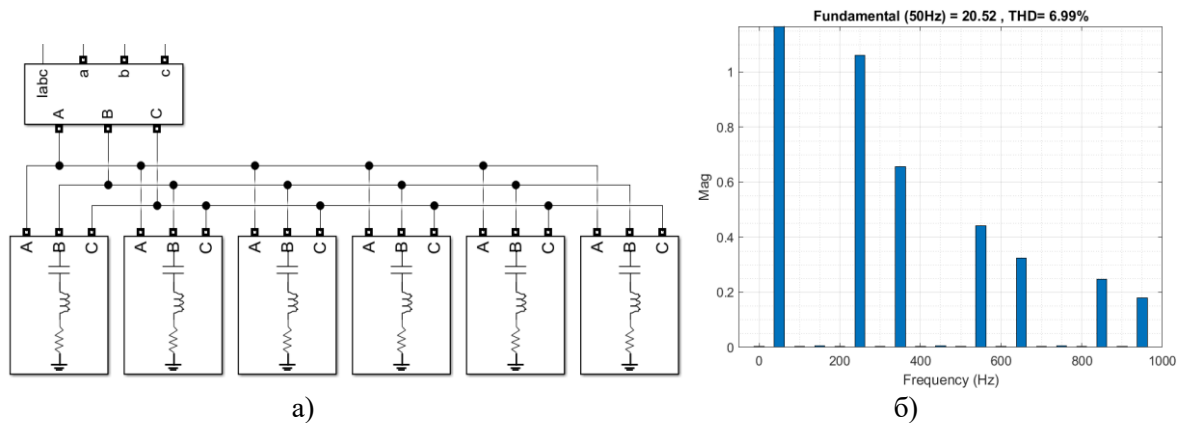


Рис. 4 – Модель ПФ в середовищі Matlab Simulink (а) та результати швидкого розкладу Фур'є струму верхньої сторони трансформатора (б)

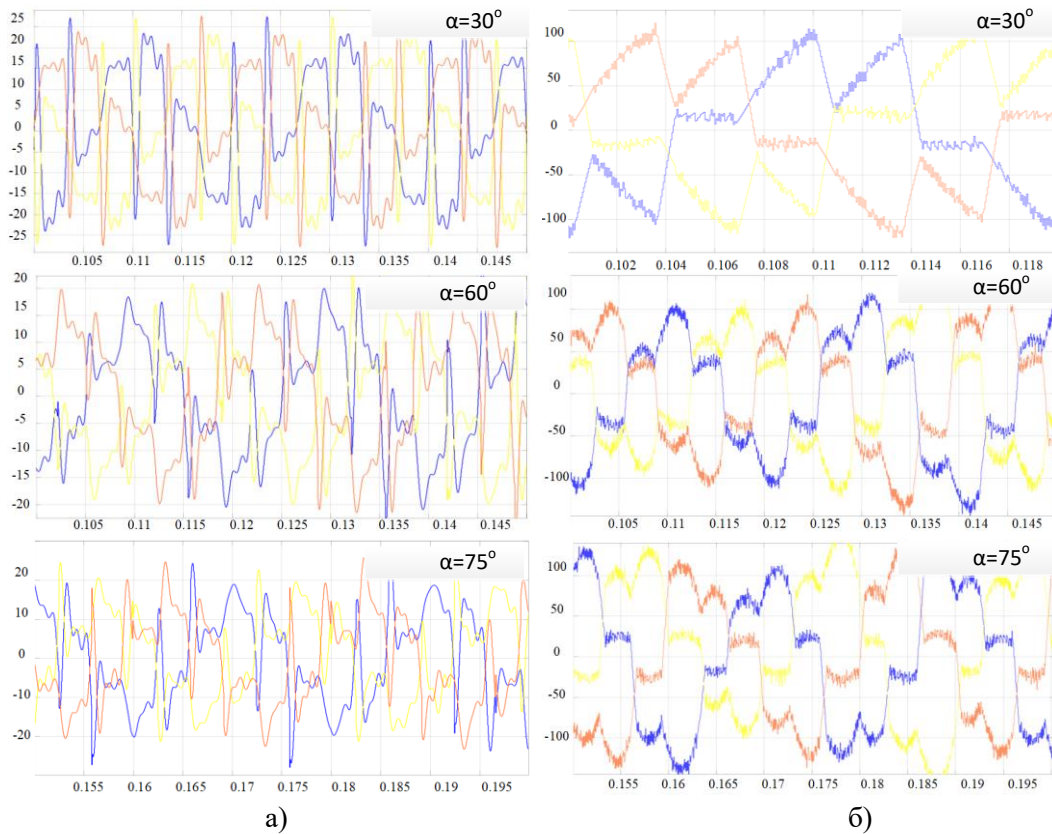


Рис. 5 – Форми кривих струмів ПФ (а) та АФ (б) при різних режимах роботи ІП та компенсації вищих гармонійних складових

Для вивчення процесів, що відбуваються в електромеханічній системі з АФ, в якості останнього було обрано схему фільтра с функцією компенсації вищих гармонік, детально описану в [11]. Схему управління АФ на основі методу d-q теорії миттєвої потужності представлено на рис. 6.

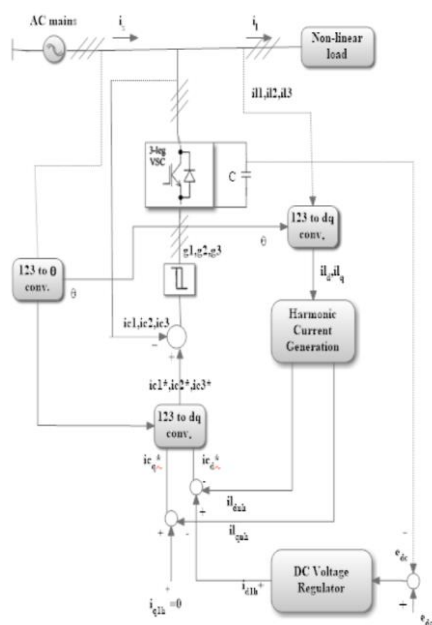


Рис. 6 – Схема керування АФ

В даній схемі для подачі компенсаційного струму в лінію використовується трифазний інвертор напруги на основі IGBT Source Inverter. Завдяки цьому конструкція фільтра є простою, надійною, їй властива достатня динаміка, незважаючи на деякі недоліки. Використовуваний контролер струму складається з трьох незалежних дворівневих гістерезисних компараторів, що працюють на базі IGBT модулів. Це забезпечує компенсацію гармонік струму, що інжектується схемою керування. Остання складається з генератора гармонійного струму та регулятора постійної напруги. Розрахунок складових активного фільтра здійснюється за методиками, наведеними в [10, 12].

Для проведення досліджень створена імітаційна моделі АФ (рис. 7, а). Модель АФ розроблена для ефективного управління струмом у системі в умовах нелінійного навантаження. При виникненні нерівномірного споживання струму через нелінійність навантаження, блок обчислення струму компенсації визначає середнє значення струму навантаження порівняно з фазною напругою. Подальше перетворення струму у систему координат «dq0» в блоці Current calculation дозволяє визначити активну і коливальну складові струму, необхідні для ефективного вилучення гармонік та управління реактивною потужністю. На вхід Current calculation подається струм навантаження, напруга низької сторони трансформатора та струм з ПІ-регулятора, який є результатом віднімання компонентів осі d вищого порядку. Вибір початкового положення вісі d здійснюється так, щоб активна складова струму була визначена цією віссю. Додавання фіксованої частини вісі q допомагає компенсувати реактивну потужність, а компонент нульової послідовності допомагає балансувати навантаження. Таким чином, модель АФ виявляється потужним інструментом для оптимізації роботи системи та зменшення гармонічних спотворень при роботі з нелінійними навантаженнями.

Отже, для компенсації створюється струм, який обчислюється у системі координат «dq0», після цього відбувається перетворення в трифазну систему координат «abc». Цей струм служить еталонним компенсаційним струмом і вводиться в трифазний інвертор, який генерує значення компенсаційного струму на основі зворотного зв'язку. Компенсаційний струм вводиться в мережу через трифазний інвертор. Струм відповідної фази подається через дросель. Згідно з законом Кірхгофа, струми складаються так, що симетричний синусоїдальний струм споживається від джерела незалежно від струму навантаження.

Не зважаючи на суттєві переваги, недолік наведеної схеми полягає в тому, що при більшій асиметрії та нелінійності навантаження втрати потужності на фільтрацію струму пропорційно зростають.

З рис. 7,б видно, що АФ, який є інвертором з калькулятором струмів компенсації на основі d-q теорії, впорався з задачею компенсації, зменшивши THD₁ до рівня 3,93%, що відповідає стандартам, подавши струми компенсації, зображені на рис. 5,б у протилежній фазі до струмів, що компенсуються.

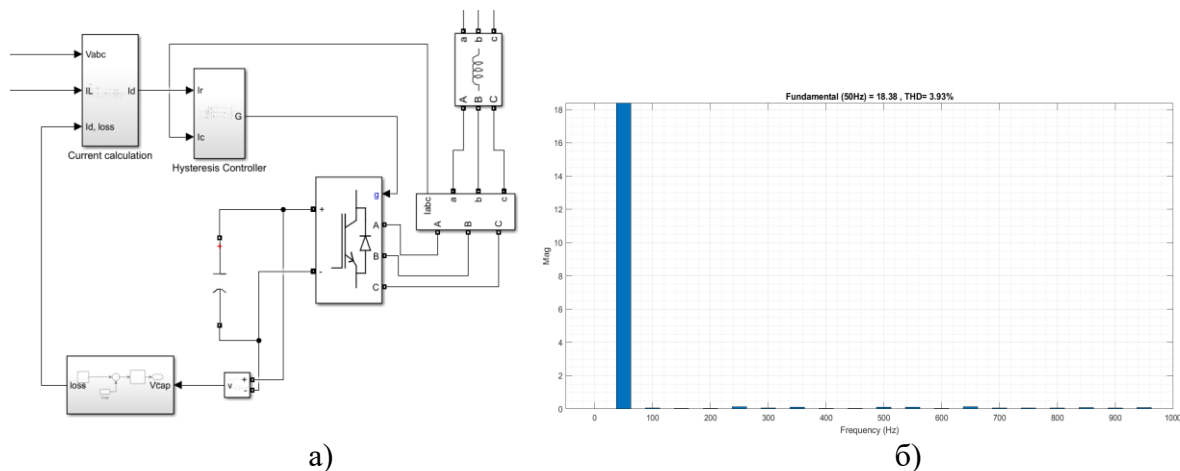


Рис. 7 – Модель активного фільтра в середовищі Matlab Simulink (а) та результати швидкого розкладу Фур'є струму верхньої сторони трансформатора (б)

Додатково важливо відзначити, що АФ здатний підтримати ККД системи на рівні 99%, споживаючи невелику кількість енергії на компенсацію. При цьому фільтр сам адаптувався до різних ситуацій, а саме змінення кута управління тиристорами.

За результатами моделювання можна зробити висновок про те, що АФ впорався з компенсацією гармонік струму і реактивної потужності набагато краще, ніж ПФ, але при цьому спостерігалось збільшення споживання активної потужності.

Висновки

Для глибокого аналізу впливу нелінійного навантаження на електричну мережу було обрано систему «імпульсний перетворювач – двигун постійного струму». Проведені дослідження шляхом імітаційного моделювання дозволили отримати наступні результати:

– ПФ спотворює напругу та струм. Спотворення збільшуються зі зміною кута управління ПФ від $\pi/6$ до $\pi/2$, призводячи до збільшення ТНД_I на стороні вищої напруги трансформатора до рівня 13,6%, що перевищує допустимі стандартами якості електричної енергії значення;

– ПФ, що складається з 6 блоків та налаштований на компенсацію 5, 7, 11, 13, 17 та 19 гармонік, дозволяє підвищити ККД до 95-98% та знизити ТНД_I до рівня 6,99%. Але даний показник вище дозволеного стандартом;

– АФ, який є інвертором з калькулятором струмів компенсації на основі d-q теорії, дозволяє зменшити ТНД_I до рівня 3,93%, що відповідає стандартам;

– АФ впорався з завданням компенсації краще, ніж ПФ. Але АФ є більш складним пристроєм, ніж пасивні каскади, а при збільшенні складності мережі зменшується надійність.

Перелік використаних джерел:

1. Effects of harmonics on equipment / Wagner V. E. et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1993. Vol. 8. Iss. 2. Pp. 672-680. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.216874>.
2. Дослідження впливу вищих гармонік струму в мережі живлення на роботу асинхронних двигунів з використанням приладів діагностики / Деменчук Е. В., Шайда В. П., Шилкова Л. В., Юр'єва О. Ю. *Технічна діагностика та неруйнівний контроль*. 2021. № 2. С. 38-45. DOI: <https://doi.org/10.37434/tdnk2021.02.05>.
3. Akagi H., Watanabe E., Aredes M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Wiley-IEEE Press, 2007. 379 p.
4. Stéphane Azebaze Mboving C., Hanzelka Z. Investigation on the performance efficiency of the shunt hybrid active power filter. *Power quality and harmonics management in modern power systems*. IntechOpen, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002734>.
5. Czornik J., Haltof M. Wpływ filtrów harmoniczných na poprawę parametrów energii elektrycznej w punkcie przyłączenia. *Przegląd elektrotechniczny*. 2020. Vol. 96. Iss. 3. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.15199/48.2020.03.11>.
6. Azebaze M. C. S. Investigation on the work efficiency of the LC passive harmonic filter chosen topologies. *Electronics*. 2021. Vol. 10. Iss. 896. Pp. 1-35. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10080896>.
7. Varetsky Y. Switching on power harmonic filters. *Energy engineering and control systems*. 2018. Vol. 4. No. 2. Pp. 51-58. DOI: <https://doi.org/10.23939/jeecs2018.02.051>.
8. Yadav V. K., Mehta G. Power quality improvement with harmonic reduction using P-Q theory-based shunt active power filter. *Smart energy and advancement in power technologies*. 2022. Pp. 1-16. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4975-3_1.
9. Swain S. D., Ray P. K., Mohanty K. B. Improvement of power quality using a robust hybrid series active power filter. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2017. Vol. 32. Iss. 5. Pp. 3490-3498. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2586525>.
10. Power quality improvement in 3-phase power system with shunt active filter using synchronous detection method / Dadhich A., Sharma J., Kumawat S., Tandon A. *International Journal of Electrical, Electronics and Computers*. 2021. Vol. 6. Iss. 3. Pp. 92-95. DOI: <https://dx.doi.org/10.22161/eec.63.12>.
11. Das N., Mude S. Power quality improvement of three phase system using shunt active power filter. *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and*

Control Engineering. 2017. Vol. 5. Iss. 3. Pp. 23-26. DOI: <https://doi.org/10.17148/IJIREEICE.2017.5305>.

12. El-Habrouk M., Darwish M. K., Mehta P. Active power filters: A review. *IEE Proceedings – Electric Power Applications*. 2000. Vol. 147. Iss. 5. Pp. 403-413, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20000522>.

References:

1. V.E. Wagner et al., «Effects of harmonics on equipment», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, iss. 2, pp. 672-680, 1993. doi: **10.1109/61.216874**.
2. E.V. Demenchuk, V.P. Shaida, L.V. Shylkova, and O.Iu. Yurieva, «Doslidzhennia vplyvu vyshchikh harmonik strumu v merezhi zhyvlennia na robotu asynkhronnykh dvyhuniv z vykorystanniam pryladiv diahnostryky» [«Investigation of the influence of higher current harmonics in the power supply network on the operation of asynchronous motors using diagnostic devices»], *Технічна діагностика та неруйнівний контроль – Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing*, № 2, pp. 38-45, 2021. doi: **10.37434/tdnk2021.02.05**. (Ukr.)
3. H. Akagi, E. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. Wiley-IEEE Press Publ, 2007.
4. C. Stéphane Azebaze Mboving, and Z. Hanzelka, «Investigation on the performance efficiency of the shunt hybrid active power filter», *Power quality and harmonics management in modern power systems*, 2023. doi: **10.5772/intechopen.1002734**.
5. J. Czornik, and M. Haltof, «Wpływ filtrów harmoniczych na poprawę parametrów energii elektrycznej w punkcie przyłączenia» [«The impact of harmonic filters on improving electrical energy parameters at the connection point»], *Przegląd elektrotechniczny*, vol. 96, iss. 3, pp. 1-5, 2020. doi: **10.15199/48.2020.03.11**. (Pol.)
6. M.C.S. Azebaze, «Investigation on the work efficiency of the LC passive harmonic filter chosen topologies», *Electronics*, vol. 10, iss. 896, pp. 1-35, 2021. doi: **10.3390/electronics10080896**.
7. Y. Varetsky, «Switching on power harmonic filters», *Energy engineering and control systems*, vol. 4, no. 2, pp. 51-58, 2018. doi: **10.23939/jeecs2018.02.051**.
8. V.K. Yadav, and G. Mehta, «Power quality improvement with harmonic reduction using P-Q theory-based shunt active power filter», *Smart energy and advancement in power technologies*, pp.1-16, 2022. doi: **10.1007/978-981-19-4975-3_1**.
9. S.D. Swain, P.K. Ray, K.B. Mohanty, «Improvement of power quality using a robust hybrid series active power filter», *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, iss. 5, pp. 3490-3498, 2017. doi: **10.1109/tpel.2016.2586525**.
10. A. Dadhich, J. Sharma, S. Kumawat, and A. Tandon, «Power quality improvement in 3-phase power system with shunt active filter using synchronous detection method», *International Journal of Electrical, Electronics and Computers*, vol. 6, iss. 3, pp. 92-95, 2021. doi: **10.22161/eec.63.12**.
11. N. Das, and S. Mude, «Power quality improvement of three phase system using shunt active power filter», *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, vol. 5, iss. 3, pp. 23-26, 2017. doi: **10.17148/ijireeice.2017.5305**.
12. M. El-Habrouk, M.K. Darwish, and P. Mehta, «Active power filters: A review», *IEE Proceedings – Electric Power Applications*, vol. 147, iss. 5, pp. 403-413, 2000. doi: **10.1049/ip-epa:20000522**.

Стаття надійшла 12.03.2024

Стаття прийнята 08.04.2024

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.5

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310687

© Ісаєв А.Б.¹, Мірошніченко В.І.², Койфман О.О.³, Сімкін О.І.⁴

ЗАСТОСУВАННЯ ДВОСХІДЧАСТОГО ВХІДНОГО ВПЛИВУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ДИНАМІЧНОГО ВІДХИЛЕННЯ ПЕРЕХІДНОГО ПРОЦЕСУ ЗА ЗАВДАННЯМ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ

Встановлено, що застосування двосхідчастого вхідного впливу за завданням в системах автоматичного регулювання (САР) призводить до зменшення значення максимального динамічного перевищення перехідного процесу більш ніж в три рази порівняно з односхідчастим. Визначено інтервал часу між східцями впливу, що дозволяє досягти найбільшої ефективності, а також наведено метод його визначення. Запропонована методика може бути використана для підвищення точності регулювання в САР, в яких регульований параметр повинен змінюватися східчасто, наприклад, в системах керування температурою в нагрівальних пристроях.

Ключові слова: односхідчастий вхідний вплив, двосхідчастий вхідний вплив, лінійно зростаючий вхідний вплив, динамічна помилка, статичний об'єкт керування.

A.B. Isaiev, V.I. Miroshnychenko, O.O. Koyfman, O.I. Simkin. Application of two-step input to reduce overshoot of the transient response at automated control systems. The problems of quality improving for technology control are very important and are considered in works on the theory of automatic control and related fields. Various approaches to solving the problems are known especially by the decreasing overshoot of step response. To provide this the most of existing methods require: to adjust a controller parameters; development of a mathematical model of a controlled object; additional filters applications, that as a whole is difficult to implement under industrial conditions. The authors have proposed another approach to solving the above problems, contrary to the known ones. Namely, to apply two successive inputs with lower amplitudes and delay in time instead of the known one step input. The response of the controlled system on the complex two step inputs was considered and the optimal time delay was defined. The investigations were conducted by the modelling a typical classic linear automation control system that consists of a static control object of the first order with time delay, proposal - integration - difference controllers. The modelling results for a transient under the various applied one and two step inputs, including their ramp variation were obtained. It was shown that the two-step inputs with their ramp application gives the decreasing of the maximum displacement for a transient in a typical control system: more than 3 times increase was shown comparing with the one-step approach. The optimal time interval between the steps was determined that leads to the maximum effectiveness of the technology application. The procedure to define the details of the approach application was developed.

¹ ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-5966-4886, isaev_a_b@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-5956-7867, v.i.miroshnychenko@mipolytech.education

³ канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0003-2075-7417, aleksey.koyfman@mipolytech.education

⁴ канд. техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-9939-7866, a.i.simkin@mipolytech.education

Key words: step response, two-step response, ramp response, overshoot, control system.

Постановка проблеми. Однією із визначальних характеристик якості роботи систем керування є максимальне динамічне відхилення (*overshoot*). Цей показник характеризує реакцію системи керування на різкі зміни режимів роботи технологічного агрегату та можливе перевищення регульованим параметром його заданого значення.

У системах програмного керування наслідком стрибкоподібної зміни заданого значення регульованого параметра (уставки) є перехідний процес за завданням. При цьому, у випадку наявності в об'єкта властивості саморегулювання, його вихідна величина досягає нового рівноважного значення зазвичай з певною інерційністю. В умовах промислового виробництва такі процеси мають місце, наприклад, у системі керування температурою в нагрівальних пристроях. Величина максимального відхилення регульованого параметру залежить від динамічних властивостей об'єкта керування та налаштувань регулятора, що переважно є умовно постійними в процесі роботи агрегату. Також наявна прямопропорційна її залежність від значення східчастої зміни уставки. Суттєве перевищення поточним значенням заданого є небажаним явищем для більшості технологічних процесів, тому актуальним завданням є зменшення максимального динамічного відхилення при перехідних процесах за завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання підвищення якості регулювання мають важливе значення та розглядаються в роботах з теорії автоматичного управління та суміжних галузей.

У роботі [1] наведено математичні моделі традиційних систем фазового автопідстроювання (ФАП) та фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) із принципом керування за відхиленням, проаналізовано динамічні характеристики цих систем, визначено показники якості відповідних перехідних процесів. Показана можливість підвищення якості роботи систем традиційних ФАП та ФАПЧ шляхом побудови комбінованих систем введенням розімкнених компенсаційних зв'язків щодо збурення, а також диференціальних зв'язків.

У роботі [2] сформовано векторно-матричну модель регулятора управління зі зворотним зв'язком за станом, виведено аналітичну формулу для визначення коефіцієнтів корекції для забезпечення нульової помилки усталеного керування.

У статті [3] представлено конструкцію надійних регуляторів без перевищення для регулювання вихідного сигналу для безперервної лінійно-інваріантної системи зворотного зв'язку на основі стану з багатьма входами та багатьма виходами. У цьому методі проектування регулятора для дескрипторної системи використовується техніка інтегрального ковзного режиму разом з узагальненим методом призначення власної структури Мура та теорією вихідного регулювання для дескрипторної системи для забезпечення надійного регулювання виходу з недопущенням перевищення. Продемонстровано ефективність роботи запропонованого регулятора за допомогою числового прикладу та результатів моделювання.

У роботі [4] розглянуто класичну задачу точного регулювання продуктивності для інваріантного об'єкта з лінійним часом. Виходячи з припущення, що існує або регулятор зворотного зв'язку стану, або регулятор зворотного зв'язку вимірювання, наведені методи проектування для отримання регулятора, який дозволяє уникнути перевищення та недосягання заданого значення перехідної характеристики.

У статті [5] представлена структура пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулятора для монотонних, неперевисуючих вихідних реакцій об'єктів керування другого порядку, які не потребують початкового сталого стану. Запропонована схема застосовна до двічі диференційованих характеристик, монотонні реакції без перевищення досягаються компенсацією початкового значення інтегральної складової стану. У запропонованій схемі початкове значення інтегрального зворотного зв'язку є нелінійною функцією початкового стану об'єкта керування. Такий підхід на практиці застосовується для пошарового управління стрибками і однокільного управління стрибками оптичного дисководу. Наведені експериментальні результати підтверджують ефективність запропонованої схеми та її застосовність до систем управління перемиканням режимів.

У роботі [6] представлена еталонна схема регулятора для пом'якшення перевищення в системі управління відстеженням. Запропонована схема, відома як еталонний регулятор із

динамічним обмеженням, переосмислює проблему пом'якшення перевищення як проблему управління обмеженнями. Результатом цього переформулювання є динамічна максимально допустима множина, яка змінюється в реальному часі як функція опорного сигналу. Еталонний регулятор із динамічним обмеженням використовує динамічну максимально допустиму множину, а також нову логіку перемикавання для модифікації опорного сигналу, щоб запобігти або пом'якшити перевищення. Наведені кілька властивостей динамічної максимально допустимої множини та алгоритмів, необхідних для її обчислення. Також наведені результати досліджень стабільності та рекурсивної доцільності еталонного регулятора із динамічним обмеженням, які демонструють ефективність підходу, а також підкреслюють його обмеженість.

У статті [7] для налаштування ПД-регулятора пропонується використовувати метод перевищення заданого значення, який ґрунтується на використанні адаптивного коефіцієнта підсилення, який визначається в залежності величини динамічного перевищення, що допомагає регулятору бути більш агресивним, коли помилка має велике значення, і більш плавним, коли помилка малого значення. Також пропонується використання фільтр першого порядку на вході регулятора для згладжування шуму. Системи з високим часом затримки або з нелінійними характеристиками можуть не реагувати сприятливо на цей метод. Також використання такого підходу може призвести до прискореного зносу виконавчої та регулюючої апаратури.

У статті [8] представлено фільтр заданого значення першого порядку, призначений для зменшення динамічного перевищення для низькопорядкових процесів. Запропонований метод потребує інформації про пікове перевищення та піковий час спрацьовування системи незалежно від типу і порядку роботи системи з довільними параметрами ПД.

Авторами [9] розглянуто спосіб зменшення динамічного перевищення при регулюванні для нестабільних систем першого порядку з часовою затримкою за допомогою каскадного регулятора. Компенсатор з фазовим зсувом у внутрішньому контурі регулювання проектується на основі діаграми Боде системи та бажаного значення фазового запасу та використовується для підвищення фазового запасу системи та покращення її стійкості. ПД-регулятор в зовнішньому контурі забезпечує управління системою з надійною, зниженою реакцією, і, таким чином, зменшення перевищення в часовій характеристиці. До недоліків такого підходу можна віднести залежність від параметрів ПД-контролера та компенсатора, а також додаткові обчислення для реалізації каскадного контролера.

В роботі [10] запропоновано метод оцінки ефективності контурів з ПД-регуляторами, призначеними для нестабільних процесів, для аналізу якості перехідних процесів як по завданню, так і за збуреннями. Для налаштування регулятора автори використовують безрозмірний індекс продуктивності, розроблений з урахуванням методу прямого синтезу для проектування ПД-регуляторів, як відношення теоретичної та фактичної інтегральної абсолютної помилки, отриманої з реакції замкнутого контуру на східчасту та зростаючу зміну заданого значення та збурення навантаження.

Автори [11] для підвищення якості регулювання застосовують ПД-регулятор з фіксованим значенням ваги для структури керування, яка використовує переваги ПД-регулятора з двома ступенями свободи над класичною формою, що дозволяє одночасно компенсувати збурення та забезпечувати прийнятне динамічне відхилення при зміні уставки як для лінійних, так і для нелінійних систем.

У статті [12] розглядається проста практична техніка для запобігання виходу реактору в аварійний стан, яка полягає в збільшенні заданого значення регулятора температури/тиску з певною швидкістю, але якщо потреба в охолоджуючій рідині зростає занадто сильно, ця зміна зупиняється до тих пір, поки потреба в керуючому впливі не знизиться до нормального рівня.

У роботі [13] проілюстровано достатність максимальної чутливості як параметра налаштування для конструкції регулятора та надано рекомендації щодо вибору цього параметра налаштування для плавного та жорсткого керування для стабільних моделей процесів процесу першого і другого порядку із запізненням. Крім того, представлена емпірична залежність між перевищенням і нормалізованим параметром фільтра ІМС для полегшення налаштування регулятора за визначеним користувачем значенням перевищення. Також для запобігання раптових змін, які можуть викликати нестабільність об'єкта керування застосовують програмне регулювання (set

point ramping), що передбачає зміни вхідного впливу за завданням за лінійною функцією із здалегідь визначеною швидкістю [14].

В промислових умовах лінійний зростаючий вплив за завданням для технологічних параметрів, таких як тиск або швидкість потоку, допомагає забезпечити стабільність і оптимізувати продуктивність. Проаналізовані роботи пропонують різні підходи до підвищення якості регулювання за завданням за рахунок зменшення динамічного перевищення. Для досягнення цієї мети більшість з методів передбачає зміни в налаштуваннях регулятора, наявність моделі об'єкта управління, застосування додаткових фільтрів, що ускладнює реалізацію в умовах промислового виробництва. Тому авторами пропонується інший підхід для підвищення якості регулювання.

Метою статті є дослідження впливу заміни стрибкоподібної зміни уставки відповідним двосхідчастим вхідним впливом в системі із замкнутим контуром, в результаті чого передбачається підвищення динамічної точності регулювання шляхом зменшення значення динамічного перевищення регульованого параметру. Для реалізації вищевказаного слід визначити часовий інтервал між східчастими вхідними впливами, змодельовати відповідні реакції замкнутого контуру з об'єктом першого порядку із запізненням та ПІД-регулятором на обидва типи змін уставки, а також проаналізувати вплив параметрів моделі системи регулювання на результати моделювання.

Виклад основного матеріалу. Очевидно, що реакція системи керування на вхідні збурення, як за завданням, так і по навантаженню, залежить від властивостей об'єкта керування та структури й налаштування регулятора.

Пропонується замінити одноразовий стрибкоподібний вхідний вплив двома послідовними впливами меншої амплітуди, зсунутими в часі один щодо одного (рис. 1). Очевидно, що кожен такий вплив буде викликати менше динамічне перевищення і очікується, що точність регулювання підвищиться.

Для дослідження розглянемо типову класичну лінійну систему автоматичного регулювання, що складається із статичного об'єкта управління першого порядку із запізненням та ПІД-регулятора.

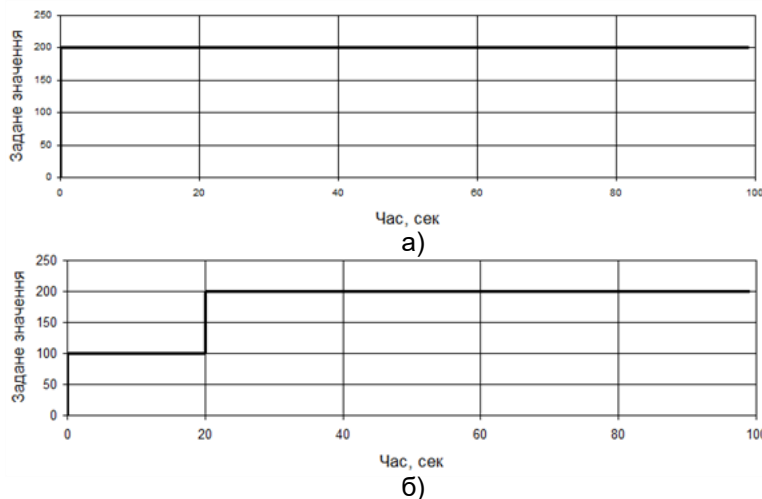


Рис. 1 – Вхідні впливи: а) односхідчастий, б) двосхідчастий

Графік перехідного процесу (рис. 2, а), який побудований за результатами моделювання при односхідчастому вхідному впливі за завданням, використовується в подальшому як вихідний варіант для порівняння з результатами наступних експериментів. Максимальне динамічне відхилення $X_1 = 326,59 - 200 = 126,59$.

Для реалізації двосхідчастої уставки попередньо визначено час між східцями $\Delta t_{\text{зад}}$ рівним чверті періоду коливаний, що відповідає моменту досягнення регульованим параметром САР першого максимуму коливаний X_1 (рис. 2, а), коли подальше зростання в результаті першого стрибка

вхідного впливу припиняється. За результатами моделювання (рис. 2, б), де максимальне динамічне відхилення зменшено більш ніж удвічі: $X_1 = 260,27 - 200 = 60,27$, можна зробити висновок про ефективність застосування двосхідчастої зміни уставки.

Для визначення моменту часу, в який подача другої частини уставки буде найбільш ефективною, була використана властивість суперпозиції досліджуваної САР. Реакція системи на складний двосхідчастий вхідний вплив розглянута як сума реакцій на два простих односхідчастих впливи.

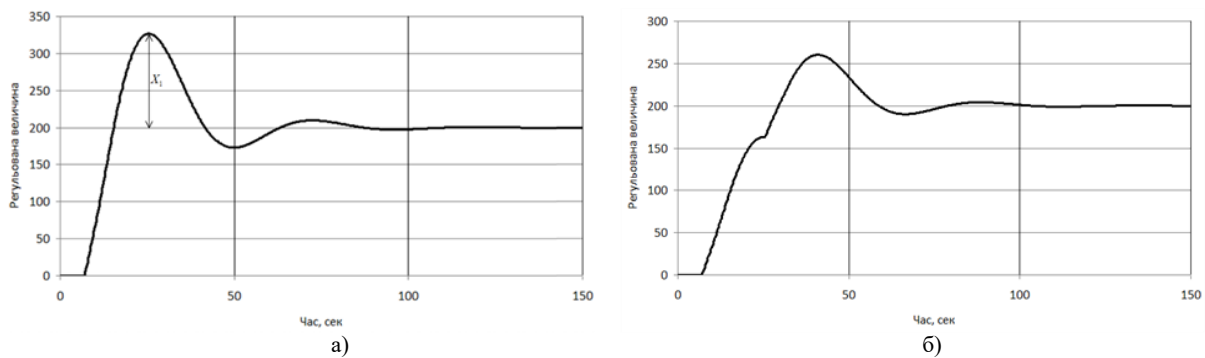


Рис. 2 – Перехідні процеси: а) типовий перехідний процес за завданням; б) при двосхідчастому вхідному впливі зі зсувом на чверть періоду коливань

Для ілюстрації застосування принципу суперпозиції на рис. 3, а наведені складові перехідного процесу, кожна з яких є реакцією системи управління на окрему частину вхідного впливу (рис. 1, б). Зсув у часі для вказаних складових відповідає схидам вхідного впливу, максимальне динамічне перевищення для кожної складає $X_1 = 163,30 - 100 = 63,30$, що дорівнює половині максимального динамічного перевищення вихідного перехідного процесу (рис. 2, а). Аналіз форми і розташування графіків (рис. 3, а) призводить до висновку, що зсув за часом між схидами уставки повинен мати таку величину, щоб перший мінімум першого перехідного процесу збігався в часі з першим максимумом другого перехідного процесу (рис 3, б). Таким чином буде досягнуто найбільш ефективної їхньої взаємної компенсації.

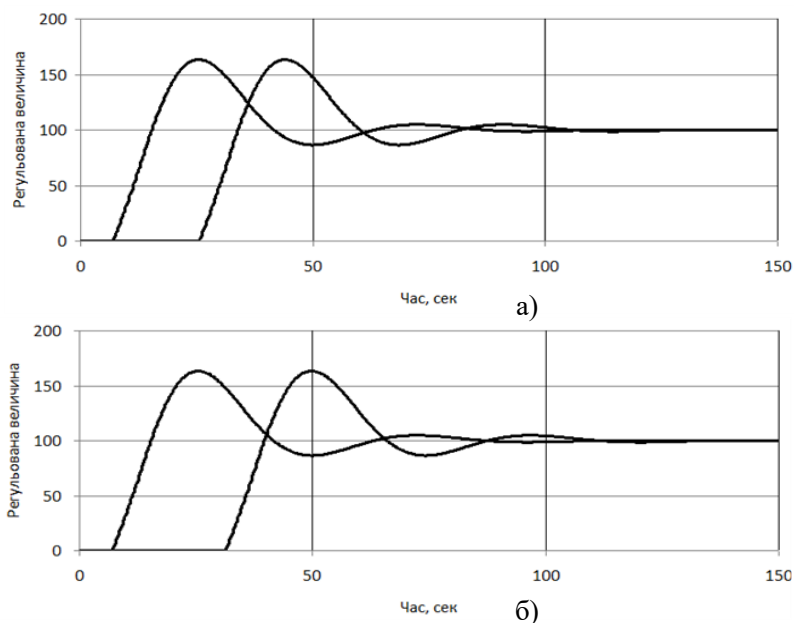


Рис. 3 – Складові перехідного процесу, що відповідають двом схидам вхідного впливу: а) зі зсувом на чверть періоду коливань, б) зі зсувом до другого екстремуму

Результат моделювання роботи САР із двосхідчастим вхідним впливом, східці якого зсунуті на запропонований час, наведено на рис. 4. Максимальне динамічне відхилення цього перехідного процесу становить $X_1 = 249,81 - 200 = 49,81$, що більш ніж у 2,5 рази менше порівняно з перехідним процесом для односхідчастого вхідного впливу (рис. 2, а). Додаткові експерименти показали, що зменшення або збільшення часу між східцями вхідного впливу призводить до збільшення динамічного відхилення перехідних процесів. Таким чином, отримано мінімальне екстремальне значення максимального динамічного відхилення.

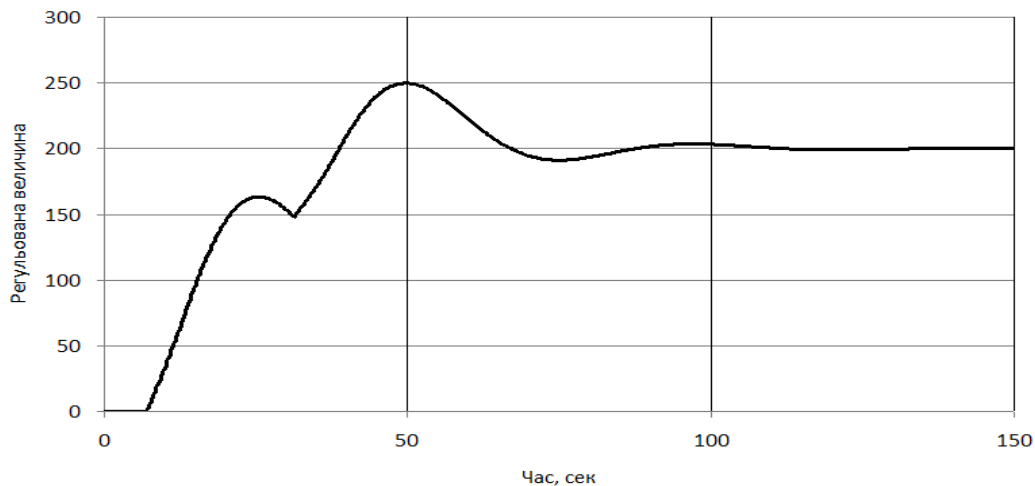


Рис. 4 – Реакція САР на двосхідчастий вхідний вплив з ефективним зсувом східців у часі

У лінійній САР форма, співвідношення амплітуд коливань і часові параметри перехідних процесів не залежать від величини вхідного впливу, а визначаються лише внутрішніми властивостями об'єкта керування та регулятора. Це дозволяє визначити інтервал часу, на який повинні бути зсунуті східці вхідного впливу та використовувати його для будь-яких процесів регулювання за завданням в конкретній САР. Для цього необхідно експериментально отримати реакцію САР на будь-який односхідчастий вхідний вплив (рис. 5), визначити моменти часу першого максимуму τ_1 і першого мінімуму τ_2 , обчислити ефективний інтервал часу для зсуву східців вхідного впливу в часі за формулою:

$$\Delta\tau_{\text{зад}} = \tau_2 - \tau_1. \tag{1}$$

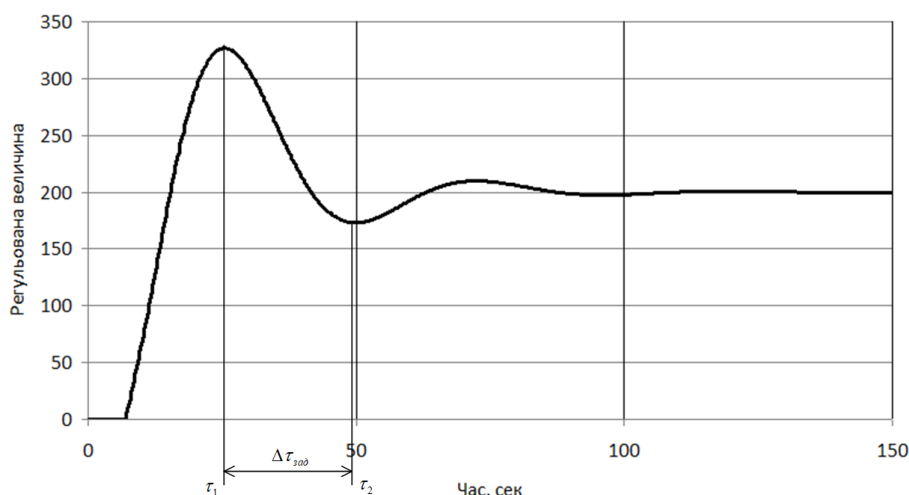


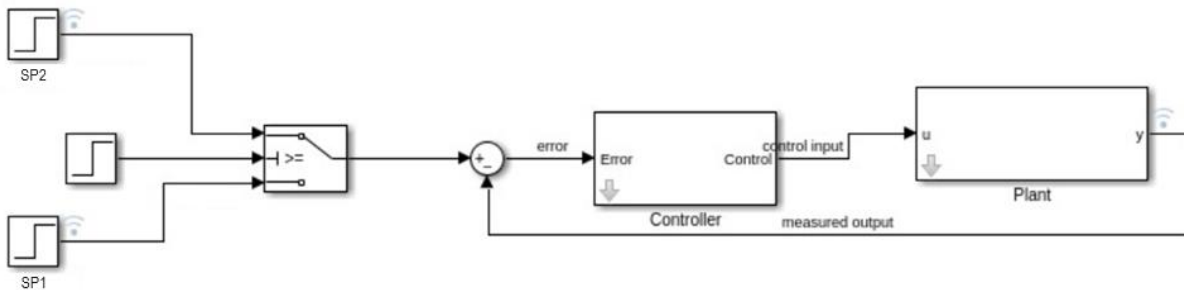
Рис. 5 – Визначення часу зсуву між ступенями входної дії

Для підтвердження отриманих результатів авторами було проведено дослідження із визначення максимального динамічного відхилення перехідних процесів для різних варіантів формування уставки з використанням вибірки з дослідження [15]. Для кожної з 55 кривих розгону було обрано параметри об'єкта керування ($K_{об}$, $T_{об}$, $\tau_{об}$), які відповідають мінімальному значенню відносного залишкового відхилення, максимальному значенню коефіцієнта детермінації та забезпечують досягнення вихідною величиною сталого значення за період $5 \cdot T_{об}$.

Алгоритм дослідження для кожної кривої розгону передбачав наступні кроки:

Крок 1. Визначено налаштування ПІД-регулятора, що забезпечують перехідний процес із 40% перерегулюванням, та змодельовано реакцію САР на односхідчасту зміну уставки. Визначено максимальне динамічне перевищення, що дорівнює 0.342.

Крок 2. Розраховано час зсуву східців входного впливу за формулою (1) та змодельовано перехідний процес в САР, параметри якої не змінюються, з реалізацією двосхідчастого входного впливу за схемою (рис. 6). Визначено максимальне динамічне перевищення (0,307).



SP1 – односхідчаста уставка, SP2 – двоосхідчаста уставка

Рис. 6 – Схема моделі САР з реалізацією двосхідчастого входного впливу

Крок 3. Експериментально підібрано кут нахилу рампи (швидкість зміни заданого значення до досягнення сталого) таким чином, щоб забезпечити невелику відмінність часу регулювання відповідної реакції САР в порівнянні з перехідним процесом, спричиненим двосхідчастою зміною уставки. Змодельовано перехідний процес в САР, параметри якої не змінюються, з реалізацією програмного входного впливу за схемою (рис. 7). Визначено максимальне динамічне перевищення, що дорівнює 0,311.

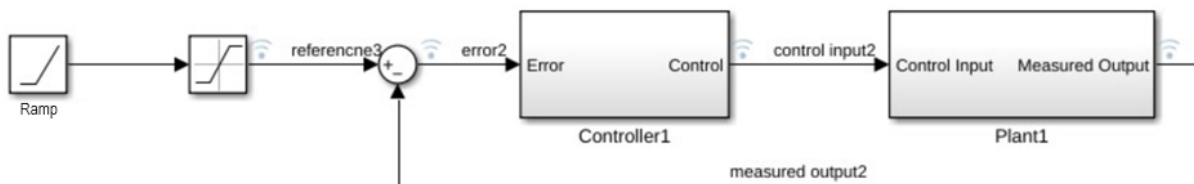
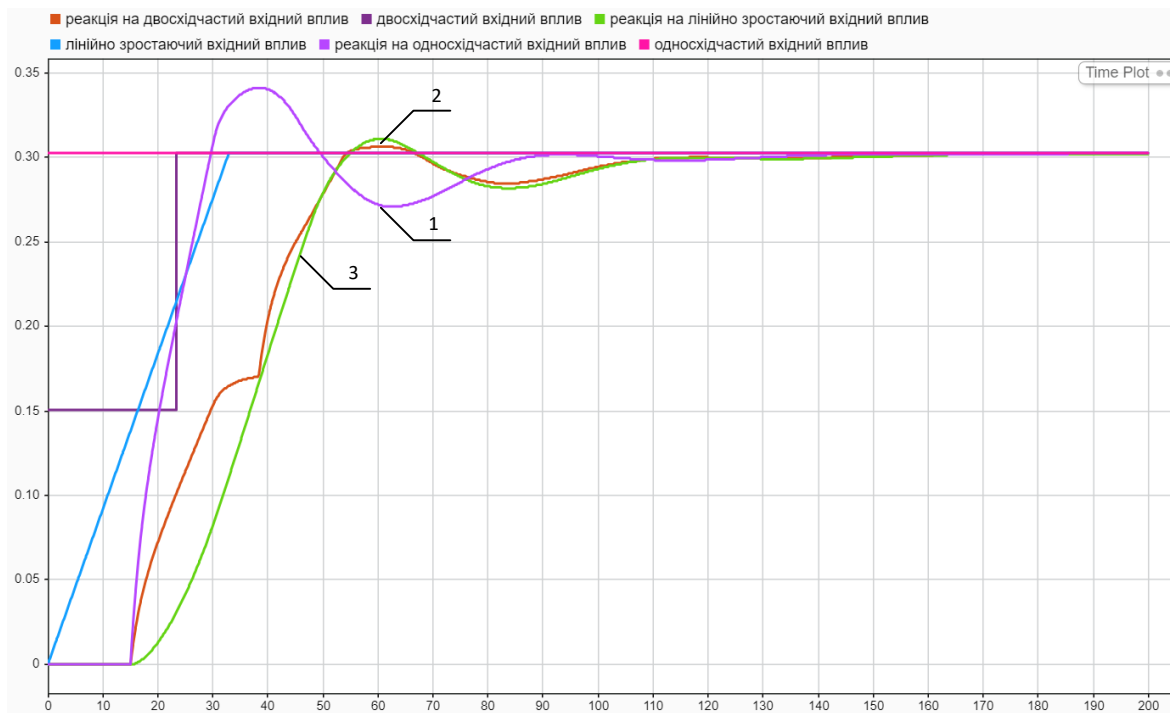


Рис. 7 – Схема моделі САР з реалізацією програмного входного впливу (Ramp)

На рис. 8 наведено графічне порівняння для різних реалізацій формування заданого значення.



1 – реакція на односхідчастий вхідний вплив, 2 – реакція на двосхідчастий вхідний вплив, 3 – реакція на програмний вхідний вплив (ramp)

Рис. 8 – Графічне порівняння перехідних процесів при різному способі формуванні заданого значення:

На рис. 9 та в табл. 1 наведено отримані результати для кожної кривої розгону вибірки [15]. Для деяких кривих розгону проведено масштабування абсолютних значень (x100) для зручності відображення результатів.

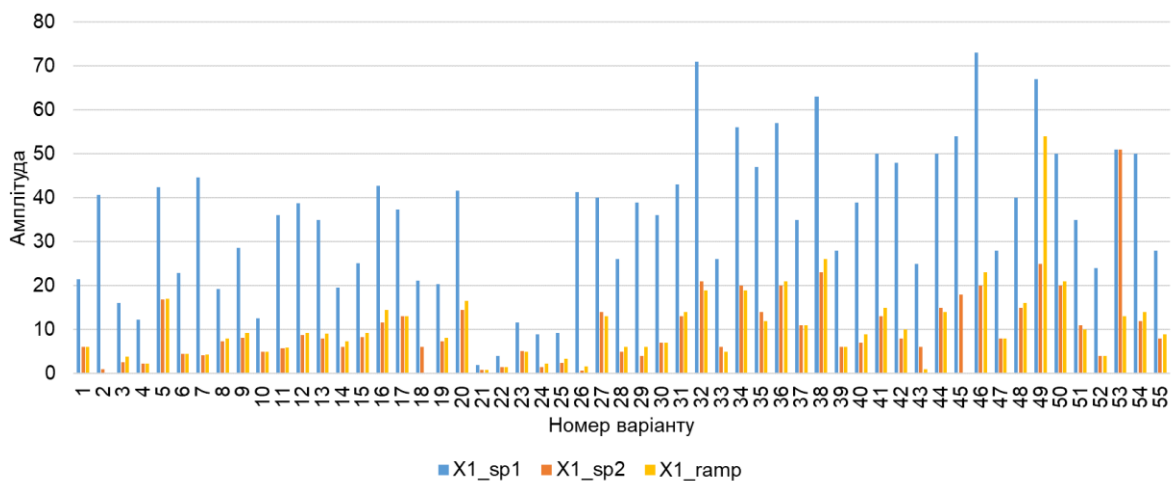


Рис. 9 – Результати дослідження: амплітуди максимального динамічного відхилення при застосуванні уставки: односхідчастої (X1_sp1), двосхідчастої (X1_sp2), програмної (X1_ramp)

Таблиця 1

Результати дослідження

Номер експе-римен-нту	Вхідний вплив			Порівняння				
	X_{1_sp1}	X_{1_sp2}	X_{1_ramp}	$\frac{X_{1_sp1}}{X_{1_sp2}}$	$\frac{X_{1_sp2}}{X_{1_sp1}}$	$\frac{X_{1_sp1}}{X_{1_ramp}}$	$\frac{X_{1_ramp}}{X_{1_sp1}}$	$X_{1_sp2} < X_{1_ramp}$
1	21,4	6	6,10	3,57	0,28	3,51	0,29	1
2	40,7	1	0,00	40,70	0,02	-	0,00	0
3	16	2,6	3,80	6,15	0,16	4,21	0,24	1
4	12,2	2,3	2,30	5,30	0,19	5,30	0,19	1
5	42,4	16,9	17,00	2,51	0,40	2,49	0,40	1
6	22,82	4,5	4,50	5,07	0,20	5,07	0,20	1
7	44,7	4,1	4,40	10,90	0,09	10,16	0,10	1
8	19,2	7,4	7,90	2,59	0,39	2,43	0,41	1
9	28,6	8,1	9,20	3,53	0,28	3,11	0,32	1
10	12,6	4,9	4,90	2,57	0,39	2,57	0,39	1
11	36,1	5,8	5,90	6,22	0,16	6,12	0,16	1
12	38,8	8,7	9,30	4,46	0,22	4,17	0,24	1
13	34,9	7,9	9,10	4,42	0,23	3,84	0,26	1
14	19,5	6,1	7,40	3,20	0,31	2,64	0,38	1
15	25,1	8,3	9,30	3,02	0,33	2,70	0,37	1
16	42,8	11,7	14,50	3,66	0,27	2,95	0,34	1
17	37,4	13,1	13,10	2,85	0,35	2,85	0,35	1
18	21,2	6	0,00	3,53	0,28	-	0,00	0
19	20,4	7,4	8,20	2,76	0,36	2,49	0,40	1
20	41,7	14,5	16,50	2,88	0,35	2,53	0,40	1
21	1,929	0,9	0,80	2,14	0,47	2,41	0,41	0
22	4	1,5	1,50	2,67	0,38	2,67	0,38	1
23	11,7	5,1	4,90	2,29	0,44	2,39	0,42	0
24	9	1,5	2,20	6,00	0,17	4,09	0,24	1
25	9,2	2,4	3,40	3,83	0,26	2,71	0,37	1
26	41,3	0,7	1,60	59,00	0,02	25,81	0,04	1
27	40	14	13,00	2,86	0,35	3,08	0,33	0
28	26	5	6,00	5,20	0,19	4,33	0,23	1
29	39	4	6,00	9,75	0,10	6,50	0,15	1
30	36	7	7,00	5,14	0,19	5,14	0,19	1
31	43	13	14,00	3,31	0,30	3,07	0,33	1
32	71	21	19,00	3,38	0,30	3,74	0,27	0
33	26	6	5,00	4,33	0,23	5,20	0,19	0
34	56	20	19,00	2,80	0,36	2,95	0,34	0
35	47	14	12,00	3,36	0,30	3,92	0,26	0
36	57	20	21,00	2,85	0,35	2,71	0,37	1
37	35	11	11,00	3,18	0,31	3,18	0,31	1
38	63	23	26,00	2,74	0,37	2,42	0,41	1
39	28	6	6,00	4,67	0,21	4,67	0,21	1
40	39	7	9,00	5,57	0,18	4,33	0,23	1
41	50	13	15,00	3,85	0,26	3,33	0,30	1
42	48	8	10,00	6,00	0,17	4,80	0,21	1
43	25	6	1,00	4,17	0,24	25,00	0,04	0
44	50	15	14,00	3,33	0,30	3,57	0,28	0

Продовження таблиці 1

Номер експерименту	Вхідний вплив			Порівняння				
	X_{1_sp1}	X_{1_sp2}	X_{1_ramp}	$\frac{X_{1_sp1}}{X_{1_sp2}}$	$\frac{X_{1_sp2}}{X_{1_sp1}}$	$\frac{X_{1_sp1}}{X_{1_ramp}}$	$\frac{X_{1_ramp}}{X_{1_sp1}}$	$X_{1_sp2} < X_{1_ramp}$
45	54	18	0,00	3,00	0,33	-	0,00	0
46	73	20	23,00	3,65	0,27	3,17	0,32	1
47	28	8	8,00	3,50	0,29	3,50	0,29	1
48	40	15	16,00	2,67	0,38	2,50	0,40	1
49	67	25	54,00	2,68	0,37	1,24	0,81	1
50	50	20	21,00	2,50	0,40	2,38	0,42	1
51	35	11	10,00	3,18	0,31	3,50	0,29	0
52	24	4	4,00	6,00	0,17	6,00	0,17	1
53	51	51	13,00	1,00	1,00	3,92	0,25	0
54	50	12	14,00	4,17	0,24	3,57	0,28	1
55	28	8	9,00	3,50	0,29	3,11	0,32	1

На підставі отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

1. При застосуванні двохсхідчастого вхідного впливу для підвищення точності регулювання в одному випадку з вибірки не відбулося зменшення максимального динамічного перевищення. В декількох випадках спостерігається зменшення вказаного параметра на декілька порядків та в середньому в 3,8 рази в порівнянні з односхідчастим вхідним впливом.

2. При використанні програмної уставки в декількох випадках максимальне динамічне перевищення відсутнє, але в середньому його значення зменшується в 3,5 рази в порівнянні з односхідчастим вхідним впливом

3. В 41 випадку з 55 використання двохсхідчастого вхідного впливу зумовило виникнення максимального динамічного перевищення меншої амплітуди в порівнянні з використанням програмної уставки.

Висновки

Аналіз результатів проведених досліджень підтверджує гіпотезу про зменшення максимального динамічного перевищення більш ніж в 2,5 рази при застосуванні двохсхідчастої зміни заданого значення, та, як наслідок, підвищення динамічної точності регулювання. Визначено інтервал часу між східцями вхідного впливу, що забезпечує найбільш ефективну взаємну компенсацію реакцій на зміни уставки, а також запропоновано метод визначення вказаного інтервалу.

Встановлено, що застосування програмної (лінійно зростаючої) зміни уставки забезпечує кращі результати щодо зменшення максимального динамічного перевищення в порівнянні з односхідчастим вхідним впливом. Зважаючи на те, що вказаний тип уставки має програмну реалізацію у більшості сучасних контролерів, проте для забезпечення потрібної якості регулювання вимагає ретельного підбору значень швидкості зміни заданого значення.

Перелік використаних джерел:

1. Повышение динамической точности и быстродействия систем традиционной фазовой автоподстройки и систем фазовой автоподстройки частоты : монографія / В. Кривуца та ін. Київ : Ін-т електродинаміки НАН України, 2013. 227 с. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/Default.aspx?BookID=0000007183>.
2. Repnikova N., Berdnyk Y., Hnyr V. Improving control accuracy in multi-connected digital systems. *Scientific Horizons*. 2022. Vol. 25. No. 7. Pp. 55-64. DOI: [https://doi.org/10.48077/sci-hor.25\(7\).2022.55-64](https://doi.org/10.48077/sci-hor.25(7).2022.55-64).
3. Babu P. S., Xavier N., Bandyopadhyay B. Robust output regulation for state feedback descriptor systems with nonovershooting behavior. *European Journal of Control*. 2020. Vol. 52. Pp. 19-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2019.08.008>.
4. Schmid R., Ntogramatzidis L. Nonovershooting and nonundershooting exact output regulation. *Systems & Control Letters*. 2014. Vol. 70. Pp. 30-37. DOI:

- <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2014.05.003>.
5. Lu Y.-S., Li Y.-T., Liu S.-H. Initial-value compensation of a proportional–integral–derivative controller for non-overshooting motion. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. 2017. Vol. 231. Iss. 8. Pp. 626-637. DOI: <https://doi.org/10.1177/0959651817717854>.
 6. Freiheit C., Anand D. M., Ossareh H. R. Overshoot Mitigation Using the Reference Governor Framework. *IEEE Control Systems Letters*. 2020. Vol. 4. Iss. 2. Pp. 518-523. DOI: <https://doi.org/10.1109/lcsys.2020.2966575>.
 7. Shamsuzzoha M., Skogestad S. The setpoint overshoot method: A simple and fast closed-loop approach for PID tuning. *Journal of Process Control*. 2010. Vol. 20. Iss. 10. Pp. 1220-1234. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.08.003>.
 8. Vijayan V., Panda R. C. Design of a simple setpoint filter for minimizing overshoot for low order processes. *ISA Transactions*. 2012. Vol. 51. Iss. 2. Pp. 271-276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2011.10.006>.
 9. Kumar E. G., Gowthaman E. Cascade PID-lead compensator controller for non-overshoot time responses of unstable system. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 117. Pp. 708-715. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.185>.
 10. Begum G., Radhakrishnan T. K. Performance assessment of control loops involving unstable systems for set point tracking and disturbance rejection. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2018. Vol. 85. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.01.024>.
 11. Abdelaty B. G., Ahmed A. H., Ouda A. N. Fixed set point weighting 2DOF PID controller for control processes. *Journal of engineering mathematics*. 2018. Vol. 2. Iss. 1. Pp. 21-27. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.engmath.20180201.13>.
 12. Luyben W. L. Temperature setpoint-ramp control structure for batch reactors. *Chemical Engineering Science*. 2019. Vol. 208. 115124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2019.07.042>.
 13. Ali A., Majhi S. PI/PID controller design based on IMC and percentage overshoot specification to controller setpoint change. *ISA Transactions*. 2009. Vol. 48. Iss. 1. Pp. 10-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2008.09.002>.
 14. Understanding Setpoint Ramping and Ramp/Soak Temperature Control. URL: <https://www.westcs.com/news/understanding-setpoint-ramping-and-rampsoak-temperature-control/> (дата звернення: 08.12.2023).
 15. Койфман О. О., Мірошниченко В. І., Сімкін О. І. Аналітичне дослідження методів ідентифікації об'єкта керування. *MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education* : Scientific monograph. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023. Pp. 113-147. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-382-8-7>.

References:

1. V.H. Kryvutsa, H.F. Zaitsev, V.L. Bulhach, A.V. Samkov, A.P. Poponevych, and N.V. Hradoboeva, *Povishenye dynamicheskoi tochnosti y bistrodeistviya system tradytsyonnoi fazovoi avtopodstroiky y system fazovoi avtopodstroiky chastoti : monohrafiia* [Improving the dynamic accuracy and performance of traditional phase-locked loop systems and phase-locked loop systems: monograph]. Kyiv, Ukraine: In-t elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2013. (Rus.)
2. N. Repnikova, Y. Berdnyk, and V. Hnyp, «Improving control accuracy in multi-connected digital systems», *Scientific Horizons*, vol. 25, no. 7, pp. 55-64, 2022. doi: **10.48077/scihor.25(7).2022.55-64**.
3. P.S. Babu, N. Xavier, and B. Bandyopadhyay, «Robust output regulation for state feedback descriptor systems with nonovershooting behavior», *European Journal of Control*, vol. 52, pp. 19-25, 2020. doi: **10.1016/j.ejcon.2019.08.008**.
4. R. Schmid, and L. Ntogramatzidis, «Nonovershooting and nonundershooting exact output regulation», *Systems & Control Letters*, vol. 70, pp. 30-37, 2014. doi: **10.1016/j.sysconle.2014.05.003**.
5. Y.-S. Lu, Y.-T. Li, S.-H. Liu, «Initial-value compensation of a proportional–integral–derivative controller for non-overshooting motion», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 231, iss. 8, pp. 626-637, 2017. doi: **10.1177/0959651817717854**.

6. C. Freiheit, D.M. Anand, and H.R. Ossareh, «Overshoot mitigation using the reference governor framework», *IEEE Control Systems Letters*, vol. 4, iss. 2, pp. 518-523, 2020. doi: **10.1109/lcsys.2020.2966575**.
7. M. Shamsuzzoha, and S. Skogestad, «The setpoint overshoot method: A simple and fast closed-loop approach for PID tuning», *Journal of Process Control*, vol. 20, iss. 10, pp. 1220-1234, 2020. doi: **10.1016/j.jprocont.2010.08.003**.
8. V. Vijayan, and R.C. Panda, «Design of a simple setpoint filter for minimizing overshoot for low order processes». *ISA Transactions*, vol. 51, iss. 2, pp. 271-276, 2012. doi: **10.1016/j.isatra.2011.10.006**.
9. E.G. Kumar, and E. Gowthaman, «Cascade PID-lead compensator controller for non-overshoot time responses of unstable system», *Energy Procedia*, vol. 117. pp. 708-715, 2017. doi: **10.1016/j.egypro.2017.05.185**.
10. G. Begum, and T.K. Radhakrishnan, «Performance assessment of control loops involving unstable systems for set point tracking and disturbance rejection», *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 85, pp. 1-17, 2018. doi: **10.1016/j.jtice.2018.01.024**.
11. B.G. Abdelaty, A.H. Ahmed, and A.N. Ouda, «Fixed set point weighting 2DOF PID controller for control processes», *Journal of engineering mathematics*, vol. 2, iss. 1, pp. 21-27, 2018. doi: **10.11648/j.engmath.20180201.13**.
12. W.L. Luyben, «Temperature setpoint-ramp control structure for batch reactors», *Chemical Engineering Science*, vol. 208, art. no. 115124, 2019. doi: **10.1016/j.ces.2019.07.042**.
13. A. Ali, and S. Majhi, «PI/PID controller design based on IMC and percentage overshoot specification to controller setpoint change», *ISA Transactions*, vol. 48, iss. 1, pp. 10-15, 2009. doi: **10.1016/j.isatra.2008.09.002**.
14. Understanding Setpoint Ramping and Ramp/Soak Temperature Control. [Online]. Available: <https://www.west-cs.com/news/understanding-setpoint-ramping-and-rampsoak-temperature-control/>. Accessed on: December 08, 2023.
15. O.O. Koyfman, V.I. Miroshnychenko, and O.I. Simkin, «Analitychne doslidzhennia metodiv identyfikatsii obiekta keruvannia» [«Analytical study of control object identification methods»] in *MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education : Scientific monograph*. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2023, pp. 113-147. doi: **10.30525/978-9934-26-382-8-7**. (Ukr.)

Стаття надійшла 14.04.2024

Стаття прийнята 13.05.2024

**152 МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-
ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА**

УДК 621.317.08

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310688

© Діденко Н.В.*

**АНАЛІЗУВАННЯ МЕТОДІВ ОЦІНЮВАННЯ
ЦІЛЬОВОЇ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Майже 25 років людство займається проблемами оцінювання невизначеності вимірювань. При застосуванні невизначеності не ставиться мета визначити справжнє значення під час вимірювання, наскільки це можливо. Тобто визнається, що інформація, отримана при вимірюванні, дозволяє лише приписати обґрунтований інтервал значень для вимірюваної величини, ґрунтуючись на припущенні, що при виконанні вимірювання не було зроблено помилок. Однак, навіть найточніші вимірювання не можуть зменшити цей інтервал до єдиного значення через кінцеву кількість деталей в описі вимірюваної величини. Інтервал може бути представлений через одне своє значення, що називається «вимірним значенням величини». Багато наукових праць присвячено за ці роки методам оцінювання невизначеності вимірювань. При цьому головний висновок – значення невизначеності залежить від застосованого методу її оцінки. На практиці застосування невизначеності не знайшло широкого застосування. Акредитовані калібрувальні та випробувальні лабораторії повинні вміти оцінювати невизначеність вимірювань. Тому вони вчать методам оцінювання невизначеності, розробляють приклади. Пишуть в системі управління, що оцінка невизначеності результату вимірювань надається за вимогою замовника. Але ні замовник, ні виконавець не розуміють мети її застосування. Тому зараз прийшов час науковцям разом з практиками зайнятися питанням встановлення цільової невизначеності для вирішення конкретних вимірювальних завдань, таких як встановлення відповідності продукції визначеним вимогам, встановлення придатності засобів вимірювальної техніки після калібрування тощо. Таким чином, для застосування на практиці важливо вміти визначати значення цільової невизначеності – значення невизначеності для вимірюваного значення величини, при якому можна вважати вимірне значення достовірним для конкретного практичного застосування.

Ключові слова: вимірювана величина, інтервал значень, максимально допустима похибка, оцінювання невизначеності, цільова невизначеність.

N. Didenko. Analysis of target uncertainty assessment methods. For almost 25 years, mankind has been dealing with the problems of estimating measurement uncertainty. When applying uncertainty, the goal is not to determine the true value during the measurement as far as possible. That is, it is recognized that the information obtained during the measurement allows only to assign a reasonable interval of values for the measured value, based on the assumption that no errors were made during the measurement. However, even the most accurate measurements cannot reduce this interval to a single value due to the finite number of details in the description of the measured value. An interval can be represented by a single value of its own, called the «measured value of the quantity». Over the years, many scientific works have been devoted to methods of estimating the uncertainty of measurements. At the same time, the main conclusion is that the value of uncertainty depends on the applied method of its assessment. In practice, the use of uncertainty has not been widely used. Accredited calibration and testing laboratories must be able to estimate

* канд. техн. наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, ORCID: 0000-0003-3318-438X, nataly.v.didenko@gmail.com

measurement uncertainty. Therefore, they learn uncertainty assessment methods, develop examples. It is written in the management system that the evaluation of the uncertainty of the measurement result is provided at the request of the customer. But neither the customer nor the executor understands the purpose of its application. Therefore, now is the time for scientists, together with practitioners, to deal with the issue of establishing target uncertainty for solving specific measurement tasks, such as establishing compliance of products with specified requirements, establishing the suitability of measuring equipment after calibration, etc. Thus, for practical application, it is important to be able to determine the value of the target uncertainty - the value of uncertainty for the measured value of the quantity at which the measured value can be considered reliable for a specific practical application.

Key words: *measured quantity, interval of values, maximum permissible error, estimation of uncertainty, target uncertainty.*

Постановка проблеми. Згідно із Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1] результати вимірювань можуть бути використані за умови, що їх результати відомі з відповідними характеристиками похибок або невизначеності вимірювань. Таким чином, оцінювання достовірності результату вимірювань можливо на підставі знання нормованого у методиці вимірювання значення похибки або невизначеності вимірювань. З похибками вимірювань проблем немає. Вони нормуються у методиках вимірювань як максимально допустимі похибки або приписані максимальні похибки.

Таким чином, у методиці вимірювань також повинно бути про нормоване максимально допустиме значення невизначеності вимірювань, як цільова невизначеність. В статті наведений огляд можливих методів встановлення значення цільової невизначеності в залежності від наявного завдання вимірювань.

До недоліків щодо нормування максимально допустимого значення невизначеності вимірювань (цільової невизначеності) відноситься те, що відсутність її на практиці не дозволяє встановити достовірність результату вимірювання, одержаного в різних акредитованих випробувальних лабораторіях. Тому факт акредитації лабораторії та вміння її фахівців розраховувати невизначеність проведених вимірювань не доводить достовірність одержаного результату вимірювання. Це приводить до неможливості довести відповідність об'єкта оцінювання встановленим критеріям відповідності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних публікацій [2-7] надає можливість зробити висновок, що проблема встановлення цільової невизначеності ще не розглядається науковцями як актуальна. Враховуючи необхідність та доцільність встановлення цільової невизначеності на практиці для вирішення проблем встановлення відповідності продукції у випробувальних лабораторіях, прийняття продукції замовником виробника та забезпечення достовірності результатів аналізу як в промислових, так і медичних, екологічних лабораторіях, можна зробити висновок про значну актуальність проведення досліджень у цьому напрямку.

Мета статті – на підставі проведеного огляду можливих методів оцінювання цільової невизначеності визначитись які методи можливо застосовувати в залежності від наявного вимірювального завдання.

Виклад основного матеріалу. За міжнародним словником з метрології [8] невизначеність вимірювання, як одна з робочих характеристик методик вимірювання, є невід'ємним параметром, який пов'язаний з результатом вимірювання і який характеризує розкид значень, які могли б бути обґрунтовано приписані вимірюваній величині.

Цей розкид значень формується біля результату вимірювань. Одержання достовірного результату вимірювань пов'язано з вибраною методикою вимірювання у відповідності з поставленим завданням щодо проведення вимірювань. Методика вимірювань може бути міжнародним, регіональним або національним стандартом, або може бути прописана в іншій визнаній специфікації, що містить суттєву стислу інформацію про те, як виконувати діяльність лабораторії щодо проведення вимірювань. Методики вимірювань, розроблені та модифіковані лабораторією, можуть також використовуватися.

Важливо, щоб ця методика надавала можливість одержати результат у відповідності з наявними робочими характеристиками вибраної методики. Такими робочими характеристиками

вибраної методики можуть бути діапазон вимірювань, точність, невизначеність результатів вимірювання, межа виявлення, межа кількісного визначення, вибірковість методу, лінійність, повторюваність або відтворюваність, стійкість до зовнішніх впливів або перехресної чутливості до впливу матриці зразка чи об'єкта випробування та зміщення вимірювання. Однак у разі виконання вимірювань акредитованими випробувальними лабораторіями для них обов'язково вміти оцінювати невизначеність вимірювань. А у разі наявності вимоги замовника або встановлення відповідності продукції слід ще й вміти визначити цільову невизначеність проведених вимірювань для одержання достовірної оцінки відповідності.

Вимірюваними величинами є величини, значення яких можна визначити за допомогою вимірювання. Вимірювання дають можливість отримати кількісне значення величини, виражене числом у відповідній одиниці вимірювання. При вимірюваннях зазвичай мають справу з однією з вимірюваних величин, званої також «вихідною величиною Y », яка через відношення:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

пов'язана з вхідними величинами X_i ($i=1, 2, \dots, N$). Функція моделі f описує одночасно метод вимірювання та метод оцінювання. Вона показує, як значення вихідної величини Y отримується із значень вхідної величини X_i .

Вхідні величини – це ті впливні величини, які впливають на результат вимірювання. Зв'язок вимірюваної величини з впливними величинами є рівнянням вимірювань. І це є першою проблемою під час рішення завдання щодо оцінювання невизначеності вимірювань в лабораторії – як правильно скласти це рівняння. Невизначеність оцінюється саме для кожної впливної величини та в рівняння вимірювань невизначеність не входить.

Як відомо, невизначеність вимірювання, пов'язана з оцінками вхідних величин, визначається за методом оцінки типу А або типу В. Метод А для оцінки стандартної невизначеності – це метод, при якому невизначеність вимірювання оцінюється за допомогою статистичного аналізу ряду спостережень. В цьому випадку стандартна невизначеність вимірювання є експериментальним стандартним відхиленням середнього значення. Для достовірного визначення невизначеності методом А необхідно забезпечити умови повторюваності вимірювань. При цьому на змінність результатів вимірювань, виконаних за однією методикою, крім можливого відхилення між імовірно ідентичними зразками, можуть впливати багато різних факторів, у тому числі:

- оператор, який проводить вимірювання згідно з методикою;
- обладнання, яке використовується;
- калібрування обладнання, тобто забезпечення його відповідності встановленим до нього технічних, а також метрологічних характеристик;
- параметри зовнішньої середовища (температура, вологість, забруднення повітря тощо, які встановлені в методиці);
- інтервал часу між повторними вимірюваннями (між незалежними спостереженнями).

Метод В для оцінки стандартної невизначеності вимірювання – це метод, при якому невизначеність вимірювання оцінюється іншими способами, ніж статистичний аналіз ряду спостережень. В цьому випадку оцінка ґрунтується на інших технічних, наукових і метрологічних знаннях. Однак доцільність їх застосування повинна бути визначена та врахована.

Оцінене значення розширеної невизначеності треба порівняти з нормованим значенням цільової невизначеності, що встановлена значенням верхня межа і вибрана на підставі використання передбачуваних результатів вимірювання.

Взагалі результати вимірювань є корисними лише за умови, що невизначеність вимірювань є достовірною та достатньо малою для виконання конкретного завдання. Цільова невизначеність – це максимально допустима невизначеність, визначена для певної мети вимірювання.

Визначення цільової невизначеності безпосередньо пов'язано з вимірювальним завданням та застосованим методом вимірювання.

При оцінці відповідності цільова невизначеність повинна бути настільки малою, щоб було можливим виявити невідповідність вимогам, які захищають відповідні інтереси (наприклад, щодо охорони здоров'я або ефективності виробництва). Занадто велика цільова невизначеність не забезпечить адекватного захисту, тоді як надто мала цільова невизначеність може призвести до надмірних витрат на вимірювання.

Настанова Eurachem/CITAC «Встановлення та застосування цільової невизначеності у хімічних вимірюваннях» [9] рекомендує визначати межі цільової невизначеності для оцінки відповідності.

Можна навести такий приклад впливу невизначеності вимірювань на прийняття рішень, наведений Eurachem/CITAC.

Фермер Містер Рейс планує продавати свої апельсини виробникові соків. Виробник перевіряє апельсини на залишки пестициду тіабендазолу та на показник Брікса (який є мірою солодкості соку). Виробник приймає лише апельсини, в яких залишки тіабендазолу менше $1 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$, а солодкість за шкалою Брікса перевищує $55 \text{ }^\circ\text{Вх}$. Він також платить більше, якщо показник Брікса перевищує $65 \text{ }^\circ\text{Вх}$.

Містер Рейс замовив дослідження апельсинів у акредитованій Лабораторії С, знаючи, що виробник також перевіряє апельсини у своїй лабораторії. Містер Рейс був задоволений результатами Лабораторії С, хоча дослідження залишків пестициду коштувало дорого.

Виробник прийняв апельсини, але заплатив менше, ніж очікувалось. Порівнявши результати обох лабораторій, з'ясувалося, що, хоча результати були метрологічно сумісні, вони призвели до різних рішень щодо ціни апельсинів.

Результати вимірювань:

Лабораторія С:

тіабендазол: $(0,592 \pm 0,019) \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($k = 2$; 95 %)

показник Брікса: $(70 \pm 25) \text{ }^\circ\text{Вх}$ ($k = 2$; 95 %)

Лабораторія виробника соків:

тіабендазол: $(0,51 \pm 0,20) \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ ($k = 2$; 95 %)

показник Брікса: $(61,2 \pm 1,1) \text{ }^\circ\text{Вх}$ ($k = 2$; 95 %)

Результат вимірювання вмісту тіабендазолу в Лабораторії С має надзвичайно малу невизначеність, що збільшило витрати на вимірювання. Водночас невизначеність визначення показника Брікса була занадто великою, що зробило рішення про відповідність менш надійним.

Результати вимірювань є корисними, лише якщо розрахована в лабораторії невизначеність вимірювань не перевищує встановлене її максимально допустиме значення (тобто цільову невизначеність). Навіть якщо замовник або регуляторний орган не встановлюють цільову невизначеність, лабораторія повинна визначити її для оцінки придатності результатів.

Настанова Eurachem/CITAC рекомендує визначати цільову невизначеність за різними показниками якості вимірювання. Інформація для визначення цільової невизначеності подається на рисунку.

Однак на практиці їх застосування викликає різні проблеми. Тому треба шукати інші методи визначення цільової невизначеності.

Наприклад, є вже розроблені міжнародні стандарти, які визначають процедуру домовленості між виробником та замовником прийняття продукції на підставі визначеної невизначеності вимірювань. При цьому встановлюється методика оцінювання невизначеності вимірювань.

Встановлено значення цільової невизначеності під час калібрування еталонів для перевірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, яка повинна бути не більше $1/3$ від похибки засобів, які повіряються.

Можна запропонувати у разі реалізації методу прямих вимірювань розрахунок цільової невизначеності через значення інструментальної похибки, тобто максимально допустимої (основної та у разі необхідності, додаткової) похибки застосованого засобу вимірювальної техніки. При цьому враховується, що похибки засобу вимірювальної техніки визначаються при довірчій ймовірності 0,997, а розширена невизначеність – 0,95.

Цільова розширена невизначеність за цим методом розраховується за формулою (1):

$$U_{\text{ц}} = \frac{2 \cdot \Delta}{3}, \quad (1)$$

де Δ – абсолютна похибка;

$U_{\text{ц}}$ – цільова розширена невизначеність вимірювань параметру.

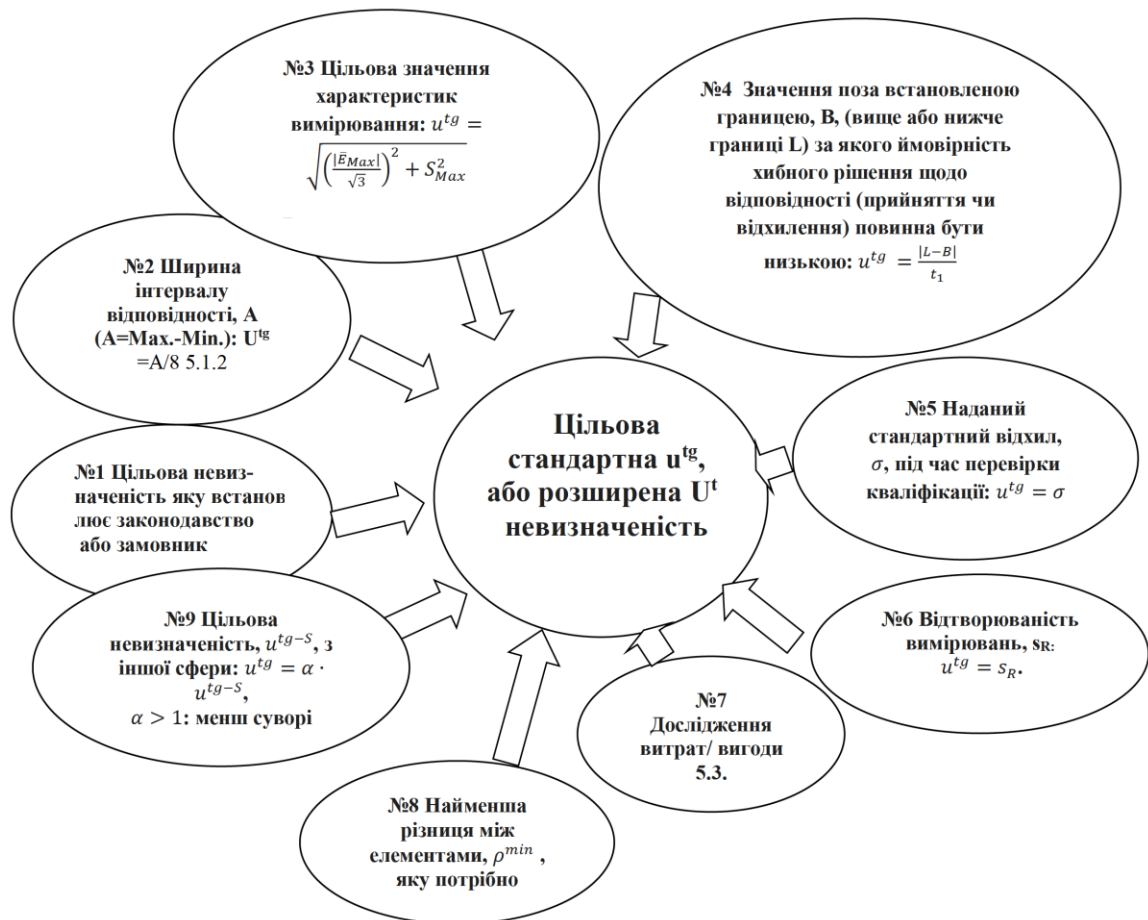


Рисунок – Підходи до визначення цільової невизначеності

Цільову розширену невизначеність вимірювань можна також визначити через похибку вимірювань, встановлену в методиці вимірювань, аналогічно формулі (1) у разі встановлення в методиці вимірювань значення максимальної допустимої похибки. Або прирівняти значення похибки при довірчій ймовірності 0,95 за методикою вимірювань до цільової невизначеності.

За ISO 5725-1 [10] та іншими його частинами на підставі визначення оцінки повторюваності, відтворюваності та правильності, та із застосування ISO 21748 [11] також можна визначити цільову невизначеність.

Висновки

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок щодо доцільності визначення цільової невизначеності для кожного вимірюваного завдання. Обмеження оцінки невизначеності тільки визначенням дефінітивної (власної) невизначеності, яка є складовою невизначеності вимірювань, що є результатом обмеженої деталізації у визначенні вимірюваної величини, не надає практичного значення застосування невизначеності на практики.

Перелік використаних джерел:

1. Про метрологію та метрологічну діяльність : Закон України від 05.06.2014 р. № 1314-VII. Відомості Верховної Ради України. 2014. № 30. Ст. 1008.
2. Захаров І. П. Порівняльний аналіз характеристики точності вимірювань: монографія. Харків : Оберіг, 2019. 100 с.
3. Трембовецька Р. В., Гальченко В. Я., Тичков В. В. Встановлення та оцінка невизначеності результату вимірювання лінійного розміру безконтактним методом. *Вісник Черкаського*

- державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. 2017. № 1. С. 25-32. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchdtu_2017_1_5.
4. Zakharov I., Neyezhnikov P., Botsiura O. Verification of the indicating measuring instruments taking into account their instrumental measurement uncertainty. *Measurement Science Review*. 2017. Vol. 17. Iss. 6. Pp. 269-272. DOI: <https://doi.org/10.1515/msr-2017-0033>.
 5. Features of measurement uncertainty evaluation during calibration of digital ohmmeters / Zakharov I., Semenikhin V., Zakharov O., Shevchenko S. *Український метрологічний журнал*. 2023. № 2. С. 22-27. DOI: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2023.286713>.
 6. Zakharov I., Neyezhnikov P., Botsiura O. Reduction of the bias of measurement uncertainty estimates with significant non-linearity of a model equation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1379. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1379/1/012013>.
 7. Zakharov I., Botsiura O. Calculation of expanded uncertainty in measurements using the Kurtosis method when implementing a Bayesian approach. *Measurement Techniques*. 2019. Vol. 62(4). Pp. 327-331. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01625-x>.
 8. ISO/IEC Guide 99:2007. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). International Organization for Standardization, 2007. 92 p.
 9. Eurachem/CITAC Guide: Setting and using target uncertainty in chemical measurement / ed. by R. Bettencourt da Silva, A. Williams. 1-st ed. 2015. 24 p.
 10. ДСТУ ISO 5725-1-2005. Точність (правильність та прицезійність) методів та результатів вимірювань. Частина 1. Основні положення та визначення. [Чинний від 2006-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2006. 21 с.
 11. ISO 21748:2010. Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation. International Organization for Standardization, 2010. 38 p.

References:

1. Law of Ukraine. № 1314-VII, 15.06.2014. Pro metrolohiu ta metrolohichnu diialnist [About metrology and metrological activity]. (Ukr.)
2. I.P. Zakharov, *Porivnialnyi analiz kharakterystyky tochnosti vymiriuvan: monohrafiia* [Comparative analysis of measurement accuracy characteristics: monograph]. Kharkiv, Ukraine: Oberih, Publ., 2019. (Ukr.)
3. R.V. Trembovetska, V.Ya. Halchenko, and V.V. Tyckov, «Vstanovlennia ta otsinka nevyznachenosti rezultatu vymiriuvannia liniinoho rozmiru bezkontaktnym metodom» [«Determination and evaluation of the uncertainty of the result of linear dimension measuring by contactless method»], *Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Bulletin of Cherkasy State Technological University. Series: Technical sciences*, № 1, pp. 25-32, 2017. (Ukr.)
4. I. Zakharov, P. Neyezhnikov, and O. Botsiura, «Verification of the indicating measuring instruments taking into account their instrumental measurement uncertainty», *Measurement Science Review*, vol. 17, iss. 6, pp. 269-272, 2017. doi: [10.1515/msr-2017-0033](https://doi.org/10.1515/msr-2017-0033).
5. I. Zakharov, V. Semenikhin, O. Zakharov, and S. Shevchenko, «Features of measurement uncertainty evaluation during calibration of digital ohmmeters», *Ukrainskyi metrolohichnyi zhurnal – Ukrainian Metrological Journal*, № 2, pp. 22-27, 2023. doi: [10.24027/2306-7039.2.2023.286713](https://doi.org/10.24027/2306-7039.2.2023.286713).
6. I. Zakharov, P. Neyezhnikov, and O. Botsiura, «Reduction of the bias of measurement uncertainty estimates with significant non-linearity of a model equation», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1379, pp. 1-5, 2019. doi: [10.1088/1742-6596/1379/1/012013](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1379/1/012013).
7. I. Zakharov, and O. Botsiura, «Calculation of expanded uncertainty in measurements using the Kurtosis method when implementing a Bayesian approach», *Measurement Techniques*, vol. 62(4), pp. 327-331, 2019. doi: [10.1007/s11018-019-01625-x](https://doi.org/10.1007/s11018-019-01625-x).
8. *International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM)*, ISO/IEC Guide 99:2007, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2007.
9. R. Bettencourt da Silva, and A. Williams, Eds. *Eurachem/CITAC Guide: Setting and using target uncertainty in chemical measurement*. 2015.

10. *Tochnist (pravylnist ta pryseziinist) metodiv ta rezultativ vymiriuvan. Chastyna 1. Osnovni polozhennia ta vyznachennia* [Accuracy (correctness and accuracy) of measurement methods and results. Part 1. Basic provisions and definitions], State standart ISO 5725-1-2005, 2006.
11. *Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation*, ISO 21748:2010, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2010.

Стаття надійшла 08.02.2024

Стаття прийнята 03.03.2024

183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 502.3

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310695

© Волошин В.С.¹, Азархов О.Ю.²

КОНКУРЕНЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ БІЛКОВО-ВУГЛЕЦЕВИХ ТА СПЕЦИФІЧНИХ НЕОРГАНІЧНИХ ЕКОСИСТЕМ НА ЗЕМЛІ

У статті представлено в параметричному порівнянні стан і розвиток двох екосистем, одна з яких заснована на вуглецевих формах життя, а друга – на металоїдних і металевих елементах, доступних на планеті і є в розпорядженні людини. Можна прийти до гіпотетичного припущення про можливу конкуренцію між цими системами в межах обраних параметрів. Відомі дослідження неупереджено підтверджують можливості для таких конкуренцій. В основі наших досліджень обрана ергатична система «людина-машина» як така, що містить два основних елементи досліджуваних екосистем. Запропонована параметрична модель, що відображає основні взаємні конкурентні функції людини і «машини» – приведена потужність, умовні показники інтелекту в хронологічному аспекті, дозволила оцінити як їх реальні, так і потенційні можливості, і зробити висновки про перспективність цих двох умовних екосистем. Одним з висновків таких досліджень стала нетривіальна теза про можливий проміжний стан людини в довгостроковому еволюційному розвитку розуму на планеті і про те, що він починає програвати конкуренцію зі створеними ним специфічними формами неорганічного світу. Аргументами є порівняльні дані: тривалість життя, здатність до ірраціонального самоусунення, способи розмноження, здатність до розвитку розуму та пам'яті, причини деградації навколишнього середовища та її вплив на людину, зміни мотивації людського життя, запрограмована відмова людини від природного білково-вуглецевого середовища на користь неприродного спеціалізованого неорганічного світу. Логіка підказує, що, можливо, людина не є самим ідеальним еволюційним творінням в природі, адже вже стає ясно, що крім вуглецю, але за допомогою людини, навіть на самій Землі можливі інші форми розуму і свідомості. Показано, що специфічні форми неорганічної речовини, з вектором розвитку в бік штучного інтелекту, захищені від головного недоліку людини – короткого життєвого циклу та здатності до самознищення. Сучасний еволюційний вектор не є його останньою стадією, він спрямований на розвиток конкретних форм неорганічного світу, який у певний час буде здатним до діяльності паралельно з людиною, але не менш ефективній.

Ключові слова: екосистеми, білкові форми мислення, специфічна неорганіка, штучний інтелект, пам'ять, швидкість мислення, еволюція.

V.S. Voloshyn, A.Yu. Azarkhov. Competition and perspectives of protein-carbon and specific inorganic ecosystems on Earth. The article presents in a parametric comparison the state and development of two ecosystems, one of which is based on carbonaceous life forms, and the second – on metalloid and metallic elements available on the planet and at the disposal of man. It is possible to come to a hypothetical assumption about possible competition between these systems within the selected parameters. Well-known studies unbiasedly

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-9922-5618

² д-р мед. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-0062-0616, azarhov_a_yu@pstu.edu

confirm the possibilities for such competition. Our research is based on the ergatic «human-machine» system as one that contains two main elements of the ecosystems under study. The proposed parametric model, reflecting the main mutual competitive functions of man and «machine» – reduced power, conditional indicators of intelligence in the chronological aspect, made it possible to assess both their real and potential capabilities and draw conclusions about the prospects of these two conditional ecosystems. One of the conclusions of such studies was a non-trivial thesis about the possible intermediate state of man in the long-term evolutionary development of the mind on the planet. and that he is beginning to lose competition with the specific forms of the inorganic world he has created. The arguments are comparative data: life expectancy, the ability to irrational self-elimination, methods of reproduction, the ability to develop the mind and memory, the causes of environmental degradation and its impact on humans, changes in the motivation of human life, the programmed rejection of the natural protein-carbon environment in favor of an unnatural specialized inorganic world. Logic dictates that perhaps man is not the most ideal evolutionary creation in nature, because it is already becoming clear that in addition to carbon, but with the help of man, other forms of intelligence and consciousness are possible even on Earth itself. It is shown that specific forms of inorganic matter, with a vector of development towards artificial intelligence, are protected from the main disadvantage of humans – a short life cycle and the ability to self-destruct. The modern evolutionary vector is not its last stage, it is aimed at the development of specific forms of the inorganic world, which at a certain time will be capable of activity in parallel with man, but no less effective.

Key words: *ecosystems, protein forms of thinking, specific inorganic, artificial intelligence, memory, speed of thinking, evolution.*

Постановка проблеми. У певний період часу багато вчених, в тому числі такі відомі, як С. Хокінг, Г. Альтшуллер, Дж. Агар, А. Т'юрінг, Р. Пайпс і навіть лауреати Нобелівської премії І. Павлов, Е. Шредінгер, І. Пригожин, постійно стикаються з питаннями життєздатності в земних умовах екосистем з білково-вуглецевою основою. Це практично вся біологічна система у всьому її різноманітті. Такі питання виникають тому, що вже на зараз стає помітним зовсім інший світ, створений розумом і руками людини, як одного з вінців білково-вуглецевої природи, а саме сукупність технічних систем (ТС) різного призначення і типу. Ареал таких умовно названих екосистем можна позначити як специфічні неорганічні форми на основі металів, кремнію та інших металоїдів. Агрегатна специфічно організована неорганічна екосистема вже сьогодні конкурує зі своєю білковою «сестрою». Як і все існуюче на планеті, такі екосистеми не можуть не вступати в суперечність і формувати конкурентне середовище для подальшого розвитку. І хто стане переможцем, це вже сьогодні вимагає певних роздумів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З біології випливає, що життя належить тільки білковим системам. Погоджуючись з цим, слід зазначити, що життя – це також розум, пам'ять, здатність реалізовувати механізми синергії, результатом якої є все створене людиною [1]. І якщо такі функції характеризують інші системи, крім людини, то, слідом за Е. Шредінгером, можна відзначити, що справа буде тільки відносно цього імені – «життя». Сьогодні загальна маса біологічних систем (у перерахунку на вуглець) на планеті досягає $0,6 \cdot 10^{12}$ тонн [2]. Зокрема, загальна маса всіх людей на планеті, за різними даними, склала 60 мільйонів тонн (перерахунок у вуглецю) [3]. Для порівняння уявімо, що всі інженерні споруди, в тому числі стаціонарні і пересувні машини, верстати, фабрики, будівлі і споруди, електростанції і мости, які в даний час експлуатуються, досягають ваги більше $1,0 \cdot 10^{12}$ тонн [3, 4]. А якщо взяти всю загальну масу неорганічного світу, створеного людиною за свою історію, то вона досягає $1,5 \cdot 10^{12}$ тонн. За непідтвердженими даними, загальний оборот металу в світі може досягати понад 8 мільярдів тон заліза, алюмінію, міді та інших металів. Світовий ринок металоїдів, таких як кремній і германій, що у переробленому вигляді використовуються не тільки в комп'ютерних або напівпровідникових технологіях, досягає \$18 млрд [5]. Поточна кількість чипів в діапазоні 50-80 мільярдів одиниць, за оцінками експертів Intel, досягне 1 трильйона одиниць до 2030 року.

Яскравими прикладами тут є численні мегапроекти, що реалізуються, наприклад, на території Китаю. Гідроелектростанція «Три ущелини» – це 112 млрд кВт·ч

високоякісної електроенергії, але вона також містить понад 700 млн тонн бетону, 48 млн тонн металу та 25,5 ТБайт оперативної інформації. Це також 200 квадратних кілометрів деформованої гідравліки навколишньої екосистеми: там, де були болота, стало сухо, і навпаки. Тисячаметрові білдинги Маніли, Шанхаю, Гуанчжоу, Сінгапура – це не тільки шедеври архітектури, а й концентратори потужних атмосферних електростатичних полів, які в нормальному стані рівномірно розподілені в навколишній атмосфері, але тепер надають опосередкований, але незворотний вплив на клітинну структуру всього живого в цих будівлях. Також вони сприяють концентрації величезної кількості шкідливих і небезпечних бактерій з навколишнього поляризованого повітря. Шедевр інженерного мислення – проект перекидання води з південних річок на посушливу північ Китаю трьома каналами загальною протяжністю трохи менше 4000 км, це не просто вкладений туди мільярд тонн залізобетону і величезна кількість інженерного обладнання, що піднімає 15 мільярдів тонн цієї води (третина всього проекту) на 3-5 км через гори, а й відмова від природного стоку, спосіб деформації структури води, що подається, те що робить її біологічно неефективною для споживання живими білковими клітинами та вуглецевою органікою [6]. А проекти будівель-міст у Ченду, Чжухаї, Нью-Йорку, Рафалі-Сіті площею до 2 млн квадратних метрів кожний, де людина, не виходячи, може спати, працювати, відпочивати, займатися спортом, відвідувати видо-вища, робити покупки, не виходячи з дому, – адже це проект, передбачений у ХХ столітті Г. С. Альтшуллером, про технізований або неприродний світ, який вже реалізовано. Все це є свідомим відходом людини від природи, від білково-вуглецевого світу в світ специфічної неорганіки, в світ *ТС*, які все більше порівнюються за функціями з біологічним світом.

Сучасні теорії еволюції знаходяться в стані цілого спектру гіпотез, починаючи з того факту, що Всесвіт виглядає як єдиний великий квантовий комп'ютер, який виробляє все, що ми бачимо навколо нас, включаючи нас самих, і працює як величезна космічна програма [7], до теорій біо-центризму [8], які мають на меті довести гіпотезу про те, що Всесвіт не створював інтелект та інші біосистеми, а навпаки – Розум створив Всесвіт. І життя не є результатом випадкових процесів, а Природа та історія Всесвіту не зводяться до безладної гри фізичних та інших законів.

Перспективи розвитку конкретних форм кремній-металевого «життя», принаймні сьогодні, повністю залежать від людини [9]. Він може продовжувати створювати нові *ТС* (до чого його незмінно підштовхують постійно зростаючі вимоги до комфорту для життя, а також наука, яка не потерпає зупинок). Але може й зупинити їх створення, чим поставить крапку в суперечках про переваги узагальнених «машин» перед людиною. Але це в кінцевому варіанті означає «шлях до печери», з чим згодні далеко не всі. Комп'ютер сьогодні здатний перевершити людину в чітко формалізованих завданнях з жорстким набором правил і цілей, але поки що програє там, де потрібна ініціатива і створення нетривіальних способів вирішення проблеми. Але попереду розвиток штучного інтелекту. Тому немає причин сперечатися про те, чи будуть удосконалюватися сучасні *ТС* і чи не настане в якийсь момент часу фактор самовідтворення, коли «машина» стане здатною створити собі подібних.

Мета роботи – на основі опосередкованого параметричного порівняння двох складових ергатичної системи з'ясувати можливості людини в конкуренції з специфічними формами неорганічного світу, що оточує його.

Виклад основного матеріалу. Систематизуємо відомі дані щодо порівняння «людини» і *ТС* за умовними порівняними параметрами (табл. 1). За енергетичними та інтелектуальними показниками світ існуючих *ТС* вже зараз має деякі, а часом і дуже значні, переваги перед «людиною». Переваги, які з часом будуть тільки збільшуватися. Але поки що людина не залежить від процесів відтворення як собі подібних, так і будь-якого з існуючих *ТС*. Її безпека на сьогодні гарантується соціумом, якого поки немає у відомому світі *ТС*, де мотивація існування ще не визначена, тоді як у людини вона давно сформувалася як даність [10]. Та й цінність відомої інформації в людському суспільстві є більш актуальною, оскільки вона є основою для подальшого розвитку як науки, так і суспільства. Цінність інформації в світі *ТС*, як і раніше, утилітарна, підпорядкована людині і не залежить від потреб цієї системи.

Виграш для людини ще зберігається і в здатності до вибіркової логіки. Це вміння відразу знаходити «оптимальне рішення» без ретельного перебору варіантів. Але «машина», взявши за основу методику перебору варіантів, знаходить оптимальне рішення швидше, ніж людина – це підтверджують шахи, гра в Го та ін. Те, що без сучасних комп'ютерних технологій комунікативні навички сучасної людини різко впадуть, говорить саме за себе.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика для сучасних вуглецевих та неуглецевих екосистем (Застріховані клітинки вказують на переваги певної екосистеми)

Параметр	Вуглецевмісні форми життя		Метало-металоїдні форми	
	Факт	Екстраполяція	Факт	Екстраполяція
Загальна маса*	0,6·10 ¹² тонн	(0,7-0,8) ·10 ¹² тонн	1,0·10 ¹² тонн**	1,5·10 ¹² тонн
Енергетична потужність	мозоку – 30 Вт людини – 160 Вт		машин 1900 ліс.; ГЕС – 22,5 КВт; ядерний реактор – 1,5 ГВт	100 ГВт
Розвиток сили	м'язи людини 5-10 кГ/см ²		Вимірюється тонами n·10 ³ кГ	
Обсяг інформації, що зберігається	мозок - 3 Тбайта; все людство- 24 · 10 ²¹ Тбайт		Інтернет 90·10 ²¹ Тбайт	інтернет к 2030 году – 1·10 ²⁴ Тбайт
Швидкість обробки інформації	підсвідомість – 4·10 ⁹ біт/сек, свідомість – 2·10 ³ біт/сек. В середньому 11·10 ⁶ біт/сек	1·10 ¹⁶ флопс/сек	комп'ютер 1·10 ¹⁸ операцій/с. швидкість пере- дачі даних 1·10 ⁸ біт/с	комп'ютер MDGrape(Японія) – 2·10 ¹⁵ флопс/с
Пропускна спроможність інтерфейсу	10 Мбіт/с*** усвідомлений потік інформації <16 біт/с		50 Гбайт/с	
Спосіб обробки інформації	послідовний та масивно-парале- льний		послідовний 4- ядерний паралельний	багатоядерний па- ралельний; штуч- ний інтелект
Спосіб поведінки	адаптивний	адаптивний	програмуємий	адаптивний
Область переваг	інтуїтивно зро- зумілі рішення	інтуїтивно зро- зумілі рішення	формалізовані завдання с жор- сткими прави- лами	Системний перебір варіантів, можливо- сті III
Накопичення знань	послідовно, у міру їх появи	послідовне гене- рування знань у міру їх накопи- чення	знання заванта- жуються за коро- ткий час	генерування нових знань, системи штуч- ного інтелекту в міру їх появи.
Спосіб аналізу	Вибіркова логіка		механічне пере- рахування варіа- нтів	необмежене збіль- шення швидкості перебору
Цінність нової інформації	зростає з часом		падає з часом	збільшується з ча- сом
Причини появи та розвитку	природний до- бір	доцільність	потреба людини в комфорті (ене- ргія) та інформа- ції (машини)	конкуренція з вуг- лецевими формами та навколишнім се- редовищем
Основа життя	органічна, вуглець	вуглецево-мета- лоїдні форми	неорганічна – метало-метало- їди	Змішана – металої- дно-вуглецеві фо- рми

Продовження таблиці 1

Параметр	Вуглецевмісні форми життя		Метало-металоїдні форми	
	Факт	Екстраполяція		Факт
Відтворення	парне розмноження; розмноження поділом клітин	штучне і внутрішньоклітинне запліднення	відтворення за рахунок будівництва нових машин і в залежності від потреб людини	відтворення собі подібних шляхом будівництва незалежно від людини
Джерело енергії	білкова їжа, вуглець, кисень, вода	біологічно збалансована їжа	електрика, залежність від людини і джерел енергії	живлення від поновлюваних джерел, Сонце
Безпека	самозахист, житло, протекція соціуму	очікування протекції від ТС мілітариського рівня	захист від поломок, надійність ТС, залежність від людини	відсутність залежності від людини
Мотивація до існування	розмноження, продовження роду		потрібність залежить від людини	потрібність, що не залежить від людини
Термін активного життя	Збільшується від 80 до 90 років за рахунок підвищення її якості	Збільшується від 90 до 120 років за рахунок підвищення її якості	Залежить від потреб людини та від розвитку нових ТС	Залежить від розвитку більш сучасних ТС

* на суші, у перерахунку на вуглець;

** - штучно створені людиною специфічні неорганічні форми (міста, дороги, супутники, електростанції тощо);

***-опосередковані данні.

Для того щоб зробити такі висновки, спробуємо звернутися до відомих ергатичних систем типу «людина-машина» або «*ch-M*» [11] і оцінити кожен її складову в умовно порівнянних параметрах, включаючи динаміку розвитку. Одна з складових такої системи (*ch*) має білково-вуглецеву основу, а друга (*M*) в тому складі, в якому її створила людина – метало-металоїдну основу. В якості параметрів системи оберемо час існування *T* системи, енергетичну потужність ΔP системи та її частин, а також її умовну інтелектуальну складову у вигляді векторного симплексу $\Delta I = i \times v$, де *i* – обсяг можливої інформації що зберігається; *v* – вектор швидкості обробки цієї інформації. Останні два показники будуть оцінюватися за логарифмічною шкалою. Це якраз ті умовні параметри, від яких в історичному плані залежало виживання, а пізніше і комфорт, як мотивація для життя людини.

Відомо, що людина періоду збирання плодів та коренів була сильнішою за сучасну. Важко надати кількісну характеристику їх потужності, але якщо врахувати, що сучасна людиноподібна горіла (сімейство *hominidae*, до якого відноситься і людина) приблизно в 6-8 разів могутніше людини, то можна сказати, що з урахуванням зміненого способу життя силові характеристики середньостатистичної сучасної людини знизилися приблизно в 3-4 рази (рис. 1, а), що дуже суттєво. Принаймні, фізична сила людини в порівнянні з сучасними приматами знизилася в 2-2,5 рази, витривалість знизилася в 4-5 разів [9]. За цей же час потужність «машин», які були створені людиною, зростала в геометричній прогресії – від примітивних важелів, млинів і відкритого полум'я до сучасних мегаватних лайнерів і гігаватних електростанцій, тобто на порядки (див. рис. 1, а).

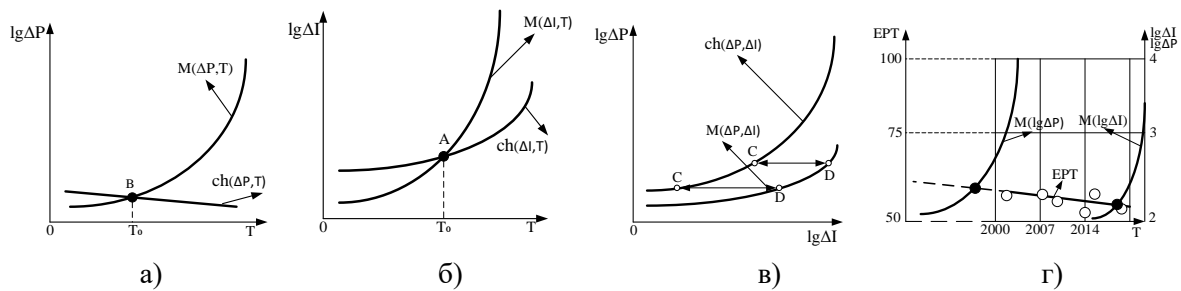


Рис. 1 – Емпіричні залежності для оцінки порівняльних можливостей елементів системи «*ch-M*» за такими параметрами: *P* – енергетичними; *I* – умовно-інтелектуальними; *T* – часовими; а) – щодо наведеної потужності; б) – відповідно до наведеного інтелекту; в) – щодо ролі умовного інтелекту в енергоефективності елемента системи; г) - за індексом екологічної ефективності (*EPI*).

Так само це стосується і порівняльного інтелектуального рівня людини і машини. Якщо вимірювати інтелект людини емпірично примітивним числом байт його пам'яті, яку здатний зберігати мозок, то це значення близько 3 терабайт інформації. Для всіх 8 мільярдів людей Землі така колективна «пам'ять» може становити близько $i = 2 \cdot 10^{22}$ байта інформації.

У сучасних інтернет-мережах вже зберігаються як мінімум $9 \cdot 10^{22}$ байтів найрізноманітнішої інформації і її обсяг постійно зростає (висновок із закону Мура). Прогнози до 2030 року дають нам цифру $1 \cdot 10^{27}$, тобто на порядки більше інформації в інтернеті, ніж зберігається сьогодні в загальному людському мозку. Якщо говорити про порівняння сучасних комп'ютерів і людського мозку за швидкістю (див. табл. 1), то перший вже має багаторазову перевагу перед людиною, а векторний симплекс ΔI (рис. 1, б) у співвідношенні людини та комп'ютера тепер явно на користь останнього на кілька порядків.

Справлятися з існуючими енергетичними можливостями і пристроями, що знаходяться під управлінням людини, вже неможливо без суворих технічних засобів контролю, в тому числі комп'ютерного програмного забезпечення, без штучного інтелекту. В такій же мірі, як і людина, будь-яка «машина» втрачає здатність розвивати власний функціональний потенціал без інформаційної підтримки, причому ця залежність більш важлива для людини, ніж для створюваних ним машин (рис. 1, в). Таким чином, середньостатистична людина давно і значно програє машинам і в питомих силі, і в питомих потужності, і в специфічній пам'яті, і в швидкості.

Слід бути впевненими, що на наших очах формується конкурентне середовище між двома системами, що досліджуються, кожна з яких має свої переваги та недоліки (див. табл. 1), які дозволяють судити про те, що така конкуренція буде не простою для людини.

Ми можемо уявити собі певну сукупну поверхню управління сучасними системами «*ch-M*» у координатах $(lg \Delta P, lg \Delta I, T)$ (рис. 2, а). Тут *T* – час виміру; ΔP – питома міцність, приведена до одиниці ваги кожного елемента системи; ΔI – інтелектуальний рівень, залежить від об'єма пам'яті *L*, швидкості її обробки ω_L , способу вибору рішення *S*: $\Delta I = f(L, \omega_L, S)$. Для людини в масштабі задіяної пам'яті *S* – це вибіркова логіка в необхідному обсязі пам'яті, для машини – це підбір усіх варіантів, також в необхідному обсязі пам'яті. Ентропія другого вище, ніж першого, а значить, «машині» потрібно більше енергії для досягнення того ж інтелектуального результату, ніж людині. З іншого боку можливості людського мозоку в використанні енергії обмежені (не більш 20% всієї енергії що виробляється організмом).

Представляють інтерес поверхні управління в цих координатах для кожного з елементів системи: для *ch* і для *M*.

На графіках (див. рис. 1) відмічені дві точки «*B*» і «*A*», які за часовою шкалою можна датувати приблизно 700-800 роками до РХ і кінцем ХХ століття від РХ відповідно. Це точки, розташовані на перетині кривих двох залежностей, що відображають розвиток людини і «машини» в часі по його енергетиці «*B*» і умовному інтелекту «*A*», відповідно. Візьмемо ці дві точки за основу для нашого аналізу.

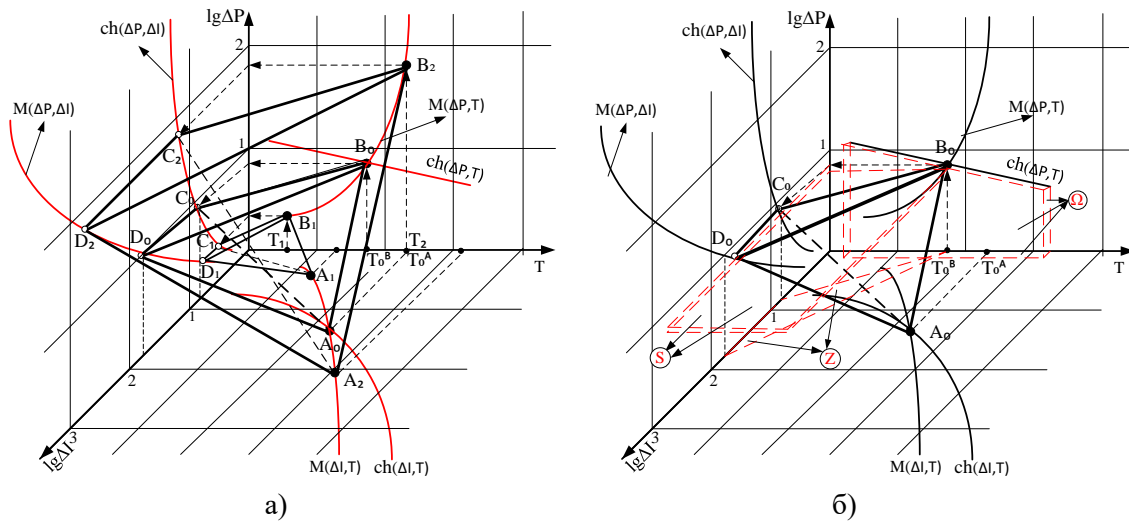


Рис. 2 – Масштабовані співвідношення порівнянних параметрів елементів екосистеми «*ch-M*»: а) – зони комфортного стану людини ($A_0B_0C_0D_0$); б) – вибіркові області переваг специфічних неорганічних екосистем над білковими (позначення в тексті)

Знайдемо ще дві точки «*C*» і «*D*» в тривимірному просторі на площині ($lg\Delta P, lg\Delta I$) в координатній сітці ($lg\Delta P, lg\Delta I, T$) і об'єднаємо ці чотири точки (див. рис. 2). Отримана фігура являє собою перевернуту трикутну піраміду (фігура $A_0B_0C_0D_0$), основа якої розташована паралельно горизонтальній площині в системі координат, а її вершина лежить у цій же площині. Така піраміда розподіляє координатний простір управління на дві нерівні частини – внутрішню та поза цією фігурою.

Якщо уважно придивитися до функціонального наповнення цих просторів, то можна побачити, що внутрішній простір такої піраміди відноситься до параметрів, відповідним процесам розвитку людини. А саме точка « B_0 » відповідає певному часовому етапу T_0^B , коли з'явилися перші «машини» більшої потужності, ніж сама людина (важіль, млини, вогонь у вогнищі тощо). А точка « A_0 » і відповідний їй час T_0^A – це час створення пристроїв пам'яті з смістю, близькою до пам'яті людського мозку і навіть такого, що це перевищує її, це час появи штучного інтелекту. Тобто це прогрес в тому сенсі, в якому ми звикли про нього говорити. Але простір за межами перевернутої піраміди – це невідомий стан не тільки для людини, але і для біологічних систем в цілому: тут сумарна маса, потужність і інтелект конкретних неорганічних систем в межах обраних координат зможуть почати поступово витіснити білкові системи (табл. 1). Очевидна обмеженість координатного простору, де людина є лідером в системі «*ch-M*», і необмеженість простору, де людина може або повинна поступитися своїми лідерськими правами не тільки в управлінні енергетичними можливостями неорганічного світу, але і його інтелектом. Перевернута піраміда (див. рис. 2, а) могла існувати в минулому (фігура $A_1B_1C_1D_1$), може мати місце в майбутньому (фігура $A_2B_2C_2D_2$), і кожне своє призначення уявляється в параметричному поділі переваг людини і переваг «машини» відповідно.

Для нас цікавим є стан такої системи в заданих параметрах, за межами об'єму перевернутої піраміди. Він може пояснити, як і чому певний спеціалізований неорганічний «світ» вже зараз здатний перехопити у людини ініціативу в розвитку розуму, зробити процеси пізнання і розвитку більш динамічними і ефективними. Результатом таких досліджень є кілька гіпотетичних тез.

1. *Запрограмований відхід людини з природного білково-вуглецевого середовища існування в неприродний спеціалізований неорганічний світ або здається еволюційно помилковим, або пов'язаний з іншими, ще не сформованими, формами еволюції розуму.*

Людина, що має вуглецеву основу, на протязі більшої частини свого існування (сотні тисяч років) була оточена білково-вуглецевими формами – фауна, флора, все, що давало йому доступ до природного продовження роду, їжі, енергії і т. д. Поступово, щоб задовольнити максимально зростаючі потреби в комфорті і енергії, людина стала оточувати себе специфічними формами неорганічних речовин, металів і металоїдів (область зовні $A_0B_0C_0D_0$, див. рис. 2, б), тобто тим, що

спочатку не було їй властиво. Специфічні форми неорганіки сьогодні стають конкурентною альтернативою не тільки енергетичній, а й інтелектуальній міцності людини. Прогрес у цій гонці очевидний, і він за специфічними формами неорганічної матерії. Поки, правда, під керівництвом людини, представника білкового життя. Але, схоже, в довгостроковому вимірі це теж тимчасово, адже вектор цього прогресу спрямований в бік тієї ж самої неорганіки.

2. *Залишається емпіричним фактом те, що еволюційний розвиток розуму на нашій планеті може продовжуватися в бік спеціалізованих форм неорганічної матерії, і людина може бути лише проміжною ланкою в цьому процесі.*

Свою роль зіграла здатність людини змінювати зовнішній вигляд планети за вузький проміжок часу (0,02% від загального часу існування планети), забезпечивши умови, коли організована ним загальна метало-металоїдна маса стала перевищувати загальну білково-вуглецеву масу. Неорганічні форми, в перспективі, готові виконувати ті ж функції, що і людина: створювати і забезпечувати механізми зниження ентропії на планеті [6] (область S на рис. 2, б), забезпечити існування штучного розуму, розвивати інтелект, причому не еволюційним шляхом, а більш прискореними способами, які тільки з'являються, використовувати для свого розвитку необмежені джерела енергії, недоступні чисто білковій матерії.

3. *Біологічне життя в її різноманітті було потрібне Природі як передумова для її більш надійних форм – кремнію, водню або інших, але за посередництва людини.*

На думку Е. Шредінгера, життя – це самовідтворювана система, що здатна до розвитку за рахунок підвищення адаптованості до самовідтворення. Наприклад, біологічний розвиток шляхом парного розмноження вимагає від пари тільки наявних фізичних зусиль, порівнянних з можливостями людини, і знання рефлекторних основ фізіології (область Ω на рис. 2). Ця область торкається перевернутої піраміди тільки в точці «B» і більше ніде. Природою не закладені для біологічних істот радикальні та альтернативні способи продовження життя, наприклад, гіпотетичне безсмертя, але без розмноження, або величезна тривалість життя зі здатністю виробляти потомство тільки перед власним знищенням? Неорганічний світ без парного розмноження, з величезним періодом існування в даному випадку, є більш переважною формою, якщо він випадає з-під впливу людини.

3. *Зміна мотивації самого життя людини: від парадигми фізичного виживання до парадигми інтелектуального комфорту, сприяє фізичній зміні людського організму – ослабленню кісткового скелета, зміні видів навантаження на м'язи, зменшенню м'язової маси і зниженню витривалості. Так, тривалість активного фізичного життя людини змінюється в бік збільшення: 80 років; 100 років; 120 років... Але в цьому випадку вона виходить за межі комфортної піраміди і стає більш залежною від метало-металоїдних форм (обл. Z на рис. 2).*

4. *Логіка підказує, що, можливо, людина не є самим ідеальним еволюційним творінням в природі, адже вже стає ясно, що крім вуглецю, але з його допомогою, можливі і інші форми інтелекту і свідомості навіть на самій Землі.*

Поступова втрата людиною лідерства в порівнянні з «машинами» може змінити його статус провідного суб'єкта еволюції, на статус проміжної еволюційної ланки в межах цілком звичайної планети, що належить до не найяскравішої Сонячної системи, розташованої на «околиці» далеко не найбільшій з відомих галактик.

5. *Для людини в його життєвому часовому проміжку неможливо спостерігати динаміку, рухи, наприклад, кремнієвих мас в природі. І в цьому вона теж програє неорганічному світу. Існує закономірність, згідно з якою органічні і неорганічні форми життя істотно відрізняються в хронометрії існування. У природі відомі тимчасові послідовності, наприклад, фотони світла рухаються за частки секунди, звукова хвиля – за секунди, життєвий цикл рослин, в основному, становить місяці або роки, а механічні рухи і життєвий цикл людини (а значить, і вуглецю, як елемента людського організму) вимірюються годинами, днями, місяцями, десятиліттями. Зміни стану і розташування кремнію у вигляді земних порід вимірюються століттями і тисячоліттями, завдяки діям таких сил, як вода, тектоніка, вулканічна активність, рух небесних тіл і т. д.*

6. *До переваг специфічних форм неорганічного світу, як альтернативи людському розуму, нас підштовхує і екологія, стан якої на планеті залежить від розвитку спеціалізованих неорганічних систем, створених людиною, і має системні погіршення. Саме метало-металоїдні системи, що культивуються людиною в енергетиці, на транспорті, в промисловості, побуті, призводять до системного погіршення такого показника, як індекс екологічної ефективності (EPI), який*

визначається в усьому світі 19 значущими показниками впливу на людину як біологічну систему [12]. Можливості порівняння цього легітимізованого показника в динаміці, з одного боку, і динаміки розвитку метало-металоїдних форм через показники $M(\Delta P)M(\Delta I)$ (див. рис. 1, г) з іншого, досить красномовні на користь специфічних форм неорганічного світу, які майже не залежать від таких техногенних показників.

І ще одна теза поза моделі. *Найцінніше в людині – це її розум. Найслабша його ланка – короткий період життєвого циклу і здатність до самоусунення. Специфічні форми неорганічного світу вже недалеко від володіння першим і захищені від другого.* І це найголовніше в конкуренції між цими двома екосистемами. Нам буде складно погодитися з гіпотезою про те, що білкове життя і найяскравіший її представник – людина, наділений унікальним інтелектом і феноменальною пристосованістю до природи, в перспективі може залишитися лише проміжною, хоча, мабуть, послідовно обов'язковою, ланкою в еволюції розуму, і не тільки на Землі.

Висновки

В досяжний проміжок часу людина починає програвати конкуренцію з «машинами» як по потужності, так і по інтелекту. За великим рахунком, важелів впливу на ситуацію у нього залишилося небагато: у людини ще є ініціатива створювати формати комп'ютерної генерації, а також право створювати або не створювати в майбутньому сильні і розумні машини, або знаходити інші шляхи еволюції. І вектор цієї еволюції, обачений як не останній її етап, все більш стає спрямованим на розвиток специфічних форм неорганічного «світу», який вже здатний до діяльності паралельно з людиною, та не менш ефективний. Звичайно, це не означає знищення людства або інші види антагонізму. Це може означати лише перевагу однієї форми сили та розуму над іншою, при їх співіснуванні.

Перелік використаних джерел:

1. Schrödinger E. *Mind and Matter*. Cambridge: University Press, 1958. 58 p.
2. Bar-On Y. M., Phillips R., Ron Milo R. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. Vol. 115. № 25. Pp. 6506-6511. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1711842115>.
3. Global human-made mass exceeds all living biomass / E. Elhacham et al. *Nature*. 2020. Vol. 588. Pp. 442-444. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3010-5>.
4. Юсупова О. О. Еволюція поглядів на глобальну екологічну проблему в контексті діяльності римського клубу. *Наука й економіка*. 2013. Вип. 2. С. 169-175.
5. Smil V. *Making the Modern World: Materials and Dematerialization*. 1st ed. John Wiley & Sons, 2013. 256 p.
6. Волошин В. С., Азархов О. Ю. Про роль людини в енергетичному обміні Сонце-Земля. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали IV Міжн. наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 01-25 листоп. 2022 р. С. 230-234.
7. Lloyd S. *Programming the Universe: a quantum computer scientist takes on the cosmos*. Knopf Doubleday Publishing Group, 2006. 240 p.
8. Lanza R., Berman B. *Biocentrism: how life and consciousness are the keys to understanding the true nature of the universe*. BenBella Books, 2010. 200 p.
9. Соха Ю. І. Системний підхід і проблеми моделювання природно техногенної безпеки. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2012. № 727. С. 440-448.
10. Agar J. *The government machine: a revolutionary history of the computer*. The MIT Press, 2003. 564 p.
11. Мхитарян Н. М., Бадаян Г. В., Ковалев Ю. Н. *Эргономические аспекты сложных систем*. Київ : Наукова думка, 2004. 600 с.
12. Expanding the measure of wealth: indicators of environmentally sustainable development. *Environmentally Sustainable Development Studies and Monographs series*. World Bank Publications, 1997.

References:

1. E. Schrödinger, *Mind and Matter*. Cambridge, UK: University Press Publ., 1958.
2. Y. M. Bar-On, R. Phillips, and R. Ron Milo, «The biomass distribution on Earth», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115, № 25, pp. 6506-6511, 2018. doi:

- 10.1073/pnas.1711842115.
3. E. Elhacham, L. Ben-Uri, J. Grozovski, Y.M. Bar-On, and R. Milo, «Global human-made mass exceeds all living biomass», *Nature*, vol. 115, № 25, pp. 6506-6511, 2018. doi: 10.1073/pnas.1711842115.
 4. O.O. Iusupova, «Evolutsiia pohliadiv na hlobalnu ekolohichnu problemu v konteksti diialnosti rym'skoho klubu» [«The evolution of views on the global environmental problem in the context of the activities of the Club of Rome»], *Nauka y ekonomika – Science and economy*, vol. 2, pp. 169-175, 2013. (Ukr.)
 5. V. Smil, *Making the modern world: materials and dematerialization*. 1st ed. John Wiley & Sons Publ., 2013.
 6. V.S. Voloshyn, and A.Yu. Azarkhov, «Pro rol liudyny v enerhetychnomu obmini Sontse-Zemlia» [«About the role of man in the energy exchange between the Sun and the Earth»], in Proc. IV Int. Sci.-Techn. Conf. «Technical support of innovative technologies in the agro-industrial complex», Zaporizhzhia, 2022, pp. 230-234. (Ukr.)
 7. S. Lloyd, *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes On the Cosmos*. Knopf Doubleday Publishing Group, 2006.
 8. R. Lanza, B. Berman, *Biocentrism: how life and consciousness are the keys to understanding the true nature of the universe*. BenBella Books Publ., 2010.
 9. Yu.I. Sokha, «Systemnyi pidkhid i problemy modeliuвання pryrodno tekhnohennoi bezpeky» [«Systemic approach and modeling problems of man-made safety»], *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnik» – Bulletin of Lviv Polytechnic National University*, № 727, pp. 440-448, 2012. (Ukr.)
 10. J. Agar, *The government machine: a revolutionary history of the computer*. The MIT Press Publ., 2003.
 11. N.M. Mkhitarian, H.V. Badeian, and Yu.N. Kovalev, *Erhonomycheskye aspekty slozhnykh system* [Ergonomic aspects of complex systems]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 2004. (Rus.)
 12. Expanding the measure of wealth: indicators of environmentally sustainable development, in *Environmentally sustainable Development Studies and Monographs series*. World Bank Publications, 1997.

Стаття надійшла 23.01.2024

Стаття прийнята 25.02.2024

УДК 629.454.2

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310696

© Дерюгін О.В.¹, Столбченко О.В.², Лябах Д.А.³, Чеберячко Л.М.⁴

ОБҐРУНТУВАННЯ КЛЮЧОВИХ ЧИННИКІВ ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО ЕКОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ В СИСТЕМІ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Мета дослідження. Обґрунтування ключових чинників, які мають вплив на запровадження перспективного екологічного транспорту в системі міських

¹ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-2456-7664, deryugin_o@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-2003-4382, elena_aot@ukr.net

³ студентка, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0009-0009-5056-6698, liabakhdiana@gmail.com

⁴ аспірантка, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0009-0001-2685-7809, lida_cheb@ukr.net

пасажирських перевезень з метою підвищення якості транспортного обслуговування пасажирів і покращення екології в густонаселених містах. Матеріали і методи. Для досягнення поставленої мети застосовано метод fuzzy Dematel, який базується на теорії графів та дозволяє класифікувати всі наявні чинники, що впливають на прийняття рішень на основі причинно-наслідкових зв'язків. Результати. Обґрунтовано вісім ключових факторів, які формують транспортний проект і чинники, які мають на них суттєвий вплив, на впровадження транспортного проекту втілення в транспортну систему міських пасажирських перевезень перспективного екологічного пасажирського транспорту на міських маршрутах. До них відносяться рівень розвитку сучасних транспортних технологій при перевезенні пасажирів на міських маршрутах та наявність центрів їх підтримки; наявність фінансових програм для оновлення/реструктуризації парку рухомого складу автотранспортного підприємства та наявність відповідної законодавчої бази для пільгової експлуатації електричного пасажирського транспорту; швидка адаптація транспортної інфраструктури сучасного міста для експлуатації екологічного транспорту; відповідність екологічного транспорту транспортній характеристиці маршруту перевезення пасажирів; експлуатаційні властивості сучасного електробусу; дія відповідних законодавчих ініціатив щодо пільг для закупівлі і витрат при експлуатації електротранспорту. Наукова новизна полягає у виявленні взаємозв'язків між факторами, які формують транспортний проект, і чинників, які мають на них суттєвий вплив, на впровадження транспортного проекту втілення в транспортну систему міських пасажирських перевезень перспективного екологічного пасажирського транспорту на міських маршрутах, що дозволяє оцінити можливі економічні витрати на автотранспортних підприємствах, що здійснюють пасажирські перевезення. Практичне значення полягає у визначенні ключових чинників, які можна застосовувати для впровадження транспортного проекту із застосування перспективного екологічного пасажирського транспорту в системі міських пасажирських автомобільних перевезень.

Ключові слова: екологічний транспорт, метод fuzzy Dematel, управлінські рішення, транспортний проект.

O. Deryugin, O. Stolbchenko, D. Liabakh, L. Cheberichko. Justification of key factors regarding the application of prospective ecological transport in the urban passenger transportation system. Research objective. Justification of the key factors that have an impact on the introduction of promising ecological transport in the system of urban passenger transport in order to improve the quality of transport services for passengers and improve ecology in densely populated cities. Materials and methods. To achieve the goal, the fuzzy Dematel method is used, which is based on graph theory and allows to classify all available factors that influence decision-making based on cause-and-effect relationships. Results. The eight key factors that form the transport project and the factors that have a significant impact on them are substantiated for the implementation of the transport project of the implementation of promising ecological passenger transport on urban routes into the transport system of urban passenger transportation. These include the level of development of modern transport technologies when transporting passengers on city routes and the availability of their support centers; the availability of financial programs for updating/restructuring the rolling stock fleet of the motor vehicle enterprise and the availability of the appropriate legal framework for preferential operation of electric passenger transport; rapid adaptation of the transport infrastructure of a modern city for the operation of ecological transport; compliance of ecological transport with the transport characteristics of the passenger transportation route; operational properties of a modern electric bus; the effect of relevant legislative initiatives regarding benefits for the purchase and costs of operating electric vehicles. Scientific novelty consists in identifying the interrelationships between the factors that form the transport project and the factors that have a significant influence on them, on the implementation of the transport project of

the implementation of promising ecological passenger transport on urban routes into the transport system of urban passenger transport, which allows to estimate the possible economic costs of road transport enterprises carrying out passenger transportation. Practical significance lies in the determination of key factors that can be used for the implementation of a transport project for the use of promising ecological passenger transport in the system of urban passenger road transport.

Key words: *ecological transport, fuzzy Dematel method, management solutions, transport project.*

Постановка проблеми. В сучасних мегаполісах, пасажирські автомобільні перевезення (далі – ПАП) відіграють ключову функцію зв'язку людини з соціумом, задовольняють її потребу переміщення в просторі, дають можливість своєчасно опинитися в необхідному місці в зазначений час. Основні критерії оцінки ефективності ПАП: якість транспортного обслуговування користувачів, екологічність і ергономічність пасажирських автобусів, які використовуються безпосередньо в транспортному процесі ПАП, впровадження сучасних транспортних технологій, спрямованих на підвищення безпеки транспортного процесу та ін.

Однак аналіз сучасного стану справ у цій транспортній сфері, на прикладі міста Дніпро, відображає низку існуючих проблем, які вимагають негайної уваги та вирішення. Серед яких можна відмітити наступні:

- застаріла технічна база автотранспортних підприємств, які надають послуги ПАП;
- використання великої кількості пасажирських автобусів в транспортній інфраструктурі міста, пропускна спроможність якої не пристосована до таких умов. Це призводить до утворення транспортних заторів. На жаль, це стає нормою для мешканців, що негативно впливає на якість життя та ефективність транспортних процесів;
- збільшення використання рухомого складу (далі – РС), який працює на органічному паливі сприяє збільшенню забруднення навколишнього середовища і, як наслідок, збільшує екологічне навантаження на місто.

Також необхідно відмітити, що існує серйозний дефіцит якості транспортного обслуговування населення м. Дніпра. Відсутність необхідних зручностей, таких як сплати проїзду за допомогою єдиного електронного квитка, доступ до мережі інтернету та клімат-контролю, робить поїздки пасажирським транспортом менш комфортними та зручними для пасажирів. Відсутність ергономічних рішень, призначених для груп з особливими потребами, ускладнює доступність транспорту для всіх верств населення, що призводить до зниження їх соціальної активності.

З метою подолання цих викликів та покращення якості ПАП, необхідно активно впроваджувати сучасні транспортні технології, в основі яких є екологічна складова. Враховуючи те, що майже всі європейські країни на законодавчому рівні вже прийняли програми заборони використання транспортних засобів (далі – ТЗ), які працюють на органічному пальному, і затвердили програми розвитку транспортної інфраструктури своїх країн з пріоритетом використання екологічних ТЗ. Це рішення є єдиним правильним заходом, який спрямований на захист навколишнього середовища, на зменшення парникового ефекту і впливу зміну кліматичних умов навколишнього середовища.

Україна в будь-якому випадку стане рівноправним членом Європейського Союзу. Це на нас покладе відповідальність прийняття законодавчих актів, які регламентують відповідний тип і рівень транспортних послуг ПАП.

Серед законодавчих норм в транспортній інфраструктурі європейських країн, що вже успішно впроваджені, варто зазначити суворі стандарти щодо викидів та екологічної безпеки пасажирських автобусів. Крім того, в Європейському Союзі існують програми вибуття застарілої техніки та ТЗ з обігу при досягненні відповідного строку експлуатації. Такі заходи сприяють зменшенню використання застарілої техніки та покращенню екологічних показників транспортного сектору.

Отже, розглянуті питання є актуальними та потребують негайного вирішення з метою поліпшення якості ПАП та забезпечення сталого розвитку міської транспортної системи. Відповідно, проведення дослідження факторів впливу щодо обґрунтування запровадження перспективного екологічного пасажирського транспорту є актуальним та важливим завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз багаточисельних літературних досліджень [1-18] щодо обґрунтування доцільності застосування електричного транспорту показав, що більшість авторів використовують багатокритеріальні методи прийняття рішень: АНР, TOPSIS, PROMETHEE, Fuzzy АНР і DEA. Кожен з них має свої переваги і недоліки. Існує також багато нових, досі не спостережуваних багатокритеріальних методів прийняття рішень, таких як CODAS, COMET, CRITIC, EDAS, MARCOS, PIPRECIA та MEW PROMETHEE II [5-7]. Так, метод АНР [2] містить процедуру синтезу пріоритетів, що обчислюються на основі суб'єктивних суджень експертів, тоді як метод TOPSIS [3] орієнтований на оцінювання альтернативи відносно найкращого та найгіршого з прийнятих варіантів, тоді як метод PROMETHEE [4] базується на зважуванні факторів прийняття управлінського рішення. Кожен із зазначених підходів має деяку суб'єктивну думку експертів, яка дозволяє або визначити критерії оцінювання, або встановити вагові коефіцієнти, або запропонувати шкалу оцінювання. Звісно, це потребує проведення відповідної перевірки невизначеності вимірювань. Для зменшення невизначеності часто дослідники поєднують декілька різних підходів, називаючи це гібридним підходом [8, 9]. Це дозволяє слабкі сторони одного методу перекрити сильними сторонами іншого. Тим самим досягти мінімальної невизначеності. Найчастіше в літературі зустрічається поєднання трьох методів АНР, REMBRANDT і VIKOR [10, 11]. Однак процедура є доволі складною і потребує спеціальних фахових знань. На виробництві, коли виникають екстремні ситуації, часто не вистає часу для залучення таких людей, а рішення прийняти потрібно. Звідси виникає задача із пошуку і застосування простого підходу для прийняття управлінського рішення, який має мінімальну невизначеність розрахунків [12]. Часто для цього використовують метод Dematel [13], який базується на визначенні взаємозв'язків між різноманітним чинниками, а не оцінки їх вагових коефіцієнтів, що не потребує відповідних перевірок із встановлення величини невизначеності. Часто цей процес автоматизують і швидко отримують результат [14, 15]. Складність викликає тільки формування груп чинників, які потребують відповідної обробки для прийняття рішення [16]. Для цього потрібно проводити відповідні дослідження, які дозволять сформувати реєстри важливих чинників, які визначають ефективності прийняття управлінського рішення.

Метою дослідження є обґрунтування ключових чинників, які мають вплив на запровадження електричного пасажирського транспорту з нульовими викидами для покращення екології в густонаселених містах.

Виклад основного матеріалу. Розробка і втілення транспортного проекту заміни РС екологічного пасажирського транспорту є складним завданням. По-перше, ми повинні забезпечити задоволення потреби суспільства в якісних транспортних послугах. По-друге, втілення нових сучасних транспортних технологій в процес ПАП викликає супротив серед учасників транспортного процесу, які безпосередньо займаються експлуатацією і утриманням парку пасажирських автобусів в справному стані. Втілення такого проекту сприяє повній зміні системи експлуатації пасажирських автобусів, побудові в транспортній інфраструктурі сучасного міста зарядних станцій, набір навченого і кваліфікованого персоналу для керування і обслуговування електробусів. Тому, впровадження транспортного проекту – це інновація, яка підлягає впливу багатьох одночасно діючих факторів, врахування яких призведе до отримання гідного результату.

Вирішення задачі втілення транспортного проекту заміни екологічного пасажирського транспорту проведемо на підставі аналізу запропонованих факторів з метою виявлення найбільш впливових. Це дозволить на етапі прийняти управлінські рішення з заміни екологічного пасажирського транспорту мати розуміння на які етапи звернути ретельну увагу для його успішної реалізації.

Для вирішення поставленої задачі скористаємось методом fuzzy Dematel, який базується на парних інструментах порівняння й прийняття рішень на теорії графів [2, 19-22]. На основі перетворення причинно-наслідкових зв'язків у структурно-візуальних моделях визначимо найактуальніші взаємозалежності між різними етапами проекту заміни перспективного екологічного пасажирського транспорту (фактори впливу). На рис. 1 представлено алгоритм розрахунку методу fuzzy Dematel.

Для обробки отриманих результатів, які надані були експертами, та перевірки їх оцінок на викиди було застосовано критерій Граббса:

$$G_{\max} = \frac{X_n - \bar{X}}{s}, \quad (1)$$

де X_n – запропоновані оцінки експертів; \bar{X} – середнє значення вибірки; S – середнє квадратичне відхилення.

Математичне очікування або середнє значення отриманих результатів:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i. \quad (2)$$

Також необхідно розрахувати середнє квадратичне відхилення:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}. \quad (3)$$

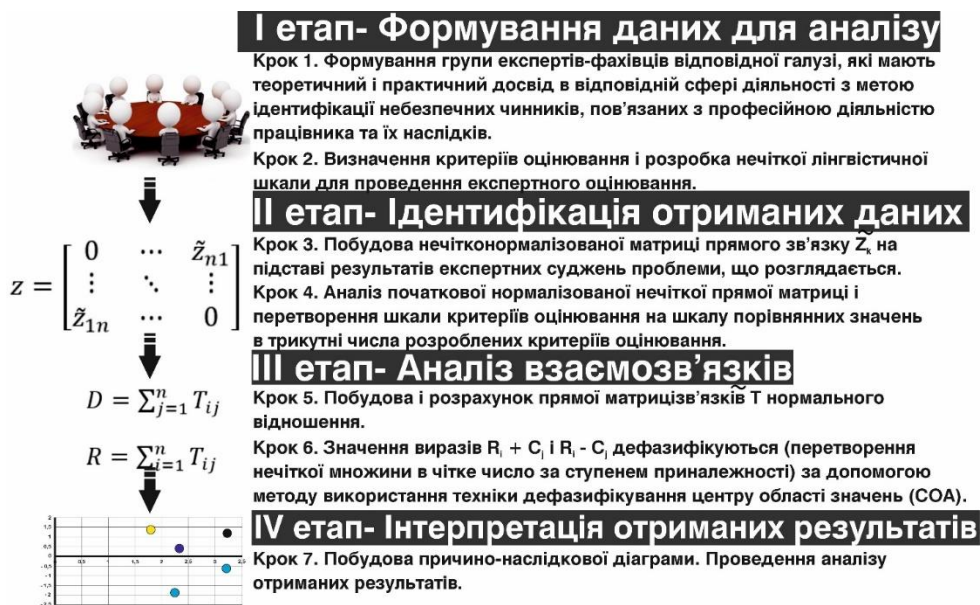


Рис. 1 – Алгоритм розрахунку методом fuzzy Dematel

За допомогою наведених формул перевіряємо на викид максимальні і мінімальні результати оцінок експертів за умови, що показник перевищить критичне значення:

$$\begin{cases} G_{\max} \geq G_{n, 1-\alpha} \\ G_{\min} \geq G_{1, 1-\alpha} \end{cases}, \quad (4)$$

де α – рівень значимості, який визначається у відповідності до вимог [23].

У разі невиконання вказаної нерівності результати оцінок будуть вважатися викидами, які необхідно виключити. При чому з експертами, що дали таку оцінку, проводяться роз'яснення для виявлення причин обґрунтованості їх вибору балів під час проведення експертизи. Критичні значення статистик вибираються виходячи із закону розподілу випадкової величини. Дані значення можуть бути знайдені для нормального розподілу відповідно до вимог [23]. У разі підозри на два викиди, проводиться оцінка сукупності результатів на двовикидну статистику Граббса.

Теоретичні результати дослідження. На **першому етапі** було сформовано групу з шести експертів-фахівців відповідної галузі, які мають теоретичний і практичний досвід. Їх дані наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Дані експертів, що приймали участь у дослідженнях

Інформація	Кількість
Кількість експертів	6
Досвід роботи на посадах транспортної логістики	від 10 до 14 років
Освіта експертів	вища за фахом транспортні технології
Стаж роботи	більше 10 років
Наявність посвідчення аудитора з систем управління якістю і безпекою компаній	Так
Підвищення кваліфікації з оцінки ризиків за вимогами [20]	Так

Група експертів ідентифікувала вісім груп факторів, які впливають на втілення транспортного проекту з втілення екологічного транспорту в систему ПАП. Серед них:

- **екологічний фактор**: нульові викиди (A_1), експлуатація поза встановлені терміни (A_2), ремонт відновлення РС (рециклінгові технології) (A_3), технологія переробки АКБ (A_4), відсутність екологічного впливу на навколишнє середовище (A_5);

- **експлуатаційний фактор**: наявність зарядної інфраструктури (A_6), наявність сервісних центрів для технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) (A_7), наявність центрів технічної підготовки кваліфікованого персоналу для керування і обслуговування електробусів (A_8), надійність електробусу (A_9), ремонтпригодність електробусу (A_{10});

- **соціальний фактор**: рівень розвитку сучасних технологій та наявність центрів їх підтримки (A_{11}), плата (тариф за проїзд) (A_{12}), заробітна плата водія електробусу (A_{13}), задоволення водія умовами праці в транспортній компанії (A_{14}), підвищення культури організації праці на автотранспортному підприємстві (A_{15});

- **транспортний фактор**: пасажиропотік (A_{16}), довжина пасажирського маршруту (A_{17}), адаптація транспортної інфраструктури міста для експлуатації електротранспорту з нульовими викидами (A_{18}), графік руху (A_{19}), відповідність електричного ТЗ з нульовими викидами транспортній характеристики маршруту (A_{20});

- **економічний фактор**: термін окупності інвестиційного проекту (A_{21}), вартість 1 кВт електроенергії (A_{22}), фінансові втрати автотранспортного підприємства на проведення ТОіР електробусів (A_{23}), фінансові витрати автотранспортного підприємства на закупівлю запасних частин і шин (A_{24}), лояльні фінансові програми для оновлення/реструктуризації парку РС автотранспортного підприємства РС (A_{25});

- **технічний фактор**: запас ходу (A_{26}), експлуатаційні властивості електробусу (A_{27}), пасажиромісткість (A_{28}), ергономіка салону електробусу (A_{29}), ергономіка робочого місця водія (A_{30});

- **маркетинговий фактор**: реклама та просування екологічних ПАП електробусами (A_{31}), експлуатаційні властивості електробусу (A_{32}), висвітлення та обговорення формування тарифу на перевезення електробусами (A_{33}), маркетинг ринку міських пасажирських перевезень та адаптація транспортних послуг до потреб споживача (A_{34}), аналіз та вдосконалення маркетингових стратегій для привертання нових клієнтів та утримання існуючих (A_{35});

- **юридичний фактор**: законодавство щодо застосування пільг до реєстрації електричних ТЗ (A_{36}), законодавство в сфері зелених технологій, що регламентує нульові викиди ТЗ (A_{37}), законодавчі акти, які регламентують умови праці водіїв (A_{38}), законодавство, яке захищає фінансову стабільність автотранспортного підприємства (A_{39}), законодавчі акти, які регламентують конструкційну і експлуатаційну безпеку електричних ТЗ (A_{40}).

На рис. 2 наведена схема факторів впливу на втілення транспортного проекту заміни перспективного екологічного транспорту з врахуванням результатів багатофакторного аналізу. Це дозволило сформувавши реєстр чинників, які мають вплив на відповідні фактори втілення транспортного проекту.



Рис. 2 – Перелік ключових факторів впливу на впровадження транспортного проекту заміни перспективного екологічного пасажирського транспорту з врахуванням результатів багатфакторного аналізу

На **другому етапі** визначили критерії оцінювання у лінгвістичних класифікаційних термінах: дуже високий вплив, високий вплив, низький вплив, дуже низький вплив і ніякого впливу. А також використали стандартну нечітку лінгвістичну шкалу для проведення експертного оцінювання (посилання) (табл. 2). Відповіді експертів перетворені на нечіткі числа з використанням розмитої шкали (рис. 3). Використовувалися трикутні нечіткі числа; трикутне нечітке число \tilde{z} визначається наступним чином: $\tilde{z} = (l, m, u)$, де l, m і u – дійсні числа та $l \leq m \leq u$.

Таблиця 2

Представлення лінгвістичних термінів ступня впливу одного чинника на відповідні фактори

Дуже високий вплив	ДВ	0,75	1	1
Високий вплив	В	0,5	0,75	1
Низький вплив	Н	0,25	0,5	0,75
Дуже низький вплив	ДНВ	0	0,25	0,5
Ніякого впливу	НВ	0	0	0,25

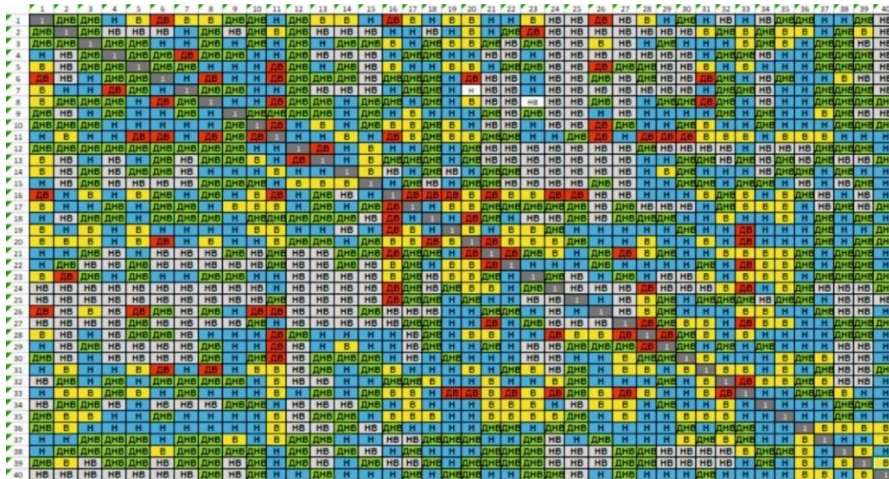


Рис. 3 – Результати представлення лінгвістичних термінів ступня впливу одного чинника на інший експертом (фрагмент)

На **третьому етапі** будували нечітку нормалізовану матрицю прямого зв'язку на підставі результатів експертних суджень $\tilde{z}_1, \tilde{z}_2, \tilde{z}_3, \dots, \tilde{z}_p$. На її основі провели аналіз нормалізованої нечіткої матриці прямих зв'язків.

На четвертому етапі провели розрахунок загальної нечіткої матриці. При цьому враховували лише ті значення, які перевищують порогове значення. Щоб обчислити порогове значення для зв'язків, визначали середні значення матриці зв'язків.

Після визначення порогової інтенсивності всі значення в матриці, які менші за порогове значення, встановлюються рівними нулю, тобто причинно-наслідкові зв'язки не розглядались. Величина порогового значення дорівнювала 0,245. Потім обчислюється сума рядків та сума стовпців загальної матриці зв'язків. Сума рядків позначається через D , а сума стовпців – через R . В табл. 3 показані результати розрахунку для $(D + R)$ та $(D - R)$.

Таблиця 3

Результати розрахунку показників для визначення ключових чинників

Чинник	D	R	$D + R$	$D - R$	Ранг
A ₁	3,61	4,52	8,13	-0,92	32
A ₂	5,11	5,39	10,50	-0,28	25
A ₃	5,13	5,59	10,71	-0,46	27
A ₄	5,56	5,44	11,00	0,11	20
A ₅	6,35	5,33	11,68	1,01	2
A ₆	6,26	5,47	11,74	0,79	11
A ₇	6,03	5,57	11,60	0,46	15
A ₈	5,82	5,51	11,33	0,30	18
A ₉	6,32	5,41	11,73	0,91	9
A ₁₀	6,30	5,46	11,76	0,84	10
A ₁₁	6,39	5,35	11,74	1,04	1
A ₁₂	6,04	5,35	11,39	0,69	12
A ₁₃	6,05	5,44	11,49	0,61	13
A ₁₄	6,06	5,51	11,58	0,55	14
A ₁₅	6,34	5,34	11,68	1,01	3
A ₁₆	5,93	5,58	11,51	0,36	17
A ₁₇	5,92	5,52	11,43	0,40	16
A ₁₈	6,36	5,39	11,75	0,97	5
A ₁₉	5,71	5,54	11,25	0,17	19
A ₂₀	6,27	5,28	11,54	0,99	4
A ₂₁	5,39	5,34	10,72	0,05	21
A ₂₂	5,28	5,28	10,56	0,00	22
A ₂₃	5,17	5,27	10,44	-0,10	23
A ₂₄	5,12	5,30	10,42	-0,18	24
A ₂₅	6,19	5,24	11,43	0,95	7
A ₂₆	5,15	5,53	10,68	-0,38	26
A ₂₇	6,23	5,26	11,49	0,96	6
A ₂₈	5,05	5,64	10,68	-0,59	28
A ₂₉	4,91	5,56	10,47	-0,64	29
A ₃₀	4,85	5,67	10,53	-0,82	30
A ₃₁	4,73	5,75	10,48	-1,02	34
A ₃₂	4,61	5,68	10,30	-1,07	37
A ₃₃	4,49	5,64	10,14	-1,15	38
A ₃₄	4,28	5,32	9,60	-1,04	36
A ₃₅	4,14	5,32	9,46	-1,18	39
A ₃₆	3,96	4,99	8,95	-1,03	35
A ₃₇	3,78	4,74	8,53	-0,96	33
A ₃₈	3,63	4,47	8,10	-0,84	31
A ₃₉	6,21	5,28	11,48	0,93	8
A ₄₀	3,50	4,98	8,48	-1,47	40

Далі виконується процес дефазифікації для векторів значущості та відносного становища. Ключові чинники визначали на основі ранжування величин $(D + R)$ та $(D - R)$, які характеризують ступінь їх впливу на транспортний процес. Виходячи із даних табл. 4, до них відносяться вісім чинників: $A_5, A_{11}, A_{15}, A_{18}, A_{20}, A_{25}, A_{27}, A_{39}$, які мають найбільшу кількість балів. Визначені ключові чинники також пов'язані з іншими факторами, які є залежними від останніх, а загалом формують розуміння про окупність запропонованого проекту (рис. 4).

Таблиця 4

Взаємозв'язок між встановленими факторами впливу і чинниками, що впливають на реалізацію цих факторів щодо втілення транспортного проекту заміни пасажирського екологічного транспорту

Чинники впливу	Наслідки впливу
A_5 . Відсутність екологічних впливів на навколишнє середовище	A_3 . Ремонт відновлення РС
	A_4 . Технологія переробки АКБ
	A_{37} . Законодавство, що регламентує нульові викиди
A_{11} . Рівень розвитку сучасних технологій та наявність центрів їх підтримки	A_1 . Нульові викиди
	A_2 . Експлуатація поза встановлені терміни.
	A_{14} . Задоволення водія умовами праці в автотранспортній компанії
	A_{31} . Реклама та просування пасажирських автобусних перевезень електробусами
A_{15} . Дія відповідних законодавчих ініціатив щодо пільг для електротранспорту	A_{38} . Законодавство, що регламентує умови праці водія
	A_{40} . Законодавчі акти які регламентують конструкційну і експлуатаційну безпеку електричних ТЗ
A_{18} . Адаптація транспортної інфраструктури міста для експлуатації електротранспорту з нульовими викидами	A_6 . Наявність зарядної інфраструктури
	A_7 . Наявність сервісних центрів для ТОiP
	A_8 . Наявність центрів технічної підготовки кваліфікованого персоналу для керування і обслуговування електробусів
A_{20} . Відповідність електричного транспорту параметрам пасажирського і маршруту	A_{16} . Пасажиропотік
	A_{17} . Довжина пасажирського маршруту
	A_{19} . Графік руху
A_{25} . Лояльні фінансові програми для оновлення/реструктуризації парку РС автотранспортного підприємства	A_{13} . Заробітна плата водія
	A_{21} . Термін окупності інвестиційного проекту
	A_{22} . Вартість 1 кВт електроенергії
A_{27} . Експлуатаційні властивості електробусу	A_9 . Надійність електробусу
	A_{10} . Ремонтпригодність електробусу
	A_{26} . Запас ходу
	A_{28} . Пасажиромісткість
	A_{29} . Ергономіка салону електробусу
A_{39} . Законодавство, яке захищає фінансову стабільність автотранспортного підприємства	A_{30} . Ергономіка робочого місця водія
	A_{12} . Плата (тариф за проїзд)
	A_{23} . Фінансові втрати автотранспортного підприємства на ремонт і технічне обслуговування електробусів
	A_{24} . Фінансові втрати автотранспортного підприємства на закупівлю автозапчастин і шин



Рис. 4 – Алгоритм реалізації транспортного проекту оновлення/заміни рухомого складу пасажирського екологічного транспорту

Кожному ключовому чиннику відповідають декілька наслідкових факторів. Це дозволяє обґрунтувати рішення щодо доцільності оновлення/реструктуризації парку РС автотранспортного підприємства, що залежить від експлуатаційних властивостей електробусу, пасажиропотоку, наявності сервісних центрів для обслуговування електробусів.

Крім того, для визначення окупності проекту потрібно звертати увагу на:

- рівень розвитку сучасних технологій та наявність центрів їх підтримки;
- наявність фінансових програм для оновлення/реструктуризації парку РС автотранспортного підприємства;
- наявність відповідної законодавчої бази для пільгової експлуатації пасажирського екологічного транспорту;
- швидку адаптацію транспортної інфраструктури міста для експлуатації пасажирського екологічного транспорту;
- відповідність пасажирського екологічного транспорту транспортній характеристикам маршруту;
- експлуатаційні властивості електробусу;
- дію відповідних законодавчих ініціатив щодо забезпеченні фінансових пільг для пасажирського екологічного транспорту.

Процес ідентифікації ключових чинників являється необхідною умовою для визначення джерел ризику [24], а також події та ситуації, які можуть мати загальні результати щодо цілей транспортного проекту. В сукупності це є фундаментом для проведення обґрунтування управлінських рішень, які вплинуть на окупність проекту.

За результатами проведеного дослідження виявлено вісім таких чинників, що дозволяє в подальшому ретельніше провести дослідження щодо оцінювання фінансових ризиків. Для цього слід звернути увагу вже на розвиток транспортного проекту, оцінити дієвість усіх існуючих засобів контролю за виконанням відповідних етапів. Слід зазначити, що більшість ключових чинників взаємозалежні, що також потрібно враховувати при визначенні критеріїв оцінювання. Чим більше буде встановлено взаємозв'язків тим, вища повинна бути оцінка у порівнянні з іншими чинниками. Необхідність звернення до екологічної стійкості в секторі громадського пасажирського електротранспорту є ключовим фактором у виборі технології використання електробусів, що є основною метою дослідження цієї статті [25, 26].

До цієї проблеми прийняття рішення підійшли шляхом вирішення задачі з втілення транспортного проекту заміни екологічного пасажирського транспорту на підставі аналізу запропонованих факторів з метою виявлення найбільш впливових [27]. У запропонованому підході розглядався широкий набір критеріїв, заснований на огляді літератури та досвіді групи експертів. Далі на основі нечіткого методу Dematel були виявлені причинно-наслідкові зв'язки між критеріями [28], що дозволило в результаті встановити ключові критерії для окупності проекту. Цей

результат мотивованої актуальністю, пов'язаною з транспортними, експлуатаційними та економічними факторами, для яких двигуни внутрішнього згоряння представляють менше обмежень. Через значну вагу, надану цим факторам, технології, які мають кращу продуктивність з екологічної та соціальної точок зору, не можуть отримати загальну продуктивність, яка є достатньо високою, щоб поставити їх у найвищі ранги.

Важливість дослідження, представленого в цій статті, полягає в порівнянні двох груп чинників, які були отримані шляхом розгляду різних вимірів аналізу, тобто не лише відносної важливості чинників, але й їхнього взаємного впливу. При визначенні взаємозв'язків між факторами впливу і чинниками, що впливають на реалізацію проекту, виходили з підвищення стійкості транспортних систем [29]. Наслідки підсумовували таким чином, відповідно до двох різних точок зору: на академічному рівні спроба спростити процедуру оцінювання шляхом застосування методу Dematel для зменшення кількості критеріїв оцінювання, яка була визначена різницею між поняттями важливості та їх впливу, що може неналежним чином вплинути на вибір факторів; на практичному рівні дослідження підкреслило, що велику увагу слід приділяти меті застосування методів оцінювання, особливо коли залучаються кілька експертів. Примітно, що проведені в дослідженні процедури оцінювання виявили необхідність точного пояснення респондентам конкретної мети прийнятих методик оцінювання. У цьому відношенні для правильного впровадження методу Dematel було необхідно чітке розмежування між поняттями важливості та її впливу. Дійсно, як підкреслено в роботі [30], можливі непорозуміння, що характеризують точку зору аналітика, можуть внести упередження в процеси прийняття управлінських рішень, які потім відображаються в остаточних рекомендаціях, наданих особі, яка приймає рішення. Посилаючись на результати дослідження, потенційне неправильне тлумачення концептуальної різниці між поняттями важливості та впливу може бути причиною вищого рангу для отримання бажаного результату [31]. Подальший розвиток дослідження включатиме, з одного боку, глибше опрацювання наслідків впливу експертами, а, з іншого боку, більш комплексний аналіз чутливості пріоритетів критеріїв з метою виявлення можливих варіації в рейтингу альтернатив. Крім того, можливість перенесення запропонованої методології буде перевірено на інших тематичних дослідженнях і контекстах.

Висновки

На основі методу fuzzy Dematel, який базується на парних інструментах порівняння й прийняття рішень на теорії графів, та за участю шести досвідчених експертів було обґрунтовано вісім ключових чинників щодо втілення транспортного проекту застосування екологічного транспорту в системі пасажирських перевезень на міських маршрутах. До них відносяться наявність лояльних фінансових програм для оновлення/реструктуризації парку РС автотранспортного підприємства, експлуатаційні властивості електробусу, пасажиропотоку, наявність сервісних центрів для обслуговування електробусів.

Перелік використаних джерел:

1. Zavadskas E. K., Turskis Z., Kildienė S. State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods. *Technological and Economic Development of Economy*. 2014. Vol. 20. Pp. 165-179. DOI: <http://dx.doi.org/10.3846/20294913.2014.892037>.
2. The dangerous factors identification features of occupational hazards in the transportation cargo process / V. Tsopa et al. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2023. Vol. 25(3). Pp. F64- F77. DOI: <http://dx.doi.org/10.26552/com.C.2023.058>.
3. A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development / A. Kumar et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 69. Pp. 596-609. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191>.
4. Application of MCDM methods in sustainability engineering: a literature review 2008-2018 / M. Stojčić et al. *Symmetry*. 2019. Vol. 11. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym11030350>.
5. Vavrek R., Bečica J. Capital city as a factor of multi-criteria decision analysis-application on transport companies in the Czech Republic. *Mathematics*. 2020. Vol. 8. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/math8101765>.
6. A novel entropy-fuzzy PIPRECIA-DEA model for safety evaluation of railway traffic / A. Blagojević et al. *Symmetry*. 2020. Vol. 12. Pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym12091479>.

7. Damidavičius J., Burinskienė M., Antuchevičienė J. Assessing sustainable mobility measures applying multicriteria decision making methods. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12156067>.
8. Zehmed K., Jawab F. A combined approach based on fuzzy SERVPERF and DEA for measuring and benchmarking the quality of urban bus transport service at the route level. *Industrial Engineering & Management Systems*. 2020. Vol. 19. Pp. 442-459. DOI: <https://doi.org/10.7232/IEMS.2020.19.2.442>.
9. Kumar A., Anbanandam R. An MCDM framework for assessment of social sustainability indicators of the freight transport industry under uncertainty. A multi-company perspective. *Journal of Enterprise Information Management*. 2020. Vol. 33. Pp. 1023-1058. DOI: <https://doi.org/10.1108/jeim-09-2019-0272>.
10. Kumar A., Anbanandam R. Environmentally responsible freight transport service providers' assessment under data-driven information uncertainty. *Journal of Enterprise Information Management*. 2020. Vol. 34. Pp. 506-542. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/JEIM-12-2019-0403>.
11. A fuzzy Full Consistency Method-Dombi-Bonferroni model for prioritizing transportation demand management measures / Pamucar D., Deveci M., Canitez F., Bozanic D. *Applied Soft Computing*. 2020. Vol. 87. 105952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.105952>.
12. Kumar A., Singh G., Vaidya O. S. A comparative evaluation of public road transportation systems in India using multicriteria decision-making techniques. *Journal of Advanced Transportation*. 2020. Vol. 20. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/8827186>.
13. Evaluation of safety degree at railway crossings in order to achieve sustainable traffic management: a novel integrated fuzzy MCDM model / A. Blagojević et al. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13020832>.
14. Hamurcu M., Eren T. Strategic planning based on sustainability for urban transportation: an application to decision-making. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12093589>.
15. Multimodal transportation via TSR for effective Northern logistics: perspectives of korean logistics companies / Kim G.-S., Lee S.-W., Seo Y.-J., Kim A.-R. *Maritime Business Review*. 2020. Vol. 5. Pp. 295-312. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/MABR-07-2019-0029>.
16. An integrated approach of analytic hierarchy process and triangular fuzzy sets for analyzing the park-and-ride facility location problem / J. Ortega. *Symmetry*. 2020. Vol. 12. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym12081225>.
17. Dry port terminal location selection by applying the hybrid Grey MCDM model / Tadić S., Krstić M., Roso V., Brnjac N. *Sustainability*. 2020. Vol. 12. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12176983>.
18. A novel approach for a sustainability evaluation of developing system interchange: the case study of the Sheikhfazolah-Yadegar interchange, Tehran, Iran / Shishegaran A., Shishegaran A., Mazzulla G., Forciniti C. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17. Pp. 1-25. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17020435>.
19. Methodology for assessing the risk of incidents during passenger road transportation using the functional resonance analysis method / O. Bazaluk et al. *Heliyon*. 2022. Vol. 8(75). e11814. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11814>.
20. Improving safety of passenger road transportation / S. Cheberichko et al. *Transactions on transport sciences*. 2023. Vol. 14(2). Pp. 11-20. DOI: <https://doi.org/10.5507/tots.2023.003>.
21. Improvement of the professional risk management process according to Haddon's matrix / V. A. Tsopa et al. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. 2. Pp. 105-112. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2023-2/105>.
22. Improving the risk management process in quality management systems of higher education / O. Bazaluk et al. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53455-9>.
23. An assessment model for air passenger risk classification / H. Zhou et al. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(19). Pp. 1-48. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12199580>.
24. Zhao Y., Li J., Ying X. Study on risk of long-steep downgrade sections of expressways based on a fuzzy hierarchy comprehensive evaluation. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(12). Pp. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12125924>.

25. Яновська В. П., Кириченко Г. В. Особливості формування стратегії розвитку національних автотранспортних перевізників. *Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку*. 2020. Вип. 2(2). С. 92-108. DOI: <https://doi.org/10.23939/smeu2020.02.092>.
26. Global trends in environmental management system and ISO14001 research / H. K. Salim et al. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 170(1). Pp. 645-653. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.017>.
27. Galieriková A., Sosedová J. Environmental aspects of transport in the context of development of inland navigation, *Ekológia (Bratislava)*. 2016. Vol. 35(3). Pp. 279-288. DOI: <https://doi.org/10.1515/eko-2016-0022>.
28. Integrated fuzzy DEMATEL-ISM-NK for metro operation safety risk factor analysis and multi-factor risk coupling study / J. Liu. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(7). Pp. 1-26. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15075898>.
29. Risk assessment using fuzzy TOPSIS and PRAT for sustainable engineering projects / G.K. Koulinas. *Sustainability*. 2019. Vol. 11(3). Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11030615>.
30. Shahdah U. E., Na S., Hu J. W. Assessing the impact of increasing tractor-trailer speed limit on the safety and mobility of three-lane highways in Egypt. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(24). Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/app122412702>.
31. Caliendo C., Genovese G., Russo I. A simultaneous analysis of the user safety and resilience of a twin-tube road tunnel. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12(7). Pp. 1-25. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12073357>.

References:

1. E. K. Zavadskas, Z. Turskis, and S. Kildienė, «State of art surveys of overviews on MCDM/MADM methods», *Technological and Economic Development of Economy*, vol. 20, pp. 165-179, 2014. doi: **10.3846/20294913.2014.892037**.
2. V. Tsopa, S. Cheberyachko, Y. Litvinova, M. Vesela, O. Deryugin, and I. Bas, «The dangerous factors identification features of occupational hazards in the transportation cargo process», *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*, vol. 25(3), pp. F64-77, 2023. doi: **10.26552/com.C.2023.058**.
3. A. Kumar et al., «A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 596-609, 2017. doi: **10.1016/j.rser.2016.11.191**.
4. M. Stojčić, E. K. Zavadskas, D. Pamučar, Ž. Stević, and A. Mardani, «Application of MCDM Methods in sustainability engineering: a literature review 2008-2018», *Symmetry*, vol. 11, pp. 1-24, 2019. doi: **10.3390/sym11030350**.
5. R. Vavrek, and J. Bečica, «Capital city as a factor of multi-criteria decision analysis-application on transport companies in the Czech Republic», *Mathematics*, vol. 8, pp. 1-17, 2020. doi: **10.3390/math8101765**.
6. A. Blagojević, Ž. Stević, D. Marinković, S. Kasalica, and S. Rajilić, «A novel entropy-fuzzy PI-PRECIA-DEA model for safety evaluation of railway traffic», *Symmetry*, vol. 12, pp. 1-23, 2020. doi: **10.3390/sym12091479**.
7. J. Damidavičius, M. Burinskienė, and J. Antuchevičienė, «Assessing sustainable mobility measures applying multicriteria decision making methods», *Sustainability*, vol. 12, pp. 1-14, 2020. doi: **10.3390/su12156067**.
8. K. Zehmed, and F. Jawab, «A combined approach based on fuzzy SERVPERF and DEA for measuring and benchmarking the quality of urban bus transport service at the route level», *Industrial Engineering & Management Systems*, vol. 19, pp. 442-459, 2020. doi: **10.7232/IEMS.2020.19.2.442**.
9. A. Kumar, and R. Anbanandam, «An MCDM framework for assessment of social sustainability indicators of the freight transport industry under uncertainty. A multi-company perspective», *Journal of Enterprise Information Management*, vol. 33, pp. 1023-1058, 2020. doi: **10.1108/jeim-09-2019-0272**.

10. A. Kumar, and R. Anbanandam, «Environmentally responsible freight transport service providers' assessment under data-driven information uncertainty», *Journal of Enterprise Information Management*, vol. 34, pp. 506-542, 2020. doi: **10.1108/JEIM-12-2019-0403**.
11. D. Pamucar, M. Deveci, F. Canitez, and D. Bozanic, «A fuzzy Full Consistency Method-Dombi-Bonferroni model for prioritizing transportation demand management measures», *Applied Soft Computing*, vol. 87, 105952, 2020. doi: **10.1016/j.asoc.2019.105952**.
12. A. Kumar, G. Singh, and O.S. Vaidya, «A comparative evaluation of public road transportation systems in India using multicriteria decision-making techniques», *Journal of Advanced Transportation*, vol. 20, pp. 1-16, 2020. doi: **10.1155/2020/8827186**.
13. A. Blagojević, S. Kasalica, Ž. Stević, G. Tričković, and V. Pavelkić, «Evaluation of safety degree at railway crossings in order to achieve sustainable traffic management: a novel integrated Fuzzy MCDM Model», *Sustainability*, vol. 13, pp. 1-20, 2021. doi: **10.3390/su13020832**.
14. M. Hamurcu, and T. Eren, «Strategic planning based on sustainability for urban transportation: an application to decision-making», *Sustainability*, vol. 12, pp. 1-24, 2020. doi: **10.3390/su12093589**.
15. G.-S. Kim, S.-W. Lee, Y.-J. Seo, and A.-R. Kim, «Multimodal transportation via TSR for effective Northern logistics: Perspectives of Korean logistics companies», *Maritime Business Review*, vol. 5, pp. 295-312, 2020. doi: **10.1108/MABR-07-2019-0029**.
16. J. Ortega, J. Tóth, S. Moslem, T. Péter, and S. Duleba, «An integrated approach of analytic hierarchy process and triangular fuzzy sets for analyzing the park-and-ride facility location problem», *Symmetry*, vol. 12, pp. 1-19, 2020. doi: **10.3390/sym12081225**.
17. S. Tadić, M. Krstić, V. Roso, and N. Brnjac, «Dry port terminal location selection by applying the hybrid Grey MCDM model», *Sustainability*, vol. 12, pp. 1-24, 2020. doi: **10.3390/su12176983**.
18. A. Shishegaran, A. Shishegaran, G. Mazzulla, and C. Forciniti, «A novel approach for a sustainability evaluation of developing system interchange: the case study of the Sheikhfazolah-Yadegar interchange, Tehran, Iran», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, pp. 1-25, 2020. doi: **10.3390/ijerph17020435**.
19. O. Bazaluk et al., «Methodology for assessing the risk of incidents during passenger road transportation using the functional resonance analysis method», *Heliyon*, vol. 8(75), e11814, pp. 1-11, 2022. doi: **10.1016/j.heliyon.2022.e11814**.
20. S. Cheberiyachko et al., «Improving safety of passenger road transportation», *Transactions on transport sciences*, vol. 14(2), pp. 11-20, 2023. doi: **10.5507/tots.2023.003**.
21. V.A. Tsopa, S.I. Cheberyachko, O.O. Yavorska, O.V. Deryugin, and T.O. Bil'ko, «Improvement of the professional risk management process according to Haddon's matrix», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, vol. 2, pp. 105-112, 2023. doi: **10.33271/nvngu/2023-2/105**.
22. O. Bazaluk et al., «Improving the risk management process in quality management systems of higher education», *Scientific Reports*, vol. 14, pp. 1-19, 2024. doi: **10.1038/s41598-024-53455-9**.
23. H. Zhou, Y. Xue, Z. Jiang, F. Cai, and W. Li, «An assessment model for air passenger risk classification», *Applied Sciences*, vol. 12(19), pp. 1-48, 2022. doi: **10.3390/app12199580**.
24. Y. Zhao, J. Li, and X. Ying, «Study on risk of long-steep downgrade sections of expressways based on a fuzzy hierarchy comprehensive evaluation», *Applied Sciences*, vol. 12(12), pp. 1-21, 2022. doi: **10.3390/app12125924**.
25. V.P. Yanovska, and A.V. Kyrychenko, «Osoblyvosti formuvannia stratehii rozvytku natsionalnykh avtotransportnykh pereviznykiv» [«Specificity of the formation of a strategy for the development of national road carriers»], *Menedzhment ta pidpriemnytstvo v Ukraini: etapy stanovlennia i problemy rozvytku – Management and Entrepreneurship in Ukraine: Stages of Formation and Problems of Development*, vol. 2(2), pp. 92-108, 2020. doi: **10.23939/smeu2020.02.092**. (Ukr.)
26. H.K. Salim et al., «Global trends in environmental management system and ISO14001 research», *Journal of Cleaner Production*, vol. 170(1), 645-653, 2018. doi: **10.1016/j.jclepro.2017.09.017**.
27. A. Galieriková, J. Sosedová, «Environmental aspects of transport in the context of development of inland navigation», *Ekológia (Bratislava)*, vol. 35(3), pp. 279-288, 2016. doi: **10.1515/eko-2016-0022**.
28. J. Liu et al., «Integrated fuzzy DEMATEL-ISM-NK for metro operation safety risk factor analysis and multi-factor risk coupling study», *Sustainability*, vol. 15(7), pp. 1-26, 2023. doi: **10.3390/su15075898**.

29. G.K. Koulinas, O.E. Demesouka, P.K. Marhavilas, A.P. Vavatsikos, and D.E. Koulouriotis, «Risk assessment using fuzzy TOPSIS and PRAT for sustainable engineering projects», *Sustainability*, vol. 11(3), pp. 1-15, 2019. doi: [10.3390/su11030615](https://doi.org/10.3390/su11030615).
30. U.E. Shahdah, S. Na, and J.W. Hu, «Assessing the impact of increasing tractor-trailer speed limit on the safety and mobility of three-lane highways in Egypt», *Applied Sciences*, vol. 12(24), pp. 1-17, 2022. doi: [10.3390/app122412702](https://doi.org/10.3390/app122412702).
31. C. Caliendo, G. Genovese, and I. Russo, «A simultaneous analysis of the user safety and resilience of a twin-tube road tunnel», *Applied Sciences*, vol. 12(7), pp. 1-25, 2022. doi: [10.3390/app12073357](https://doi.org/10.3390/app12073357).

Стаття надійшла 13.03.2024

Стаття прийнята 10.04.2024

УДК 502.58:504.064.4

doi: [10.31498/2225-6733.48.2024.310697](https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310697)

© Волошин В.С.¹

ОСОБЛИВОСТІ ПАПЕРОВИХ СТІН У ФОРМУВАННІ МІКРОЕКОСИСТЕМИ «ЯПОНСЬКИЙ ДІМ»

Робота стосується тем ретроекології, а саме особливостей мікроекосистем, пов'язаних з житлом народів світу. Розглянуто унікальний конструктивний елемент японського житла – паперову стіну. Показано, що за функціональним призначенням така споруда суттєво відрізняється від відомих будівельних стін. У цьому сенсі паперова стіна не відповідає загальноприйнятим критеріям якості. Однак цей елемент житла, який користується великою популярністю в Японії, знаходить своїх шанувальників і в інших мікроекосистемах. У роботі висвітлено ті загальновідомі якості паперових стін, які подобаються жителям Японії, всупереч існуючим стандартам, але в повній відповідності з японською аналоговою культурою. Враховуючи те, що на популярність паперових стін впливає не захист від кліматичних та інших впливів, а ментальність японського народу, в якості інструменту аналізу подібних структур був прийнятий механізм математичної логіки, а саме моделі логіки предикатів. Формалізована математична модель дозволила звернути увагу на деякі особливості в перевагах заданих предикатів і уточнити їх пріоритет для користувача. Такий підхід надав можливостей формалізувати розгляд тих аспектів предмета дослідження, які відносяться не до кількісних, а до якісних властивостей предмета досліджень, зокрема, до побутового і духовного стану людини в сукупності з інженерними і проектними параметрами даного предмета – стіни. Показано, що немає протиріччя в тому, що японська паперова стіна не призначена для виконання більшості відомих функцій звичайної стіни людського житла. Вона стала переважною для жителя країни не як захисна або теплозахисна споруда, а головним чином, як результат духовних трансформацій в суспільстві. Зокрема, це досягається за допомогою специфічної будівельної конструкції – паперової стіни. Таким чином, паперова стіна стала складовою для формування не тільки менталітету та психології, а й духовності для мешканця японських островів. Тобто те, що цінується понад усе в мікроекосистемі японського будинку.

Ключові слова: паперова стіна, структура, історична екологія, мікроекосистема, японське житло, захисні функції, японська культура.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-9922-5618

V.S. Voloshyn. Features of paper walls in the formation of the «Japanese house» microecosystem. The work relates to the topics of retroecology, namely, the features of microecosystems related to the housing of the peoples of the world. A unique structural element of a Japanese dwelling – a paper wall – is considered. It is shown that in terms of functional purpose, such a structure differs significantly from the well-known building walls. In this sense, the paper wall does not meet the generally accepted quality criteria. However, this element of housing, which is very popular in Japan, finds its admirers in other microecosystems. The paper highlights those well-known qualities of paper walls that appeal to the people of Japan, contrary to existing standards, but in full compliance with Japanese analog culture. Taking into account that the popularity of paper walls is influenced not by protection from climatic and other influences, but by the spirituality of the Japanese people, the mechanism of mathematical logic, namely, the model of predicate logic, was adopted as a tool for analyzing such structures. The formalized mathematical model made it possible to pay attention to some features in the preferences of the specified predicates and made it possible to clarify their priority for the user. It is not a contradiction that the Japanese paper wall is not designed to perform most of the known functions of an ordinary human dwelling wall. It has become preferable for the inhabitant of the country not as a protective or insulating structure, but mainly as a result of spiritual transformations in society. In particular, with the help of a specific building structure - a paper wall. Thus, the paper wall has become a component for the formation of mentality, psychology, and spirituality. That is, what is valued above all else in the microecosystem of the Japanese home.

Key words: paper wall, structure, historical ecology, microecosystem, Japanese housing, protective functions, Japanese culture.

Постановка проблеми. На початку VII століття японські оселі отримали дуже специфічні конструкції стін, на відміну від стін в традиційному розумінні в багатьох інших країнах. Це були стіни з певних видів паперу [1]. Конструкція такої стіни являє собою каркас з натягнутою з двох сторін паперовою основою, званою «кодзо». Японський папір «васі» – це продукт ручної обробки (лиття), створений ще в VII столітті. Його різновид «кодзо» – жорсткий і досить міцний папір з волокон кори білої японської паперової шовковиці використовується для створення стінових перегородок в оселях ще з VIII століття [2]. Стіна могла бути прозорою «сьодзі» або напівпрозорою «фасумі». Такі стіни стали основою традиційних японських осель. Додатково вони оснащувалися верхніми похилими навісами, які перешкоджали проникненню прямих сонячних променів в дім. Крім того, по периметру такі стіни були оточені галереями, які також перешкоджали потраплянню прямих сонячних променів. У цьому сенсі японський будинок і його паперові стіни представляють чималий інтерес з позицій предмета історичної екології.

Стіна в японському житлі спроектована таким чином, щоб перешкоджати проникненню яскравого світла і забезпечувати пропускання розсіяного світла, що було важливо спекотним літом. На відміну від традиційних стін, на які сонячні промені падали в низхідному напрямку, в японських будівлях відбите і розсіяне сонячне світло падало на стіни у висхідному напрямку [3]. Така система дозволяла уникнути високого нагріву приміщення в спекотні періоди року.

Взимку, коли зовнішня температура низька, така японська стіна не є перешкодою для охолодження житла. Настінна галерея «енгава» також має свою роль як компонент для забезпечення функціональності стіни. Як правило, вона не заповнюється меблями і її призначення – захищати стіну від зовнішньої видимості і прямих сонячних променів. Але не від втрати тепла в холодну пору року.

Таким чином, японська стінка не є регулятором теплообміну між житлом і навколишнім середовищем. Вона не виконує пряму функцію відбиття зовнішнього тепла і світла в теплу пору року, і не виконує функцію збереження тепла всередині приміщення в холодну пору року. Але при цьому популярність паперових стін тут дуже висока.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Особливості стінових конструкцій в японських оселях слід розуміти тільки через специфіку японської аналогової культури. Однією з важливих функцій стіни є організація необхідного природного освітлення, створення умов не тільки для світла і тіні, але і для управління напівтінями. Наприклад, затемнене приміщення дозволяло приховати скромність його архітектури, аскетизм житла, відсутність багатьох функціональних

речей, характерних для осель інших народів. На думку істориків, японські стіни спроектовані таким чином, щоб сприяти «світловому хаосу», на відміну від європейських, які сприяють систематичному впорядкуванню світла [3].

Житло в Японії завжди відрізнялося ієрархічною структурою внутрішнього простору, його напівдоступністю, що забезпечувалося умовами світло- і теплообміну. Тому друга основна функція стіни – бути джерелом структурування простору для проживання – стала головною. Але й тут, як правило, приміщення структурується лише умовно, рухливими, розсувними стінами з щільного паперу. Стіна повинна заповнити «просторову порожнечу», якій потім надається деяке осмислене значення [4, 5].

Навіть в сучасних житлових приміщеннях, структурованих щільними будівельними стінами, японські сім'ї намагаються зберегти можливість поділу або об'єднання житлового простору за допомогою паперових стін [5]. Маючи негороджений житловий простір і розділяючи його за бажанням на різні зони за допомогою паперових стін, сім'я, з одного боку, як би торкається тисячолітньої культури предків, зберігаючи основи їх мислення і поведінки як формулу власного існування, але, в той же час, отримує можливість вирішувати свої проблеми побутової структуризації житла на сучасному рівні.

Мета роботи – дослідити причинно-наслідкові властивості паперових стін та уточнити пріоритетності у їх функціональності для мікроекосистеми традиційних японських осель.

Виклад основного матеріалу. Для того, щоб зрозуміти суть теплового розрахунку житла в складі паперових стін, необхідно враховувати менталітет японської культури, зокрема, пріоритети природного освітлення у висхідному напрямку, світ тіней і півтіней, пустот, як нескінченної парадигми, де стіна – це проміжок між двома нескінченними порожнечами, що мають свій сакральний сенс (японське поняття «ма» – це вільний простір між ... і між ...): «житло має бути відкритим для природи і закритим для сторонніх». Оточуюча галерея навколо паперових стін будинку також служить цій меті. Та й енергетичний баланс такого будинку сильно відрізняється від традиційного. Тому розрахунок перерозподілу енергії будь-якого виду по відношенню до паперової стіни може мати нульовий результат, якщо застосувати методики, призначені для звичайної стіни будівлі. З іншого боку, математика не вміє враховувати емоції і настрої людини, щоб показати ефективність або неефективність стіни в японському варіанті. Розв'язування задач про такі властивості об'єктів і такі відношення між ними має бути завданням, наприклад, для алгебри логіки.

Питання, на яке потрібно відповісти:

«Паперова стіна – це благо чи технічна помилка?». Чи є суттєва потреба в паперових стінах?

Відповідь «так чи ні» не може привести до одностайного результату, адже шанування паперових стін засновано на традиціях, релігії, багатовіковій ментальності японського народу. Тобто категорії, які складно обчислити.

Відповідь на питання, що поставлене вище, явно не однозначне. Для європейця така споруда в світлі виконання функцій стіни ніколи не буде благом. Можна подивитися на дані порівняльних показників (табл. 1) і емпіричним шляхом розрахувати всі позитивні і негативні сторони цього технічного явища. Але також можна покласти на думку професійних експертів, які систематизують всі «Pro-Contra» і дадуть результат. Він і тоді не буде остаточним, тим самим зайвий раз підкреслюючи роль, яку відіграє ця споруда – «стіна».

Таблиця 1

Порівняльна характеристика об'єкта «паперова стіна» в японському суспільстві

№№	Позитивні якості та функції	Негативні якості і функції
1	Культурний символ країни.	Відсутність прагматизму при будівництві стіни
2	Специфіка організації необхідного освітлення. Відсутність прямих сонячних променів, освітлення знизу вгору	Для забезпечення основних функцій стіни потрібні додаткові елементи (козирки, галереї, зелені насадження)
3	Можливість споглядання природи, єднання з нею. Дім для природи, але не для сторонніх	Необхідність локального обігріву певних зон у приміщенні. Обігрів тільки центральної зони, де розташовується людина.

Продовження таблиці 1

№№	Позитивні якості та функції	Негативні якості і функції
4	Можливість підлаштування індивідуального простору під людину. Мобільність структурування простору	Умовність окремих територіальних зон, позначених розділовими лініями, але не стінами.
5	Простота і аскетизм конструкції, легкість маніпуляцій нею	Вимушена скромність архітектури приміщень, мінімалізм.
6	Організація розсіяного сонячного світла.	Не є перешкодою для проходження інформації (звуку, світла)
7	Розквіт паперового виробництва в державі. Розвиток специфічного ремесла.	Неможливість збереження тепла в зимовий період року.
8	Максимальне естетичне сприйняття. Культура тіні та півтіні, концепція порожнечі як уявного стану	

На наш погляд, відповідь можна отримати, наприклад, якщо застосувати закони логіки предикатів до моделі «мешканець Японії – паперова стіна». Цей математичний механізм дає можливість виконувати формальні дії з логічними висловлюваннями, якщо вони складені з урахуванням сенсу завдання.

Припустимо, що:

- множина (x) – це люди, які використовують паперові стіни;
- множина (y) – це набір всіляких паперових стін.

Властивість (P) полягає у використанні паперової стіни для умовної присутності в японському культурному просторі. Можливо припустити P у вигляді бінарного відображення для подвійного відкритого предиката. Формули, в яких присутній той чи інший предикат, також можуть відноситись і до закритих, відповідно до умов задачі.

Бінарний відкритий предикат (P) визначає відношення приналежності між x і y у таким, що формула $A = \{(x, y) | P(x, y)\}$ вказує на наступну властивість: на множині x всіх людей, які використовують паперові стіни y , x віддає перевагу y , тобто мешканці Японії віддають перевагу паперовим стінам у своїх оселях. Предикат $(\forall(x, y) P(x, y))$ істинний для всіх x і всіх y . Подібних предикатів або функцій в завданні може бути кілька, в залежності від його умов.

Завдання:

Кожен мешканець Японії водночас прагне:

- 1 – любити японську культуру і використовувати паперові стіни на протязі всього року;
- 2 – захищатися від спеки влітку і зігріватися взимку, що суперечить 1;
- 3 – віддавати перевагу єднанню з природою всередині свого будинку і захищати його від

сторонніх, що суперечить 2.

Питання: наскільки переважними є паперові стіни для жителя Японії?

Рішення:

Запишемо для кожного предиката вираз, в якому відповідно до умов задачі існує:

1. Предикат P – «приналежність (користування) до стіни»:

1.1. «кожному японцю (x) належить своя паперова стіна y » $\exists xP(x, y)$

2. Предикат Q – «приналежність до власної культури»:

2.1. «всі японці шанують японську культуру». $\forall xQ(x)$

2.2. «всі паперові стіни (y) є приналежністю (Q) до японської культури». $\forall yQ(y)$

2.3. «всі мешканці Японії (x) і всі паперові стіни (y) належать Q японській культурі $\forall xQ(x) \& \forall yQ(y) \rightarrow \forall xy(Q(x) \& Q(y))$.

3. Предикат R – «захист від зовнішньої енергії»:

3.1. «паперові стіни захищають від зовнішньої енергії влітку, але паперові стіни не захищають від холоду взимку» $\forall yR(y) \& \forall y\bar{R}(y) \rightarrow \forall y(R(y) \& \bar{R}(y))$

4. Предикат S – «захист від зовнішньої інформації»

4.1. «Паперові стіни (y) передають інформацію (світло, звук)» $\forall y\bar{S}(y)$

Зведені данні про формулювання математичної моделі представлені в таблиці 2. Розв'язанням задачі буде логічне рівняння з умовою непротиворечності $A \in \Gamma \Rightarrow \exists M(M \models \Gamma)$ переваг з числа

заданих. Тут $\Gamma \vdash A$ – множність гіпотез, серед яких є така, що відповідає вирішенню A даної задачі (A є похідною від Γ).

Таблиця 2

Опис математичної моделі M , що аналізує процеси, пов'язані з роботою паперової стіни*

№	Висловлювання	Предикатна константа	Атомарна формула
1	Кожному японцю належить його паперова стіна	P – приналежність стіни	$\exists xP(xy)$
2	Всі японці шанують японську культуру	Q – приналежність своїй культурі	$\forall xQ(x)$.
3	Всі паперові стіни є частиною японської культури		$\forall yQ(y)$
4	Весь народ Японії і всі паперові стіни належать японській культурі		$\forall xQ(x) \& \forall yQ(y) \rightarrow \rightarrow \forall xy(Q(x) \& Q(y)) \rightarrow \rightarrow \forall xyQ(xy)$
5	Паперові стіни захищають від зовнішньої енергії влітку, але паперові стіни не захищають вхід стужі взимку	R – захист від зовнішньої енергії	$\forall yR(y) \& \forall y\bar{R}(y) \rightarrow \rightarrow \forall y(R(y) \& \bar{R}(y))$
6	Паперові стіни пропускають інформацію у вигляді світла та звуку	S – захист від зовнішньої інформації	$\forall y\bar{S}(y)$
7	Завжди є паперова стіна, яка забезпечує вихід назовні до природи	T – комунікації скрізь стіну	$\exists yT(y)$
8	Сторонні особи можуть мати візуальний доступ через паперові стіни		$\exists xT(x)$
9	Завжди з'явиться паперова стіна, через яку можливий контакт із зовнішньою природою, але також буде хтось ззовні, хто зможе спілкуватися через неї		$\exists yT(y) \& \exists xT(x) \rightarrow \rightarrow \exists xT(x) \& \forall yT(y) \rightarrow \rightarrow \exists xy(T(x) \& T(y)) \rightarrow \rightarrow \exists xyT(xy)$
10	Кожен японець використовує паперову стіну як елемент національної культури, енергетично зручний для літа і незручний для зими, такий, що дарує єднання з природою і не захищає від зовнішньої інформації та стороннього проникнення	P – приналежність стіни (y) Q – приналежність своїй культурі R – захист від зовнішньої енергії S – захист від зовнішньої інформації T – комунікації скрізь стіну	$\exists xP(xy) \& \forall xyQ(xy) \& \forall y(R(y) \& \bar{R}(y)) \& \forall y\bar{S}(y) \& \exists xyT(xy)$

*- $x \in X$ множність людей, які живуть в Японії і шанують японську культуру; $y \in Y$ – множність варіантів паперових стін, що використовуються в японській будівельній архітектурі.

Математична модель, яка аналізує проблему і записується у вигляді сигнатури предиката, виглядає наступним чином

$$M = \exists xP(x) \& \forall xyQ(xy) \& \forall y(R(y) \& \bar{R}(y)) \& \forall y\bar{S}(y) \& \exists xyT(xy). \quad (1)$$

Її кореневий опис наведено в таблиці 2. Позначимо тут перелік об'єктних і предикатних констант в представленій моделі, серед яких виділимо зв'язані змінні x та y і вільні від образності змінні v та t , що фігурують в логічному аналізі. Згорнута послідовність логічних дій, що

представляють собою рішення задачі, показана на рис. 1. В результаті модель M набуває форму, зручну для логічних перетворень

$$M = [\forall xyP(xy/vt) \& \forall xyT(xy/vt)] \& [\forall y(R(y) \& \bar{R}(y)) \& \forall y\bar{S}(y)] \rightarrow \rightarrow [\forall xy(P(xy/vt) \& T(xy/vt))] \& [\forall y(1) \& \forall y\bar{S}(y)] \rightarrow [\forall xy(P(xy/vt) \& T(xy/vt))] \& \forall y\bar{S}(y) \quad (2)$$

А рішення проблеми, без її докладного опису на підставі рис. 1, зводиться до наступного

$$A = \forall(vt)[P(vt) \& T(vt)] \& \forall y\bar{S}(y) \quad (3)$$

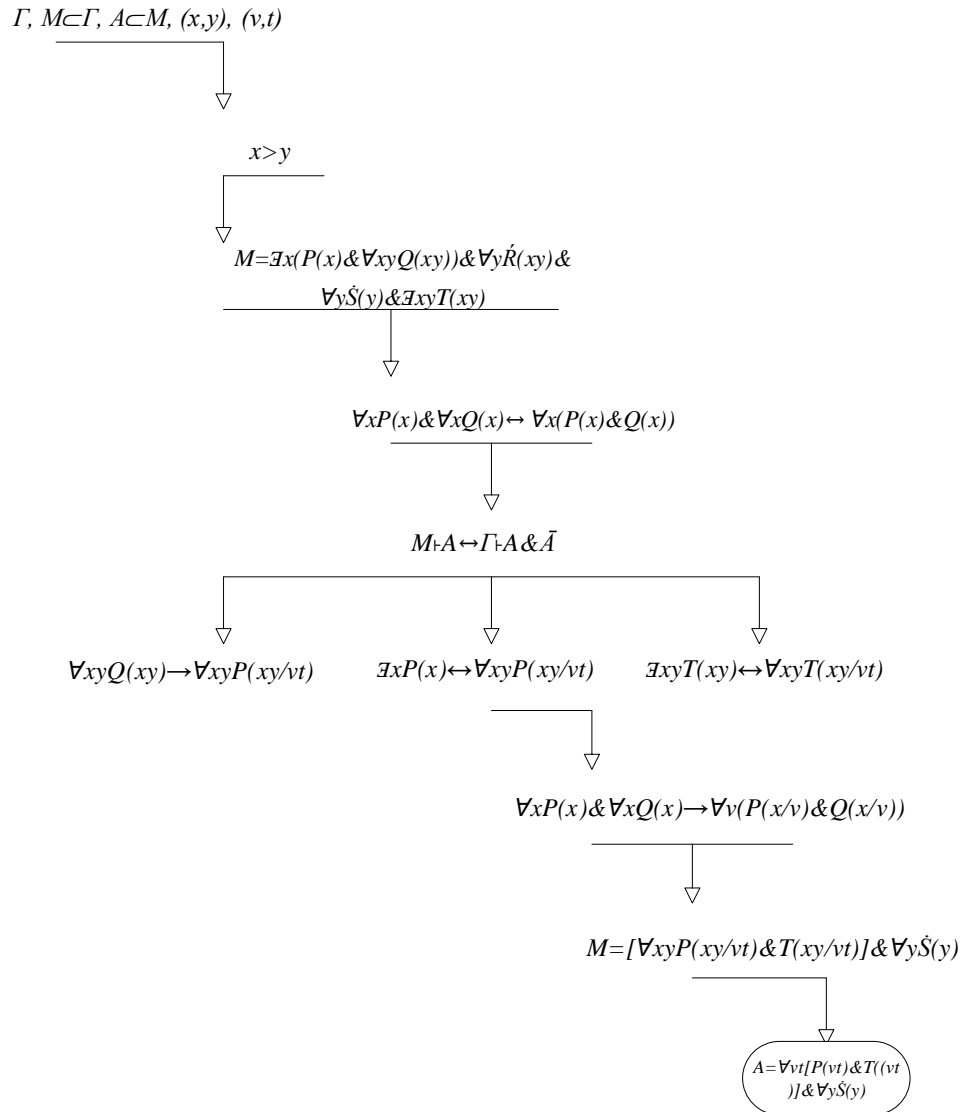


Рис. 1 – База даних і послідовність операцій в алгоритмі розв'язання задачі «паперової стіни» в японській оселі

Заміна зв'язаних параметрів вільними, відповідно до теорії Хенкіна, дозволила абстрагуватися від конкретного семантичного навантаження на користь формального прочитання логіки висловлення у формулах предикатів. У той же час у формулюваннях для висловлювань залишається умова загальності $x, y \in M; v, t \in \Gamma$. Тому ж і $x, y \in \Gamma$, що впливає з правила $\exists M(\exists A(M(A) \models \Gamma))$

Згідно з результатом, право на існування має наступне твердження:

- для всіх пар $(x \rightarrow v) \in M$ і $(y \rightarrow t) \in M$ існує абстрактна взаємодія, яка функціонально узгоджується з предикатами P і T , при відсутності взаємодії по предикату S (3). У цьому випадку предикат R представляється як нерелевантний, в порівнянні з предикатами P , S і T . Але при такому рішенні ми маємо справу тільки з однією зв'язаною змінною y і з вільними змінними $(v$ і $t) \in M$. Логічна інтерпретація цієї взаємодії наступна.

«Для всіх жителів Японії логічна приналежність до своєї культури перетворилася в інформаційну потребу, і тільки в такому вигляді вона порівнюється з логічною приналежністю особливо стіни» (3).

В розумінні корисності або перспективи паперової стіни, ми формально відійшли від добре відомих і простих функцій, таких як $\exists xP(x)$ або $\forall xQ(x)$, або $\forall yQ(y)$. Ми перейшли до більш ускладненого розуміння людських переваг. Запропоноване формалізоване рішення задачі пов'язує в області переваг таку функцію, як $Q(x)$ з предикатом Q – приналежність до власної культури. Він (можливо з часом) з успіхом доповнюється функціями $P(vt)$ і $T(vt)$ від предикатів P – приналежність стіни та T – комунікація через стіну, що показують на потребу в паперовій стіні, незважаючи на їх недоліки у вигляді теплоізоляційних властивостей, але на користь специфічних інформаційних та культурних властивостей: контакту з природою, прояви якості порожнечі в житловому просторі, можливостей для спілкування з сусідами та іншими людьми. Функція $S(y)$, яка є однією з головних якостей будь-якої іншої традиційної стіни, у випадку з паперовою стіною в Японії виявляється незатребуваною (предикат S у формулі кінцевого рішення) саме через цю особливість.

Перевага таких тверджень незаперечна, тому, в порівнянні з умовами поставленої задачі, логічне рішення вважається доведеним позитивно. А саме:

- незважаючи на відомі недоліки, паперові стіни існують і, беручи до уваги сучасні комунікативні традиції, та за їх межами, по відношенню до жителя японських островів, він віддає перевагу саме їм;

- мешканці японських островів вважають за краще не розлучатися зі своєю духовністю, зокрема, з аналоговою культурою, через приналежність до паперових стін, навіть на шкоду власному комфорту в оселі. Цим і обумовлена живучість паперових стін в будинку корінного жителя японських островів.

Таке рішення є паліативним, невичерпним і дає право на додаткові дослідження. Немає сумнівів, що XX і особливо XXI століття внесли свої корективи в культурні претензії сучасної Японії, в тому числі і в її будівельну індустрію. Але унікальні паперові стіни осель цієї країни залишилися в історії як символи гармонійного єднання людини з природою, співвиміру біологічних можливостей людини і стану навколишнього середовища, як прообраз мінімізації потреб людини в поєднанні з раціональним використанням природних ресурсів.

Висновки

З двох груп взаємовиключних переваг, пов'язаних з використанням паперових стін, а саме: перевага духовного характеру через приналежність до паперових стін (предикат P) та інформаційний контакт з природою (T) з одного боку, та перевага домашнього комфорту (R) та інформаційної ізоляції житла (S) з іншого боку, мешканець японських островів вибирає перші два, на супротив другій групі. На цьому ґрунтується популярність і пріоритет паперових стін в мікроекосистемах японського житла.

Перелік використаних джерел:

1. Why Is Japan Still So Attached to Paper? URL: <https://www.nytimes.com/2018/11/19/t-magazine/japanese-paper-washi.html> (дата звернення: 10.10.2023).
2. Sukey H. Washi. The world of Japanese paper. Kodansha International, 1978. 360 p.
3. Santini M. Where light casts no shadow. One wall, one window, five spaces. *Estudo prévio*. 2023. Vol. 22. Pp. 71-97. DOI: <https://doi.org/10.26619/2182-4339/22.MT.1>.
4. Nute K. Space, Time, and Japanese architecture: the birth of a new temporal tradition. *The International Journal of Architectonic Spatial and Environmental Design*. 2019. Vol. 13(3). Pp. 51-63. DOI: <https://doi.org/10.18848/2325-1662/CGP/v13i03/51-63>.
5. Ching-Yu Chang. Japanese Spatial Conception-1. *Japan Architect: International Edition of*

Shinkenckiku. 1984. № 324. Pp. 62-65.

References:

1. Why Is Japan Still So Attached to Paper? [Online]. Available: <https://www.ny-times.com/2018/11/19/t-magazine/japanese-paper-washi.html>. Accessed on: October 10, 2023.
2. Sukey H. Washi, *The world of Japanese paper*. Kodansha International, 1978.
3. M. Santini, «Where light casts no shadow. One wall, one window, five spaces», *Estudo prévio*, vol. 22. pp. 71-97, 2023. doi: **10.26619/2182-4339/22.MT.1**.
4. K. Nute, «Space, Time, and Japanese Architecture: The Birth of a New Temporal Tradition», *The International Journal of Architectonic Spatial and Environmental Design*, vol. 13(3), pp. 51-63, 2019. doi: **10.18848/2325-1662/CGP/v13i03/51-63**.
5. Ching-Yu Chang, «Japanese Spatial Conception-1», *Japan Architect: International Edition of Shinkenckiku*, № 324, pp. 62-65, 1984.

Стаття надійшла 15.12.2023

Стаття прийнята 05.01.2024

263 ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 614.869

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310702

© Чеберячко С.І.¹, Радчук Д.І.², Дерюгін О.В.³, Чеберячко Ю.І.⁴,
Наумов М.М.⁵, Кравченко Б.Д.⁶**УДОСКОНАЛЕННЯ МОДЕЛІ
ДЛЯ РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА ЗАХИСТУ ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО
РЕСПІРАТОРА ВІД ШКІДЛИВОГО АЕРОЗОЛЮ**

Мета дослідження. Удосконалення моделі для розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувальних респіраторів від шкідливого твердого аерозолі. *Матеріали і методи.* Для експериментального визначення коефіцієнта захисту фільтрувального респіатора відповідно до стандарту ДСТУ EN 149:2017 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Півмаски фільтрувальні для захисту від аерозолів. Вимоги, випробування, маркування» та застосування методу ДСТУ EN 13274-1:2005 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 1. Визначення коефіцієнта проникання і загального коефіцієнту проникання», використали на добровольцях легкі фільтрувальні півмаски для захисту від аерозолів типу «Стандарт» FFP2. *Результати.* Обчислено коефіцієнт захисту фільтрувальних респіраторів, що використовувались на добровольцях у лабораторних умовах при визначеній концентрації тест-аерозолі в навколишньому середовищі за стандартним методом випробувань, який описаний у ДСТУ EN 13274-1:2005 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 1. Визначення коефіцієнта проникання і загального коефіцієнту проникання» і передбачає врахування похибки вимірювання від приладів не більше 10%. Проведено порівняння отриманих показників коефіцієнта захисту фільтрувальних респіраторів у лабораторних умовах і за розробленою теоретичною моделлю з урахуванням осадження частинок у пробоотбірному зонді та підмасковому просторі півмаски під час процесу видихання, що показало гарний збіг показників за t-критерієм Стюдента. *Наукова новизна.* Наукова новизна полягає у розробці моделі для розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувальних респіраторів на основі оцінюваної масової функції розподілу аерозольних частинок в зоні дихання; функції проникнення через зазор між обличчям і півмаскою з урахуванням процесу вдихання і видихання, а також осадження частинок у пробоотбірному зонді. *Практичне значення* роботи полягає у розробці формули щодо теоретичного визначення коефіцієнта захисту фільтрувальних респіраторів, яка використовується для розрахунку професійного ризику захворювання користувачів на пневмоконіоз.

Ключові слова: математична розрахункова модель, коефіцієнт захисту, фільтрувальна півмаска, дихання людини, осадження часток, відбирання проби.

¹ д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3281-7157, sicheb@ukr.net

² д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8034-541X, radchuk.d.i@nmu.one

³ канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-2456-7664, deryugin_o@ukr.net

⁴ д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-7307-1553, cheberiachko.yu.i@nmu.one

⁵ канд. тех. наук, доцент, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-9748-2506, naumov.m.m@nmu.one

⁶ аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8398-0793, kravchenko.bo.d@nmu.one

S. Cheberiachko, D. Radchuk, O. Deryuhin, Yu. Cheberiachko, M. Naumov, B. Kravchenko. Improvement of the model for calculating the protection coefficient of filtering respirators from harmful aerosol. Research objective. Improvement of the model for calculating the protection coefficient of filtering respirators from harmful solid aerosol. Materials and methods. For the experimental determination of the protection coefficient of the filtering respirator according to the standard DSTU EN 149:2017 «Personal respiratory protective devices. Filtering half masks to protect against aerosols. Requirements, testing, marking» and the application of the method DSTU EN 13274-1:2005 «Personal respiratory protective devices. Methods of testing. Part 1. Determination of the penetration coefficient and the overall penetration coefficient», lightweight filtering half masks of «Standard» FFP2 type were used on volunteers. Results. The protection coefficient of the filtering respirators used on volunteers in laboratory conditions was calculated at the specified concentration of test aerosol in the ambient air by the standard testing method described in DSTU EN 13274-1:2005 «Personal respiratory protective devices. Methods of testing. Part 1. Determination of the penetration coefficient and the overall penetration coefficient» and takes into account the measurement error from the instruments not exceeding 10%. A comparison of the obtained indicators of the protection coefficient of filtering respirators in laboratory conditions and with the developed theoretical model, taking into account particle deposition in the sampling probe and submask space during the exhalation process, showed a good agreement of the indicators by the Student's t-test criterion. Scientific novelty. The scientific novelty lies in the development of a model for calculating the protection coefficient of filtering respirators based on the assessed mass distribution function of aerosol particles in the breathing zone; penetration function through the gap between the face and the half mask, taking into account the inhalation and exhalation process, as well as particle deposition in the sampling probe. Practical significance of the work lies in the development of a formula for the theoretical determination of the protection coefficient of filtering respirators, which is used to calculate the professional risk of pneumoconiosis among users.

Key words: mathematical calculation model, protection coefficient, filtering half mask, human respiration, particle deposition, sampling.

Постановка проблеми. У звіті Всесвітньої організації охорони здоров'я (далі – ВООЗ) за 2023 рік зазначено, що неінфекційні захворювання (NCDs) є основною причиною смертності, на яку припадає 61% усіх смертей у світі (31 млн. випадків) [1]. З них 4,1 млн. смертей викликані респіраторними захворюваннями. Ця трагічна цифра змушує всіх фахівців, які займаються проблемою збереження здоров'я працівників, шукати адекватні шляхи вирішення даної проблеми [2]. Профілактика захворювань органів дихання з пневмоконіозу ймовірно являється одним із найбільш дієвих підходів зі зменшення їх кількості [3]. Для визначення результативних методів профілактики пневмоконіозу в конкретних виробничих умовах, найбільш доцільним являється застосування процесу керування професійними ризиками [4], який дозволяє підтримувати баланс між економічним прибутком організації та її фінансовими втратами, пов'язаними зі страховими виплатами [5]. Разом з цим, оцінювання ризику розвитку професійних захворювань органів дихання від кількості накопиченого пилу дозволить, в першу чергу, зменшити кількість зазначених в звіті смертей працівників.

Першим кроком в процесі керування професійним ризиком являється ідентифікація небезпек, небезпечних чинників, які впливають на ймовірності настання небезпечної події [6]. Звідси виникає необхідність в розробці адекватної моделі для визначення кількості респірабельної фракції пилу, яка осідає в легенях, з урахуванням впливу різних небезпечних чинників, включаючи морфологію, фізико-хімічні властивості, форму та розмір частинок пилу [7], тривалість вдихання, стаж роботи працівника, а також його індивідуальні показники здоров'я (наприклад, куріння, генетичні відмінності [8, 9]). Це дозволить розробити результативну стратегію захисту здоров'я працівників, включаючи застосування персональних захисних засобів органів дихання [10].

На даний час розглядаються два основних типи моделей осідання респірабельної фракції вугільного пилу в легенях:

- аналітичні моделі, які обчислюють осадження частинок в дихальних шляхах за допомогою диференціальних рівнянь аеродинамічного руху частинки по каналу з визначенням основних механізмів їх осідання [11];

- напівемпіричні моделі, в основі яких рівняння переносу та осадження частинок в закритих каналах, які потребують експериментальних досліджень щодо встановлення вихідних даних [12].

Разом з тим, в основі зазначених моделей знаходяться рівняння Ейлера-Лагранжа, які дозволяють моделювати рух частинки в дихальних шляхах, включаючи можливі переходи від турбулентного до ламінарного потоку, з можливою рециркуляцією, появою вихрових потоків та значних перепадів тиску. Враховуючи складність зазначеної теми, мета наших досліджень полягає в тому, щоб поєднати відомі моделі з осаду пилових частинок в легенях з розвитком захворювань на пневмоконіоз та з урахуванням ефективності використання персональних фільтрувальних засобів захисту органів дихання. Складність полягає в тому, що розмір аерозольних частинок відіграє ключову роль у визначенні місця їх осідання у дихальній системі. Так, аерозольні частинки діаметром менше 3 мкм мають найбільшу ймовірність їх відкладення в області альвеол, що збільшує рівень ризику виникнення захворювань [13]. З іншого боку, фільтрувальні респіратори, які широко використовуються для захисту працівників, найгірше вловлюють саме зазначену фракцію пилу [14]. Це призводить до ілюзії захисту. Звідси виникає необхідність в удосконаленні зазначених моделей з осідання аерозольних частинок в легенях працівників з урахуванням додаткового бар'єру – фільтрувального респіратора, який не тільки відсіює певну кількість аерозолу в легенях, а й створює ситуацію для глибшого проникнення найнебезпечніших частинок пилу в нижні частини легень через зміну частоти і глибини дихання, викликану додатковим опором дихання [15].

Другим кроком у керуванні професійними ризиками являється виявлення взаємозв'язку між небезпекою – присутністю пилу в повітрі, настанням небезпечної події – вдиханням присутнього в повітрі робочої зони пилу та тяжкістю наслідків – розвитку професійного захворювання на пневмоконіоз на основі експериментальних залежностей між кількістю пилу та реакцією організму [16]. Разом з тим, аналіз таких залежностей показав, що, на жаль, не враховується вплив всіх наявних небезпечних чинників (людських, організаційних, технічних), що збільшують як тяжкість, так і ймовірність настання небезпечної події. Удосконалення зазначених моделей дозволить розробити дієві рекомендації зі зменшення ризику виникнення професійних захворювань, які виникають через вдихання пилу з вмістом оксиду кремнію, навіть при застосуванні фільтрувальних респіраторів [17].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі можна знайти кілька наукових досліджень для розрахунку коефіцієнта ефективності фільтрувальних респіраторів на основі розробки теоретичних моделей руху пилових потоків. При цьому застосовуються рівняння Кана-Гіліярда-Хеле-Шоу, представленого Ченом та ін. [18], метод кінцевих елементів, запропонований Фенгом і Пролем [19], а також відома математична модель Новьє-Стокса, які дозволяють отримати траєкторію руху частинки у фільтрах респіратора, яким займається Дігель та ін. [20]. В інших дослідженнях для розрахунку коефіцієнта захисту застосовувались методи гідродинаміки (CFD) для моделювання осадження частинок на волокнах фільтра. Цікаво, що ці дослідження були присвячені виявленню можливості уловлювання рідинних аерозолів, що утворюються при чханні [21]. Проте в дослідженнях не врахована можливість зменшення дисперсії частинок через зазори за смугою обтюрації. Існує дослідження Корнехо та ін. [22] щодо моделювання осадження аерозольних частинок на поверхні респіратора для теоретичного розрахунку коефіцієнта проникнення на основі створеного при диханні людиною турбулентного потоку, що значно впливає на аеродинамічну дисперсію крапель і аерозолу. Було виявлено значний вплив на перенесення аерозолу турбулентним потоком, що призводить до збільшення величини проникнення крізь фільтрувальний шар. Разом з тим, виникає необхідність у встановленні часу фіксування і за яких умов у підмасковому просторі створюється турбулентність.

Лей та ін. [23] проаналізували рух пилових потоків через одноразовий респіратор із застосуванням оптичного методу в інфрачервоній камері. Зокрема, вони досліджували наявність різних проміжків витоків між обличчям і півмаскою, підкреслюючи, що область з найбільшим

потоком витоку знаходиться над носом і очима, а потім щоками. Крім того, за допомогою аналізу мінливості температури, вони виявили збільшення тепла в області рота та губ, пов'язуючи це з температурним дискомфортом для користувача. Однак в вище зазначеній роботі відсутні рекомендації для врахування виявлених ефектів при теоретичному розрахунку коефіцієнта захисту респіраторів.

Наявність зазорів між обличчям і півмаскою зменшує об'єм фільтрованого повітря при вдиху і видиху. Така ситуація спричиняє більшу дисперсію нефільтрованого повітря, що сприяє погіршенню захисних властивостей респіраторів, зазначається у роботі [24].

Враховуючи потребу покращити характеристики та дизайн захисних масок, виникає потреба у теоретичному розрахунку коефіцієнта захисту респіраторів для його використання при уточненні терміну захисної дії, наприклад, в умовах, які відрізняються від лабораторних, чи для оцінювання рівня ризику для вибору ЗІЗОД, як вимагає технічний регламент.

Метою даної роботи є удосконалення моделі для розрахунку коефіцієнта захисту фільтрувальних респіраторів від шкідливого твердого аерозолію.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні завдання:

- проведення теоретичного обґрунтування формули для розрахунку коефіцієнта захисту респіратора, який потрібен для визначення області, терміну використання та розрахунку ризику застосування засобів індивідуального захисту органів дихання;
- проведення порівняння експериментальних досліджень і теоретичних розрахунків коефіцієнта захисту респіратора для встановлення невизначеності розрахунків;
- удосконалення підходу для оцінки професійного ризику при використанні респіратора.

Для визначення коефіцієнта захисту фільтрувального респіратора, використовують відому формулу [25, 26]:

$$KЗР = C/C_i, \tag{1}$$

де C_i – виміряна підмаскова концентрація аерозолію, mg/m^3 ; C – концентрація пилового аерозолію в навколишньому середовищі, mg/m^3 .

Для експериментального визначення коефіцієнта захисту респіратора на добровольцях використовували легкі фільтрувальні півмаски для захисту від аерозолів типу «Стандарт» FFP2 (виробник ТОВ НВП «Стандарт»). Було залучено шість добровольців, яких підбирали у відповідності до таблиці 1.

Таблиця 1

Розподіл випробувачів за розмірами обличчя

Діапазони висоти обличчя, мм	Нормативна ширина обличчя, мм [1]		
	129-139 (1 зона)	140-145 (2 зона)	146-155 (3 зона)
136-126	-	2-й випробувач	5-й випробувач
125-116	1-й випробувач	3-й випробувач	6-й випробувач
115-105	-	4-й випробувач	-

Випробувачі були ознайомлені з правилами безпеки і процедурою проведення випробувань, а також дали згоду на добровільну участь у випробуваннях та збір їх особистих даних. Перед початком експерименту їх ознайомили з інструкціями виробника з правильного надягання фільтрувальної півмаски, при цьому кожен самостійно відрегулював кріплення півмаски. Наступним кроком була оцінка припасування півмаски за допомогою швидкого *fittest* з використанням різкого аерозолію бітрекс. У разі неможливості досягнення гарного прилягання півмаски до обличчя випробувач не приймав участь у дослідженні.

Стенд для визначення захисної ефективності респіраторів на людях відповідає вимогам ДСТУ EN 149:2017 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Півмаски фільтрувальні»

для захисту від аерозолів. Вимоги, випробування, маркування». Схема установки наведено відповідно на рисунку 1.

Добровольці під час дослідження виконували послідовно протягом 14 хвилин різні дії (вправи), що імітували виробничу діяльність тривалістю 2 хв. кожна, а саме:

- 1 – звичайне дихання;
- 2 – глибоке дихання;
- 3 – повертання голови вправо-вліво;
- 4 – рухи голови вгору і вниз;
- 5 – розмова вголос;
- 6 – ходьба на біговій доріжці зі швидкістю 6 км/год;
- 7 – наклони тулуба.

Стандартний генератор аерозолу хлориду натрію надає можливість формувати частинки розміром у межах від 0,02 до 2 мкм при середньомасовому діаметрі близько 0,6 мкм. Додатково використовувався ультразвуковий розпилювач Ballu UHB-314, який створював полідисперсний аерозоль хлориду натрію з частинками різного розміру до 100 мкм.

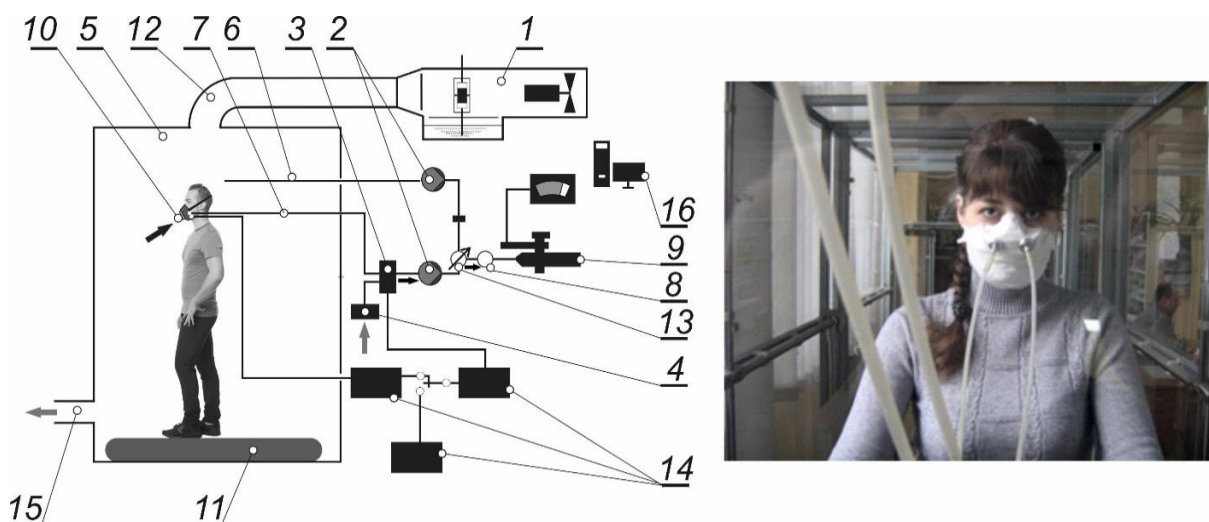


Рис. 1 – Схема стенду з визначення коефіцієнту проникання респіраторів за тест-аерозолем хлорид натрію на людях: 1 – генератор аерозолу з компресором та трубопроводом аерозолу; 2 – аспіратор; 3 – багатоходовий клапан; 4 – фільтр HEPA; 5 – випробувальна камера, куди зверху надходить аерозоль; 6 – патрубок для відбирання проби тест-аерозолу з камери; 7 – патрубок із зондом для відбирання проби тест-аерозолу з підмаскового простору; 8 – датчик тиску для перемикання фаз «вдих-видих» при відбиранні проб; 9 – атомно-абсорбційний спектрофотометр С-115М1Е; 10 – випробуваний зразок; 11 – бігова доріжка, що розміщена у випробувальній камері; 12 – повітропровід і розподілювач повітря; 13 – патрубок для подавання чистого повітря; 14 – система розподілу фаз вдихання – видихання; 15 – комп'ютер з програмою для реєстрації даних зі спектрофотометра

В стандартний та додатковий генератори заливався 2% розчин хлориду натрію на основі дистильованої води. Створений генераторами аерозоль розганявся для однорідності по випробувальній камері за допомогою 4-х осьових вентиля рів діаметром 100 мм, які встановлені по кутах камери.

Розмір частинок визначався пиломіром NY-dust Laser Sensor фірми HiYi (Китай), який визначає концентрації в діапазоні від 0 до 10 мг/м³ та фіксованими точками визначення концентрації PM_{1,0}, PM_{2,5}, PM_{5,0}, PM₁₀. В даному випадку використовували дані з двох каналів, а саме PM_{5,0} та PM₁₀. Точність пиломіра становить ±10%, роздільна здатність 0,001 мг/м³.

Концентрацію тест-аерозолю (хлорид натрію) у камері і підмасковому просторі підмасок визначали за допомогою спектрофотометру Селмі С-115М1Е (Україна). У випробувальній камері вона складала 8...10 мг/м³. Додатково концентрація у випробувальній камері контролювалась гравіметричним методом за допомогою фільтра АФА та швидкістю постійного відбору проб повітря через нього 40 дм³/хв³ за допомогою аспіратора «Тайфун-Б». Фільтр АФА зважувався перед та після проведення відбирання проб з подальшим визначенням зміни маси навіски фільтра АФА на електронних вагах ANZ100С (Україна). Точність становить $\pm 1\%$, роздільна здатність 0,0001 г. За отриманими даними розраховувалась загальна концентрація у випробувальній камері. Концентрації частинок більших за 10 мкм визначались як залишкові значення концентрацій на фільтрах АФА.

Для виміру концентрації в підмасковому просторі використовувався пробовідбірник, указаний на рисунку 2, одночасно, а у камері – додатковий, який знаходився на рівні обличчя випробувача. Швидкість аспірації аерозолів і в першому, і в другому випадку складала 3 дм³/хв для унеможливлення створення додаткових ліній нещільності по смузі обтюрації через збільшення вакууметричного тиску в підмасковому просторі при вдиху. У кожного випробувача постійно проводили заміри протягом виконання кожної дії (вправи). Результат осереднювався, заносився у таблицю спеціалізованої програми ААС-2009, що додається до спектрофотометра, та виводився на монітор комп'ютера у вигляді графіків та узагальнюючої таблиці.

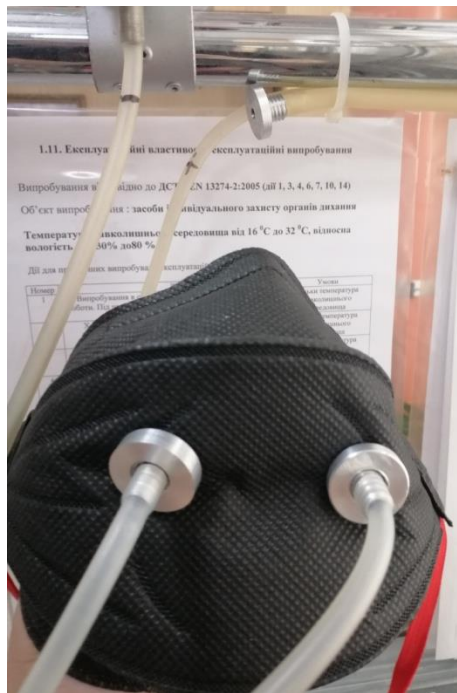


Рис. 2 – Вигляд пробовідбірника з підмаски і навколишнього середовища камери

Результати експериментальних даних осереднювались з оцінкою невизначеності вимірювань при $P < 0.05$ відповідно до Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement – JCGM 100:2008. Брались до уваги також рекомендації ІЛАС-G17:01/2021 ІЛАС Guidelines for Measuring Uncertainty in Testing.

Теоретичні результати дослідження. Для визначення підмаскової концентрації аерозолю C_i розглянемо вплив помилок та різних факторів, що надають похибку при визначенні реальної концентрації в підмасковому просторі. При вдиханні людиною повітря безперервно рухається в підмасковому просторі та органах дихання. Існує два основних підходи до відбирання проб з підмаскового простору: перший – це постійний відбір проби (на фазі вдиху та на фазі видиху) та другий підхід, коли відбирання проводиться тільки на фазі вдиху, тоді як на фазі видиху повітря відбирається з чистого середовища.

Розглянемо перший підхід, оскільки він більше відповідає контролюванню рівня шкідливої речовини в повітрі робочої зони, коли відбирання проб повітря з підмаскового простору відкачується і при вдиху, і при видиху. Загальний підхід до уточнення в математичному вигляді підмаскової концентрації детально описано в дослідженні [27]. При вдиху та при видиху похибку вимірювання підмаскової концентрації можна вважати різною, оскільки шлях проходження забрудненого повітря буде різним, тому складові похибки будуть відрізнятись. При вдиху виміряна підмаскова концентрація може знижуватись через осадження частинок на вході в пробовідбірний зонд і пробовідбірних лініях. Також є похибка, пов'язана з положенням та заглибленням кінця пробовідбірного зонда, положення зазору, характеру дихання та конструкції півмаски [28-30]. Існує похибка, яка пов'язана з тим, що певна кількість частинок забруднювача осяде на внутрішній стороні респіратора через вологість підмаскового повітря. Підмаскова концентрація частинок будь-якого діаметру у відкачаному повітрі при вдиху $C_{вдих}(x)$ може бути пов'язана з концентрацією пилу, виміряною в підмасковому просторі при вдиху $C_T(x)$ рівнянням:

$$C_{вдих}(x) = C_T(x) \times (1 - SD(x)) \times (1 + SB_{вдих}(x)) \times (1 + SH_{вдих}(x)), \quad (2)$$

де $SD(x)$ – ймовірність осадження частинок на вході в зонд і вимірювальної лінії, $SB_{вдих}(x)$ – похибка вимірювань при вдиху через місце встановлення пробовідбірного зонда або його вхідного отвору, $SH_{вдих}(x)$ – ймовірність осадження частинок в підмасковому просторі шляхом їх уловлювання вологістю повітря.

Зауважимо, що $SB(x)$ може бути як позитивним, так і негативним, і ймовірно, що у кожного поєднання респіратора з пробовідбіним зондом може бути своя похибка [28-30].

При видиху органи дихання можна порівняти з фільтром, через який повинен пройти аерозоль перед виміром. В такому випадку виміряна підмаскова концентрація при видиху $C_{видих}(x)$ може бути визначена рівнянням:

$$C_{видих}(x) = C_T(x) \times (1 - LD(x)) \times (1 + SD(x)) \times (1 + SB_{видих}(x)) \times (1 + SH_{видих}(x)), \quad (3)$$

де $LD(x)$ – ймовірність осадження частинок при проходженні через органи дихання, $SB_{видих}(x)$ – похибка обладнання відбору проб при видиху, $SH_{видих}(x)$ – ймовірність осадження частинок в підмасковому просторі шляхом їх уловлювання вологістю повітря.

Слід зазначити, що концентрація у підмасковому просторі не змінюється під час переходу від вдиху до видиху миттєво. Найчастіше місце встановлення зонду знаходиться перед ротом, тому концентрація поблизу зонда залежатиме від цієї «залишкової» концентрації та від ефективності перемішування повітря, що вдихається. На перемішування повітря будуть впливати об'єм підмаскового простору та робота клапанів видиху. Загалом можна вважати, що сумарний вплив на виміряну концентрацію залежатиме від відношення обсягу мертвого простору до об'єму вдиху. Цей ефект описаний в [31], але тут передбачається, що ефект перемішування малий, і їм можна знехтувати.

У рівнянні (2) та (3) $C_T(x)$ можна замінити на $C_T \times f_i(x)$ (добуток повної реальної концентрації та функції, що описує масовий розподіл за розмірами частинок під маскою) для частинок розміром x . Проінтегрувавши для частинок всіх розмірів і перегрупувавши, отримаємо поправочні коефіцієнти CF для вдиху та видиху:

$$CF_{вдих} = \frac{C_{вдих}}{C_T} = \int_0^\infty f_i(x) (1 - SD(x)) (1 + SB_{inh}) (1 + SB_{вдих}(x)) dx, \quad (4)$$

$$CF_{\text{видих}} = \frac{C_{\text{видих}}}{C_T} = \int_0^{\infty} f_i(x)(1-LD(x))(1-SD(x))(1+SB_{\text{видих}}(x))(1+SH_{\text{видих}}(x))dx, \quad (5)$$

де $C_{\text{вдох}}$ і $C_{\text{видих}}$ – повні підмаскові концентрації при вдиху та видиху, а C_T – справжня повна підмаскова концентрація при вдиху.

Так як виміряна концентрація C_i – середньозважена ($C_{\text{вдох}}$ і $C_{\text{видих}}$), то за допомогою вищеписаних рівнянь можна отримати вираз для оцінки реальної концентрації пилу в підмасковому просторі:

$$C_{ia} = C_i / (T_{\text{вдох}} \times C_T F_{\text{вдох}} + (1-T_{\text{вдох}}) \times C_T F_{\text{видих}}), \quad (6)$$

де C_i – виміряна приладами концентрація в підмасковому просторі; C_{ia} – підмаскова концентрація з корекцією – оцінка реальної концентрації C_T при вдиху, $K_{\text{нідс}}$ – коефіцієнт, який характеризує ймовірність проходження частинок через нещільності за смугою обтюрації, а $T_{\text{вдох}}$ – відносна тривалість вдиху.

Паузи при вдиху немає. Можна зауважити, що співвідношення $T_{\text{вдох}}$ до $T_{\text{видих}}$ за спокійного стану людини становить 1:1. При збільшенні дихального навантаження на людину співвідношення вдих-видих змінюється до 2:1. Це обумовлено тим, що на фазі вдиху людина найбільше насичує організм киснем, а у видихуваному повітрі частка кисню значно менша, оскільки замінюється видихуваним діоксидом вуглецю (до 5 % об'ємних).

Похибка відбору проб при вдиху $SB_{\text{вдох}}(x)$ вимірювалася в лабораторних умовах, і виявилось, що вона дуже нестабільна і залежить від типу респіратора, характеру дихання і положення зазору, також в деякій мірі є індивідуальною для кожної людини і використовуваного респіратора [28-30]. Встановлення зонда біля рота допоможе зменшити цю похибку [29, 30].

Для використання рівнянь (4) та (5) потрібно знати ГДК під маскою. При вдиху підмаскова ГДК може бути отримана шляхом множення зовнішньої ГДК на функцію проникнення частинок через зазор:

$$f_i(x) = \frac{f_a(x) \times LF(x)}{f_a(x) \times LP(x)}, \quad (7)$$

де $f_i(x)$ – оцінювана масова функція розподілу, $f_a(x)$ – виміряна масова функція розподілу в зоні дихання (виміряна або стаціонарним або індивідуальним вимірником ГДК) і $LP(x)$ – функція проникнення через зазор (9) (ймовірність проникнення через зазор).

Знаменник – поправочний член, тому площа під графіком підмасочної ГДК = 1. Функцію зовнішнього масового розподілу для одномодального логарифмічно-нормального розподілу можна обчислити так:

$$f_a(x) = \frac{1}{\log_{10} \Gamma ДК \sqrt{2\pi}} \times \exp\left(-\left(L_{nx} - L_n GM\right)^2\right) / \left(2 \times (Ln \Gamma ДК)^2\right), \quad (8)$$

де GM – це середньгеометричний розмір частинки, мкм.

В загальному вигляді формули можна представити наступним чином:

$$C_{ia} = C_i / (T_{\text{вдох}} \times C_i \times (1 + K_{\text{нідс}}) \times CF_{\text{вдох}} + (1 - T_{\text{вдох}}) \times C_i \times (1 + K_{\text{нідс}}) \times CF_{\text{видих}}). \quad (9)$$

Зазначимо, що проведені дослідження [32, 33] показують, що величина підмоткування за смугою обтюрації не є постійним показником та залежить від сили натягу стрічок головного

гарнітура, ширини смуги обтюрації, виду виконуваних робіт (нахил або повороти голови), потреби в промовлянні та наявності місць, де таке прилягання буде мінімальним.

Під час обґрунтування формули (9) було зроблено наступні припущення: частинки пилу головним чином потрапляють під маску не через фільтр, а через зазори по смугі обтюрації, дефекти в масці чи технологічні отвори (клапан видиху тощо); частинки при потрапленні в підмасковий простір зволожуються через вологість повітря, яка викликана диханням людини.

Оцінювання впливу вологості повітря досліджувались авторами [34-37].

При експериментальних дослідженнях коефіцієнту захисту респіратору отримано усереднене значення концентрації у випробувальній камері $8,47 \text{ мг/м}^3$. Коефіцієнт проникання дорівнює 4,1%.

За відсутності інформації про розмір зазору або перепад тиску (інтенсивності роботи) використовуємо рівняння для обчислення проникнення через зазори, які отримані в роботі [27]:

$$\begin{aligned} K_{\text{ндс}} &= 1 - (0,97 - 0,074d) \text{ при } 0,1 \leq d \leq 12 \text{ мкм}; \\ K_{\text{ндс}} &= 0 \text{ при } d < 0,1 \text{ мкм}; \\ K_{\text{ндс}} &= 0 \text{ при } d > 12 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для розрахунків вважаємо, що в діапазоні 0-5 мкм значення медіани становитиме 2,5 мкм, для діапазона 5-10 мкм – 7,5 мкм відповідно та для часток розміром більше 10 мкм $K_{\text{ндс}}$ дорівнюватиме нулю. Головна причина уловлювання частинок у пробовідбірному зонді є інерційне осадження. Попередні дослідження показали, що для півмасок з примусовою подачею повітря при відкачуванні турбулентного повітря з-під маски 18,8% частинок діаметром 8 мкм осідає у вхідному отворі зонда. Частинки < 7 мкм практично не осідають, і частки більші 12 мкм під маску не просочуються. Використовуючи ці результати, можна визначити ймовірність осадження частинок $SD(x)$ у зонді так:

$$\begin{aligned} SD(x) &= 0\% \text{ при } d < 7 \text{ мкм}; \\ SD(x) &= 19\% \text{ при } 7 < d < 10 \text{ мкм}; \\ SD(x) &= 23\% \text{ при } 10 < d < 12 \text{ мкм}. \end{aligned} \quad (11)$$

Дані щодо ймовірності осадження частинок в органах дихання приймаємо згідно [27]. Для розрахунків вважаємо, що в діапазоні 0-5 мкм середнє значення осідання частинок в органах дихання становитиме 32%, для діапазона 5-10 мкм – 90% відповідно та для часток розміром більше 10 мкм дорівнюватиме 96%.

Зусилля, яке потрібне для початку дії сил адгезії між частинками або частинок з поверхнею респіратора, має бути більшим за силу руху частинки в повітряному потоці. Частинки до 10 мкм мають достатньо низьку рушійну силу, тому сили адгезії з ними будуть вступати в дію. Частинки більші за 10 мкм вже мають достатньо маси та рушійної сили в потоці, тому для них сили злипання не є діючими (табл. 2).

Таблиця 2

Експериментальні дослідження коефіцієнту захисту респіратора

Діапазон частинок, мкм	Концентрація аерозолю, мг/м^3	Підмаскова концентрація аерозолю, мг/м^3	Похибка вимірювання приладів	Коефіцієнт захисту респіратора
менше 5	6,895	0,316	10 %	$21,8 \pm 2,2$
5 - 10	1,346	0,021	10 %	$63,1 \pm 6,3$
Більше 10	0,229	0,002	10 %	135 ± 13

Для уточнення даних скористаємось даними щодо концентрацій у випробувальній камері та підмасковому просторі згідно таблиці 2, які були отримані шляхом прямих вимірів приладами (табл. 3).

Таблиця 3

Теоретичні розрахунки коефіцієнту захисту респіратора

Діапазон частинок, мкм	Концентрація аерозолю, мг/м ³	Підмаскова концентрація аерозолю, мг/м ³	Розрахований коефіцієнт підмокування	Коефіцієнт агдезії частинок	Коефіцієнт захисту респіратора
0 - 5	6,895	0,316	0,215	0,05	19,1±1,5
5 - 10	1,346	0,021	0,585	0,05	61,3±6,1
Більше 10	0,229	0,002	0,000	0,01	142,3±24,0

У таблиці 3 наведено значення *KЗР*, яке обчислене за результатами лабораторних досліджень у відповідності до описаного алгоритму з визначення концентрації тест-аерозолю в камері та у підмасковому просторі респіратора. Показники *KЗР* для відповідних діапазонів частинок коливаються в межах від 21,8 до 135,3. При цьому розрахункові значення *KЗР* з урахуванням впливів осадження аерозолю у пробовідбонному зонді у підмасковому просторі дозволили отримати діапазон від 14,1 до 231,3. Для порівняння чи відповідають встановлені результати *KЗР* генеральній сукупності значень, проводимо додаткову статистичну обробку обидвох вибірок отриманих значень за показником t-критерія Ст'юдента, розрахованим за формулою [38]:

$$t = \frac{|X_1 - X_2|}{\sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 n_2} \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{(n_1 + n_2 - 2)}}}, \quad (12)$$

де n_1, n_2 – кількість результатів вимірювань, виконаних в лабораторних умовах, і теоретичних розрахункових значень; X_1, X_2 – середні значення показників коефіцієнта захисту респіратора у лабораторних умовах і теоретичних розрахунків відповідно; S_1, S_2 – дисперсія випадкової величини коефіцієнта захисту респіратора, отриманих відповідно у лабораторних умовах і за результатами теоретичних розрахунків.

В таблиці 4 наведені результати статичної обробки вибірок з визначення коефіцієнта захисту респіратора у лабораторних умовах і згідно теоретичних розрахунків.

Таблиця 4

Результати статичної обробки вимірювань коефіцієнта проникнення респіраторів, отриманих у лабораторних і виробничих умовах

Показник	Показники вибірок отриманих при випробуваннях						Величина показника, τ_p
	у лабораторії			у виробках вугільних шахт			
	об'єм вибірки	середнє значення	дисперсія	об'єм вибірки	середнє значення	дисперсія	
Коефіцієнт захисту респіраторів	6	21,8	1,7	8	19,1	1,5	2,1
	6	63,1	3,1	8	61,3	3,1	1,19
	6	135,5	5,2	8	142,3	5,32	2,2

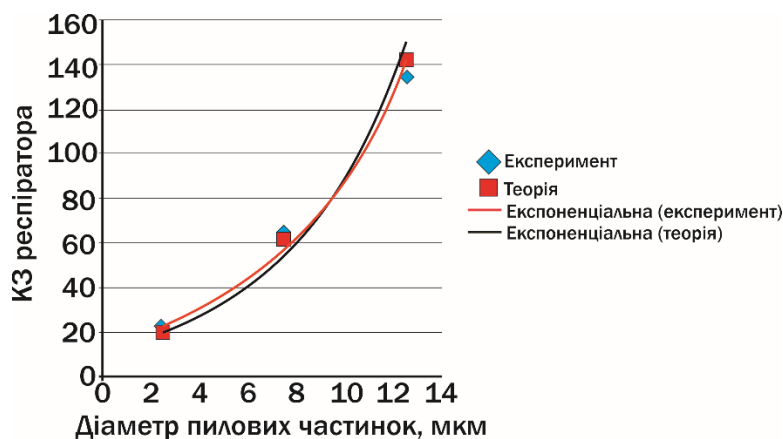


Рис. 3 – Графік залежності КЗ респіратора від розміру часток пилу

За результатами отриманих експериментальних даних та розрахованих теоретичних даних можна спрогнозувати значення коефіцієнту захисту для респіратора з урахуванням присутності пилових частинок різного діаметру (рис. 3). Даний рисунок вказує на незначні відхилення між експериментальними даними та даними, отриманими згідно запропонованих формул.

З табл. 4 видно, що середні значення показників коефіцієнта проникнення респіраторів відрізняються один від одного. Однак величина t -критерію Ст'юдента, що розраховується для двох вибірок, менше стандартного табличного значення 2,37 для ймовірності 0,95. Такі результати дають змогу зробити висновок, що результати коефіцієнта захисту респіратора, отримані у лабораторії та за теоретичним розрахунком, співпадають між собою з ймовірністю 0,95 [38].

Отже, в результаті виконання досліджень було проведено теоретичне обґрунтування моделі для розрахунку коефіцієнта захисту респіраторів на основі оцінювання масової функції розподілу аерозольних частинок в зоні дихання та функції проникнення через зазор між обличчям і півмаскою з урахуванням процесу вдихання і видихання, а також осадження частинок у пробовідбірному зонді. Дана теоретична модель враховує найбільш критичні за думкою авторів фактори, що впливають на загальний коефіцієнт захисту респіратора.

Отримано відповідну формулу, що дозволяє визначити захисну ефективність респіратора з урахуванням зовнішніх факторів. Це дозволить оцінювати термін захисної дії ЗІЗОД в умовах, які відмінні від лабораторних. Відмінність розробленої моделі від відомих полягає в тому, що враховується процес адгезії частинок при вдиханні і видиханні, що призводить до осідання деяких частинок на внутрішній поверхні півмаски. Також є розуміння, що певна кількість аерозольних частинок видихається, що призводить до їх поєднання з іншими частинками, які потрапили у підмасковий простір при процесі вдихання. В цьому випадку, середньгеометричний розмір такої частинки збільшується, а загальна кількість частинок пилу в підмасковому просторі зменшується.

При вимірі $KPЗ$ одночасно відбиралися проби повітря як із зони дихання (C_o), так і з-під маски (C_i). Для вимірювання C_i з підмаскового простору на випробувану півмаску встановлювався пробовідбірний зонд. Відбір проб повітря з-під маски проводився безперервно – при вдиху та при видиху, через що реальна підмаскова концентрація при вдиху була вище вимірюваної і вимірюваний $KPЗ$ вище реального $KPЗ$.

Концентрація пилу знижувалася з різних причин: через осадження частинок – у легенях людини, на вході в пробовідбірний зонд, при русі від зонда до касети з фільтром НЕРА (4) (див. рис. 1) і через неповне перемішування повітря під маскою, оскільки є зони, наприклад, біля виліць, до руху повітря є мінімальним.

Хоча ці фактори, що впливають на втрати/зміни концентрації, в окремих випадках важко чітко визначити в числовому вигляді, проте їх можна оцінити. Треба зауважити, що є й інші причини осадження частинок і, якщо їх не врахувати, то коефіцієнт в підмасковому просторі C_i знизиться, а $KPЗ$ – буде мати завищене значення. Це, в свою чергу, буде призводити до ілюзії захищеності працівника. Зокрема такі фактори були раніше описані щодо впливу аерозолі на

загальний коефіцієнт захисту. Найбільш важливий фактор, що не враховується, це осадження частинок на стінках касети з фільтром. Такий процес відбувається і для підмаскової, і для зовнішньої поверхні фільтра, що загалом призводить до збільшення похибки при визначенні підмаскової концентрації C_i , тоді як на загальну концентрацію в робочій зоні C_o це критично не впливає. Тому для усунення заниження підмаскової концентрації C_i та концентрації в робочій зоні C_o потрібно вимірювати осадження і на фільтрі, і на його стінках.

Якщо $KPЗ$ – правильна оцінка захисних властивостей респіратора, традиційне визначення $KPЗ$, яке завищує його, потрібно відкоригувати. В роботі це продемонстровано на прикладі визначення коефіцієнту захисту фільтрувальних півмасок на добровольцях у лабораторних умовах, де було враховано похибки вимірювання від приладів не більше 10%.

Для наступних досліджень необхідно врахувати вплив відносної вологості повітря на загальний рівень концентрації пилу як в підмасковому просторі, так й в повітрі робочої зони. Оскільки зволожені частинки пилу будуть рухатись в турбулентному потоці, то може виникати інерційне осадження частинок пилу на внутрішню поверхню респіратора та обличчя працівника. В такому випадку буде виникати адгезія між вище зазначеними поверхнями [39, 40], що відобразиться на підмасковій концентрації C_i шкідливого аерозолію.

Висновки

1. Проведено теоретичне обґрунтування моделі для розрахунку коефіцієнта захисту респіраторів на основі оцінювання масової функції розподілу аерозольних частинок в зоні дихання; функції проникнення через зазор між обличчям і півмаскою з урахуванням процесу вдихання і видихання, а також осадження частинок у пробовідбірному зонді.

2. Встановлено коефіцієнт захисту респіраторів у лабораторних умовах на добровольцях при визначенній концентрації тест-аерозолію в навколишньому середовищі за стандартним методом випробувань, що описаний у ДСТУ EN 13274-1:2005 «Засоби індивідуального захисту органів дихання. Методи випробування. Частина 1. Визначення коефіцієнта проникання і загального коефіцієнту проникання», для якого було встановлено похибку вимірювання від приладів не більше 10%.

3. Проведено порівняння отриманих показників коефіцієнта захисту респіраторів у лабораторних умовах і за розробленою теоретичною моделлю з урахуванням осадження частинок у пробоотбірному зонді та підмасковому просторі під час процесу видихання, що показало гарний збіг показників за t-критерієм Ст'юдента.

Перелік використаних джерел:

1. World Health Statistics 2023. Офіційний сайт INCUBATOR – Global health education and learning at Harvard University. URL: <https://repository.gheli.harvard.edu/repository/11008/> (дата звернення: 15.06.2023).
2. Analysis of the research subjects and hot topics of occupational diseases through the Web of Science from 1975 to 2021 / H. R. Saberi, H. Rabiei, A. Zare, M. D. Jazari, M. Malakoutikhah. *Frontiers in Public Health*. 2022. Vol. 10. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1009203>.
3. Pneumoconiosis: current status and future prospects / X.M. Qi et al. *Chinese Medical Journal*. 2021. Vol. 134. Iss. 8. Pp. 898-907. DOI: <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000001461>.
4. Dabbicco G., Mattei G. The reconciliation of budgeting with financial reporting: A comparative study of Italy and the UK. *Public Money & Management*. 2021. Vol. 41. Iss. 2. Pp. 127-137. DOI: <https://doi.org/10.1080/09540962.2019.1708059>.
5. Alkhyoon H., Abbaszadeh M. R., Zadeh F. N. Organizational risk management and performance from the perspective of fraud: a comparative study in Iraq, Iran, and Saudi Arabia. *Journal of Risk and Financial Management*. 2023. Vol. 16(3). Pp. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/jrfm16030205>.
6. Development and internal validation of risk assessment models for chronic obstructive pulmonary disease in coal workers / H. Wang et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20(4). Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20043655>.
7. Respirable coal mine dust: a review of respiratory deposition, regulations, and characterization /

- Y. Shekarian et al. *Minerals*. 2021. Vol. 11(7). Pp. 1-25. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11070696>.
8. Paul R., Adeyemi O., Arif A. A. Estimating mortality from coal workers' pneumoconiosis among Medicare beneficiaries with pneumoconiosis using binary regressions for spatially sparse data. *American Journal of Industrial Medicine*. 2022. Vol. 65(4). Pp. 262-267. DOI: <https://doi.org/10.1002/ajim.23330>.
 9. Clinical statistics analysis on the characteristics of pneumoconiosis of Chinese miner population / M.F. Wang et al. *Journal of Thoracic Disease*. 2016. Vol. 8(8). Pp. 2203-2211. DOI: <https://doi.org/10.21037/jtd.2016.07.53>.
 10. Prediction of aerosol deposition in the human respiratory tract via computational models: a review with recent updates / V. K. H. Bui et al. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11(2). Pp. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos11020137>.
 11. Laney A. S., Weissman D. N. Respiratory diseases caused by coal mine dust. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*. 2014. Vol. 56. Pp. 518-522. DOI: <https://doi.org/10.1097/JOM.0000000000000260>.
 12. Kleinstreuer C., Zhang Z. Airflow and particle transport in the human respiratory system. *Annual reviews*. 2010. Vol. 42. Pp. 301-334. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145453>.
 13. Physico-chemical properties and reactive oxygen species generation by respirable coal dust: Implication for human health risk assessment / M. A. Zazouli et al. 2021. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 405. 124185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124185>.
 14. Sarver E., Keleş Ç., Afrouz S. G. Particle size and mineralogy distributions in respirable dust samples from 25 US underground coal mines. *International Journal of Coal Geology*. 2021. Vol. 247. 103851. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coal.2021.103851>.
 15. Review of respirable coal mine dust characterization for mass concentration, size distribution and chemical composition / B. Abbasi et al. *Minerals*. 2021. Vol. 11(4). Pp. 1-36. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11040426>.
 16. A systematic review of occupational exposure to coal dust and the risk of interstitial lung diseases / C. Beer et al. *European Clinical Respiratory Journal*. 2017. Vol. 4. Iss. 1. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1080/20018525.2017.1264711>.
 17. Chemistry and particle size distribution of respirable coal dust in underground mines in Central Eastern Europe / P. Trechera et al. *International Journal of Coal Science & Technology*. 2022. Vol. 9. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40789-022-00468-2>.
 18. Convergence analysis of a fully discrete finite difference scheme for the Cahn-Hilliard-Hele-Shaw equation / Chen W., Liu Y., Wang C., Wise S. M. *Mathematics of Computation*. 2016. Vol. 85. № 301. Pp. 2231-2257. DOI: <https://doi.org/10.1090/mcom3052>.
 19. Nonlinear stability of the implicit-explicit methods for the Allen-Cahn equation / Feng X., Song H., Tang T., Yang J. *Inverse Problems and Imaging*. 2013. Vol. 7. № 3. Pp. 679-695. DOI: <https://doi.org/10.3934/ipi.2013.7.679>.
 20. Convergence analysis and error estimates for a second order accurate finite element method for the Cahn-Hilliard-Navier-Stokes system / Diegel A. E., Wang C., Wang X., Wise S. M. *Numerische Mathematik*. 2017. Vol. 137. Pp. 495-534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00211-017-0887-5>.
 21. Research on regularities of cyclic air motion through a respirator filter / O. Bazaluk et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(7). Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11073157>.
 22. Cornejo P., Guerrero N., Sandoval V. Aerodynamic dispersion of respiratory droplets and aerosols by turbulent airflow. *Fluids*. 2021. Vol. 6(3). Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/fluids6030119>.
 23. Perić R., Perić M. Analytical and numerical investigation of the airflow in face masks used for protection against COVID-19 virus – implications for mask design and usage. *Journal of Applied Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 13(6). Pp. 1911-1923. DOI: <https://doi.org/10.47176/jafm.13.06.31812>.
 24. Development of a dust respirator by improving the half mask frame design / O. Bazaluk et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18105482>.
 25. Automated air pressure control system in a motorised breathing apparatus / D. Slavinskyi et al. *Machinery & Energetics*. 2024. Vol. 15(1). Pp. 9-22. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2024.09>.

26. Tu J., Yeoh G.-H., Liu C. Chapter 3 – Governing Equations for CFD-Fundamentals. *Computational Fluid Dynamics. A Practical Approach*. 2-nd ed. 2013. Pp. 61-121. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-098243-4.00003-2>.
27. Burdon Test – Landolt Rings Online. Interactive Portal-Book of Methods of Self-Development. URL: https://metodorf.com/tests/bourdon/bourdonlandolt.php#google_vignette (дата звернення: 20.09.2023).
28. Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1 / N. Neeltje van Doremalen et al. *The New England journal of Medicine*. 2020. Vol. 382. № 16. Pp. 1564-1567. DOI: <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>.
29. Bourouiba L., Dehandschoewercker E., Bush J. W. M. Violent expiratory events: on coughing and sneezing. *Journal of Fluid Mechanics*. 2014. Vol. 745. Pp. 537-563. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.88>.
30. How far droplets can move in indoor environments-revisiting the Wells evaporation-falling curve / X. Xie et al. *Indoor air*. 2007. Vol. 17(3). Pp. 211-225. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x>.
31. Sun C., Zhai Z. The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 62. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102390>.
32. Increasing the insulation properties of filter respirators to protect miners' respiratory organs from dust / S. Cheberiyachko et al. *Rudarsko-geološko-Naftni Zbornik*. 2023. Vol. 38(4). Pp. 27-40. DOI: <https://doi.org/10.17794/rgn.2023.4.3>.
33. Development of an algorithm for effective design of respirator half-masks and encapsulated particle filters / Cheberiyachko S., Cheberiyachko Y., Naumov M., Deryugin O. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2022. Vol. 28(2). Pp. 1145-1159. DOI: <https://doi.org/10.1080/10803548.2020.1869429>.
34. Han Y., Hu Y., Qian F. Effects of air temperature and humidity on particle deposition. *Chemical Engineering Research and Design*. 2011. Vol. 89(10). Pp. 2063-2069. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2011.02.001>.
35. Effects of ambient temperature and humidity on natural deposition characteristics of airborne biomass particles / Yuan Y., Li S., Chen T., Ren J. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20(3). Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20031890>.
36. Sustainable concrete: Building a greener future / L. Assi et al. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 198. Pp. 1641-1651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.123>.
37. Shao Y. Adhesion theory and model for air humidity impact on dust emission. *Aeolian Research*. 2024. Vol. 66. 100898. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2024.100898>.
38. Gábor B., Gábor K. Data analysis for business, economics, and policy. Cambridge : Cambridge University Press, 2021. 730 p. URL: <https://www.cambridge.org/highereducation/books/data-analysis-for-business-economics-and-policy/D67A1B0B56176D6D6A92E27F3F82AA20#overview>.
39. Fukunishi A., Mori Y. Adhesion force between particles and substrate in a humid atmosphere studied by atomic force microscopy. *Advanced Powder Technology*. 2006. Vol. 17. Iss. 5. Pp. 567-580. DOI: <https://doi.org/10.1163/156855206778440552>.
40. Busnaina A. A., Elsayw T. The effect of relative humidity on particle adhesion and removal. *The Journal of Adhesion*. 2000. Vol. 74. Iss. 1-4. Pp. 391-409. <https://doi.org/10.1080/00218460008034538>.

References:

1. World Health Statistics 2023. INCUBATOR – Global health education and learning at Harvard University. [Online]. Available: <https://repository.gheli.harvard.edu/repository/11008/>. Accessed on: June 15, 2023.
2. H.R. Saberi, H. Rabiei, A. Zare, M.D. Jazari, and M. Malakoutikhah, «Analysis of the research subjects and hot topics of occupational diseases through the Web of Science from 1975 to 2021», *Frontiers in Public Health*, vol. 10, pp. 1-15, 2022. doi: **10.3389/fpubh.2022.1009203**.
3. X.M. Qi et al., «Pneumoconiosis: current status and future prospects», *Chinese Medical Journal*, 134(8), 898-907, 2021. doi: **10.1097/CM9.0000000000001461**.
4. G. Dabbicco, and G. Mattei, «The reconciliation of budgeting with financial reporting: A

- comparative study of Italy and the UK», *Public Money & Management*, vol. 41, iss. 2, pp. 127-137, 2021. doi: **10.1080/09540962.2019.1708059**.
5. H. Alkhyoon, M.R. Abbaszadeh, and F.N. Zadeh, «Organizational Risk Management and Performance from the Perspective of Fraud: A Comparative Study in Iraq, Iran, and Saudi Arabia», *Journal of Risk and Financial Management*, vol. 16(3), pp. 1-27, 2023. doi: **10.3390/jrfm16030205**.
 6. H. Wang et al., «Development and Internal Validation of Risk Assessment Models for Chronic Obstructive Pulmonary Disease in Coal Workers», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(4), pp. 1-20, 2023. doi: **10.3390/ijerph20043655**.
 7. Y. Shekarian, E. Rahimi, M. Rezaee, W.-C. Su, and P. Roghanchi, «Respirable Coal Mine Dust: A Review of Respiratory Deposition, Regulations, and Characterization», *Minerals*, vol. 11(7), pp. 1-25, 2021. doi: **10.3390/min11070696**.
 8. R. Paul, O. Adeyemi, and A.A. Arif, «Estimating mortality from coal workers' pneumoconiosis among Medicare beneficiaries with pneumoconiosis using binary regressions for spatially sparse data», *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 65(4), pp. 262-267, 2022. doi: **10.1002/ajim.23330**.
 9. M.F. Wang et al., «Clinical statistics analysis on the characteristics of pneumoconiosis of Chinese miner population», *Journal of Thoracic Disease*, vol. 8(8), pp. 2203-2211, 2016. doi: **10.21037/jtd.2016.07.53**.
 10. V.K.H. Bui, J.-Y. Moon, M. Chae, D. Park, and Y.-C. Lee, «Prediction of Aerosol Deposition in the Human Respiratory Tract via Computational Models: A Review with Recent Updates», *Atmosphere*, vol. 11(2), pp. 1-27, 2020. doi: **10.3390/atmos11020137**.
 11. A.S. Laney, and D.N. Weissman, «Respiratory diseases caused by coal mine dust», *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 56, pp. 518-522, 2014. doi: **10.1097/JOM.0000000000000260**.
 12. C. Kleinstreuer, and Z. Zhang, «Airflow and Particle Transport in the Human Respiratory System», *Annual reviews*, vol. 42, pp. 301-334, 2010. doi: **10.1146/annurev-fluid-121108-145453**.
 13. M.A. Zazouli et al., «Physico-chemical properties and reactive oxygen species generation by respirable coal dust: Implication for human health risk assessment», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 405, 124185, 2021. doi: **10.1016/j.jhazmat.2020.124185**.
 14. E. Sarver, Ç. Keleş, and S.G. Afrouz, «Particle size and mineralogy distributions in respirable dust samples from 25 US underground coal mines», *International Journal of Coal Geology*, vol. 247, 103851, 2021. doi: **10.1016/j.coal.2021.103851**.
 15. B. Abbasi et al., «Review of respirable coal mine dust characterization for mass concentration, size distribution and chemical composition», *Minerals*, 11(4), pp. 1-36, 2021. doi: **10.3390/min11040426**.
 16. C. Beer et al., «A systematic review of occupational exposure to coal dust and the risk of interstitial lung diseases», *European Clinical Respiratory Journal*, vol. 4, iss. 1, pp. 1-11, 2017. doi: **10.1080/20018525.2017.1264711**.
 17. P. Trechera et al., «Chemistry and particle size distribution of respirable coal dust in underground mines in Central Eastern Europe», *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 9, pp. 1-17, 2022. doi: **10.1007/s40789-022-00468-2**.
 18. W. Chen, Y. Liu, C. Wang, and S. M. Wise, «Convergence analysis of a fully discrete finite difference scheme for the Cahn-Hilliard-Hele-Shaw equation», *Mathematics of Computation*, vol. 85, № 301, pp. 2231-2257, 2016. doi: **10.1090/mcom3052**.
 19. X. Feng, H. Song, T. Tang, and J. Yang, «Nonlinear stability of the implicit-explicit methods for the Allen-Cahn equation», *Inverse Problems and Imaging*, vol. 7, № 3, pp. 679-695, 2013. doi: **10.3934/ipi.2013.7.679**.
 20. A.E. Diegel, C. Wang, X. Wang, and S.M. Wise, «Convergence analysis and error estimates for a second order accurate finite element method for the Cahn-Hilliard-Navier-Stokes system», *Numerische Mathematik*, vol. 137, pp. 495-534, 2017. doi: **10.1007/s00211-017-0887-5**.
 21. O. Bazaluk et al., «Research on Regularities of Cyclic Air Motion through a Respirator Filter», *Applied Sciences*, vol. 11(7), pp. 1-15, 2021. doi: **10.3390/app11073157**.
 22. P. Cornejo, N. Guerrero, and V. Sandoval, «Aerodynamic Dispersion of Respiratory Droplets and Aerosols by Turbulent Airflow», *Fluids*, vol. 6(3), pp. 1-14, 2021. doi: **10.3390/fluids6030119**.
 23. R. Perić, and M. Perić, «Analytical and Numerical Investigation of the Airflow in Face Masks used

- for Protection against COVID-19 Virus – Implications for Mask Design and Usage», *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 13(6), pp. 1911-1923, 2020. doi: **10.47176/jafm.13.06.31812**.
24. O. Bazaluk et al., «Development of a dust respirator by improving the half mask frame design», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, pp. 1-12, 2021. doi: **10.3390/ijerph18105482**.
25. D. Slavinskyi, T. Bilko, Yu. Cheberyachko, S. Cheberyachko, and O. Deryugin, «Automated air pressure control system in a motorised breathing apparatus», *Machinery & Energetics*, vol. 15(1), pp. 9-22, 2024. doi: **10.31548/machinery/1.2024.09**.
26. J. Tu, G.-H. Yeoh, and C. Liu, «Chapter 3 - Governing Equations for CFD-Fundamentals», in *Computational Fluid Dynamics. A Practical Approach*, 2013, pp. 61-121. doi: **10.1016/B978-0-08-098243-4.00003-2**.
27. Burdon Test – Landolt Rings Online. Interactive Portal-Book of Methods of Self-Development. [Online]. Available: https://metodorf.com/tests/bourdon/bourdonlandolt.php#google_vignette. Accessed on: September 20, 2023.
28. N. Neeltje van Doremalen et al., «Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1», *The New England journal of Medicine*, vol. 382, № 16, pp. 1564-1567, 2020. doi: **10.1056/NEJMc2004973**.
29. L. Bourouiba, E. Dehandschoewercker, and J.W.M. Bush, «Violent expiratory events: on coughing and sneezing», *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 745, pp. 537-563, 2014. doi: **10.1017/jfm.2014.88**.
30. X. Xie, Y. Li, A.T. Chwang, P.L. Ho, and W.H. Seto, «How far droplets can move in indoor environments-revisiting the Wells evaporation-falling curve», *Indoor air*, vol. 17(3), pp. 211-225, 2007. doi: **10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x**.
31. C. Sun, and Z. Zhai, «The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission», *Sustainable Cities and Society*, vol. 62, pp. 1-10, 2020. doi: **10.1016/j.scs.2020.102390**.
32. S. Cheberiyachko et al., «Increasing the insulation properties of filter respirators to protect miners' respiratory organs from dust», *Rudarsko-geološko-Naftni Zbornik*, vol. 38(4), pp. 27-40, 2023. doi: **10.17794/rgn.2023.4.3**.
33. S. Cheberyachko, Y. Cheberyachko, M. Naumov, and O. Deryugin, «Development of an algorithm for effective design of respirator half-masks and encapsulated particle filters», *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 28(2), pp. 1145-1159, 2022. doi: **10.1080/10803548.2020.1869429**.
34. Y. Han, Y. Hu, and F. Qian, «Effects of air temperature and humidity on particle deposition». *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 89(10), pp. 2063-2069, 2011. doi: **10.1016/j.cherd.2011.02.001**.
35. Y. Yuan, S. Li, T. Chen, and J. Ren, «Effects of Ambient Temperature and Humidity on Natural Deposition Characteristics of Airborne Biomass Particles», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20(3), pp. 1-14, 2023. doi: **10.3390/ijerph20031890**.
36. L. Assi, K. Carter, E. Deaver, R. Anay, and P. Ziehl, «Sustainable concrete: Building a greener future», *Journal of Cleaner Production*, vol. 198, pp. 1641-1651, 2018. doi: **10.1016/j.jclepro.2018.07.123**.
37. Y. Shao, «Adhesion theory and model for air humidity impact on dust emission», *Aeolian Research*, vol. 66, 100898, 2024. doi: **10.1016/j.aeolia.2024.100898**.
38. B. Gábor, and K. Gábor, *Data Analysis for Business, Economics, and Policy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
39. A. Fukunishi, and Y. Mori, «Adhesion force between particles and substrate in a humid atmosphere studied by atomic force microscopy», *Advanced Powder Technology*, vol. 17, iss. 5, pp. 567-580, 2006. doi: **10.1163/156855206778440552**.
40. A.A. Busnaina, and T. Elsayy, «The Effect of Relative Humidity on Particle Adhesion and Removal», *The Journal of Adhesion*, vol. 74, iss. 1-4, pp. 391-409, 2000. doi: **10.1080/00218460008034538**.

Стаття надійшла 10.02.2024

Стаття прийнята 28.02.2024

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.61.052.4:629.051

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310704

© Калініченко Є.В.¹, Томчаковський Г.Г.², Оберто Сантана Л.Е.³,
Колеснік О.В.⁴, Саф'ян О.С.⁵**АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ МЕТОДУ ПОЄДНАННЯ
ЕЛЕКТРОННОЇ КАРТОГРАФІЧНОЇ НАВІГАЦІЙНО-ІНФОРМАЦІЙНОЇ
СИСТЕМИ З РАДІОЛОКАЦІЙНОЮ СТАНЦІЄЮ СУДНА**

Статтю присвячено аналізу значення накладення радіолокаційного зображення на екран електронної картографічної навігаційно-інформаційної системи (ЕКНІС) для підвищення безпеки та ефективності судноводіння. На основі огляду наукових публікацій і фахової літератури розглядаються технічні аспекти реалізації функції накладення, її переваги та обмеження, а також вплив на процес ухвалення рішень судноводієм. Накладення радіолокаційної інформації на електронну навігаційну карту забезпечує інтеграцію планових і фактичних даних про навколишнє оточення, що сприяє підвищенню ситуаційної обізнаності судноводія. Поєднання систем дає змогу візуально зіставляти радіолокаційні цілі з картографічними об'єктами, уточнювати місце розташування судна, контролювати дрейф і орієнтацію, виявляти навігаційні небезпеки. Особливу цінність функція накладення має під час плавання в обмежених водах і в умовах обмеженої видимості. Водночас застосування технології накладення пов'язане з низкою технічних труднощів і обмежень, пов'язаних із забезпеченням точності суміщення, узгодженням форматів даних, синхронізацією оновлення інформації. Похибки в роботі систем позиціонування, курсовказання, помилки картографії можуть призводити до неузгодженості шарів зображення і невірної інтерпретації навігаційної ситуації. Критично важливе значення мають питання надійності обладнання, налаштування параметрів відображення, компетентності та підготовленості судноводіїв. Підкреслюється, що накладання радіолокаційного зображення на ЕКНІС є ефективним інструментом підвищення безпеки судноводіння, але не замінює традиційних навігаційних практик і не скасовує необхідності критичної оцінки даних. Надмірна залежність від технології, ігнорування її обмежень і нехтування принципами доброї морської практики можуть призводити до прийняття помилкових рішень і негативно позначатися на безпеці. Подальші перспективи розвитку технології можна пов'язати з удосконаленням алгоритмів обробки інформації, оптимізацією людино-машинної взаємодії, розвитком методів підготовки фахівців. Наголошується на необхідності комплексного підходу, що поєднує вдосконалення технічних систем і людського фактору для повної реалізації потенціалу функції накладення в забезпеченні безпеки судноводіння. Лише збалансоване використання технологічних інновацій та традиційних навігаційних практик може гарантувати надійність та ефективність сучасного судноводіння.

¹канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0003-2898-7313, kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

²аспірант, ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-9799-4368, gtomchakovsky@gmail.com

³аспірант, асистент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0009-0009-4407-3766, leonixoberto@gmail.com

⁴ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0009-0003-3713-2015, capt.vandalex@gmail.com

⁵ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0001-8866-7456, oleg.sos52@gmail.com

Ключові слова: електронні карти, морські радары, накладення радіолокаційного зображення, електронна картографічна навігаційно-інформаційна система (ЕКНІС), безпека судноводіння, ситуаційна обізнаність, інтеграція навігаційних даних, синхронізація оновлення інформації, надійність навігаційного обладнання, підготовка судноводіїв, комплексний підхід, хороша морська практика.

Y.V. Kalinichenko, G.G. Tomchakovsky, L.E. Oberto Santana, O.V. Koliesnik, O.S. Safyan. Analysis of the peculiarities of the method of combining an electronic cartographic navigation information system with a ship's radar station. The article analyses the importance of radar image overlay on the screen of an electronic charting navigation information system (ECNIS) for improving safety and efficiency of navigation. Based on a review of scientific publications and professional literature, the article discusses the technical aspects of the overlay function, its advantages and limitations, and the impact on the decision-making process of a navigator. The overlay of radar information on an electronic navigation chart ensures the integration of planned and actual data on the environment, which contributes to the increase of situational awareness of the navigator. The combination of the systems makes it possible to visually compare radar targets with cartographic objects, clarify the vessel's location, control drift and orientation, and detect navigation hazards. The overlay function is especially valuable when sailing in confined waters and in conditions of limited visibility. At the same time, the use of overlay technology is associated with a number of technical difficulties and limitations related to ensuring the accuracy of overlap, harmonisation of data formats, and synchronisation of information updates. Errors in the operation of positioning systems, direction guidance, and cartography errors can lead to inconsistencies in image layers and incorrect interpretation of the navigation situation. The issues of equipment reliability, display parameters settings, competence and training of navigators are of critical importance. It is emphasised that radar image overlay on ECDIS is an effective tool for improving safety of navigation, but it does not replace traditional navigation practices and does not eliminate the need for critical evaluation of data. Over-reliance on technology, ignoring its limitations and disregard for the principles of good maritime practice can lead to erroneous decisions and have a negative impact on safety. Further prospects for the development of technology can be associated with the improvement of information processing algorithms, optimisation of human-machine interaction, and the development of training methods. The article emphasises the need for an integrated approach combining the improvement of technical systems and the human factor to fully realise the potential of the overlay function in ensuring safety of navigation. Only a balanced use of technological innovations and traditional navigational practices can guarantee the reliability and efficiency of modern navigation.

Key words: electronic charts, marine radar, radar image overlay, electronic charting navigation information system, navigation safety, situational awareness, navigation data integration, synchronisation of information updates, reliability of navigation equipment, training of navigators, integrated approach, good maritime practice.

Постановка проблеми. Безпека мореплавання завжди була і залишається головним пріоритетом у морській галузі. З розвитком технологій з'являються нові засоби і методи підвищення рівня безпеки судноводіння. Одним із таких засобів є електронна картографічна навігаційно-інформаційна система (ЕКНІС), яка в поєднанні з накладенням на неї радіолокаційного зображення надає судноводію потужний інструмент для ефективної та безпечної навігації. Незважаючи на очевидні переваги цієї технології для підвищення ситуаційної обізнаності судноводія, її практичне застосування пов'язане з низкою проблем і обмежень, які потребують детального вивчення. Однією з ключових проблем є забезпечення точності і надійності суміщення радіолокаційного зображення з електронною картою. Похибки в роботі систем позиціонування, а також помилки картографії можуть призводити до розбіжності відображуваних шарів і, як наслідок, до неправильної інтерпретації навігаційної ситуації. Особливо критичним це питання стає при плаванні в обмежених водах і вузькостях, де вимагається максимальна точність контролю місцеположення судна.

Іншим проблемним аспектом є вплив накладення радіолокаційного зображення на процес прийняття рішень судноводієм. З одного боку, поєднання планової і фактичної інформації на єдиному дисплеї сприяє більш швидкій і точній оцінці навігаційної обстановки. З іншого боку, надмірна довіра до технології і ігнорування її обмежень можуть призводити до зниження критичності сприйняття інформації і помилкових дій. Крім того, надлишок графічної інформації на об'єднаному дисплеї здатний викликати інформаційне перевантаження і розсіювання уваги судноводія. Нарешті, ефективне використання функції накладення радіолокаційного зображення на ЕКНІС вимагає високого рівня компетентності та підготовленості судноводіїв. Недостатнє розуміння принципів роботи системи, невміння правильно інтерпретувати дані і оперативно реагувати на їх зміни можуть зводити нанівець потенційні переваги технології і навіть становити загрозу безпеці.

Таким чином, незважаючи на безперечну користь накладення радіолокаційного зображення на екран ЕКНІС для підвищення ситуаційної обізнаності судноводія, практичне застосування цієї технології пов'язане з комплексом проблем технічного, ергономічного та кваліфікаційного характеру, які вимагають детального вивчення і розробки методів їх вирішення. Тільки комплексний підхід, що поєднує вдосконалення технічних засобів, оптимізацію людино-машинної взаємодії і розвиток методів підготовки судноводіїв, здатний забезпечити ефективно і безпечно використання функції накладення в реальних умовах судноводіння.

Метою даної роботи є всебічний аналіз функції накладення радіолокаційного зображення на екран електронної картографічної навігаційно-інформаційної системи (ЕКНІС) з точки зору її впливу на ситуаційну обізнаність судноводія і безпеку судноводіння. Дослідження спрямоване на виявлення переваг та обмежень цієї технології, а також на розкриття проблемних аспектів її практичного застосування, пов'язаних з технічними, ергономічними та кваліфікаційними факторами. На основі огляду наукових публікацій і професійної літератури здійснюється систематизація наявних знань про особливості реалізації функції накладення, її вплив на процес прийняття рішень судноводієм, а також про потенційні ризики і труднощі, що виникають при її використанні. Кінцевою метою роботи є формування цілісного розуміння значення даної технології для сучасного судноводіння і визначення напрямків її подальшого вдосконалення з урахуванням комплексного підходу, що поєднує розвиток технічних засобів, оптимізацію людино-машинної взаємодії і вдосконалення методів підготовки судноводіїв.

Виклад основного матеріалу.

Технічні аспекти накладення радіолокаційного зображення на ЕКНІС. Накладення радіолокаційного зображення на екран ЕКНІС являє собою поєднання електронної навігаційної карти (ЕНК) з радіолокаційною картинкою в реальному часі (рис. 1). Це досягається шляхом інтеграції ЕКНІС з радіолокаційною станцією (РЛС) судна [1].

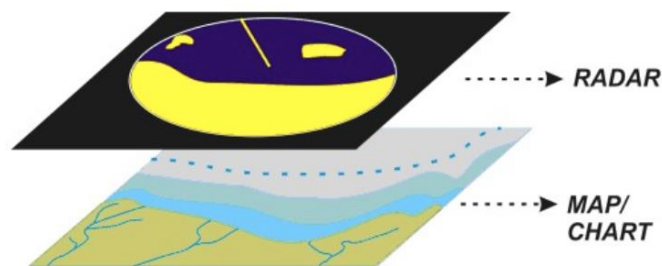


Рис. 1 – Принцип роботи техніки накладення радіолокаційного зображення [1]

Для коректного суміщення необхідно забезпечити точне узгодження систем координат, масштабів і орієнтації РЛС і ЕКНІС. ЕНК і радіолокаційне зображення мають бути приведені до єдиної системи координат, зазвичай Всесвітньої Геодезичної Системи 1984 року (WGS-84) [2]. Масштаб відображення має бути синхронізованим, а орієнтація обох систем – приведена до єдиного опорного напрямку, найчастіше курсу судна.

Технічна реалізація накладення може здійснюватися двома способами:

1. Інтеграція ЕКНІС і РЛС, коли радарне зображення передається на процесор ЕКНІС і поєднується з ЕНК програмними засобами самої ЕКНІС.

2. Накладення ЕНК на екран РЛС, коли картографічні дані передаються з ЕКНІС на екран радара.

При цьому необхідно враховувати різницю в принципах формування зображень двох систем. ЕНК являє собою векторну карту з пошаровою структурою (рис. 2), тоді як радіолокаційне зображення є растровим [3].

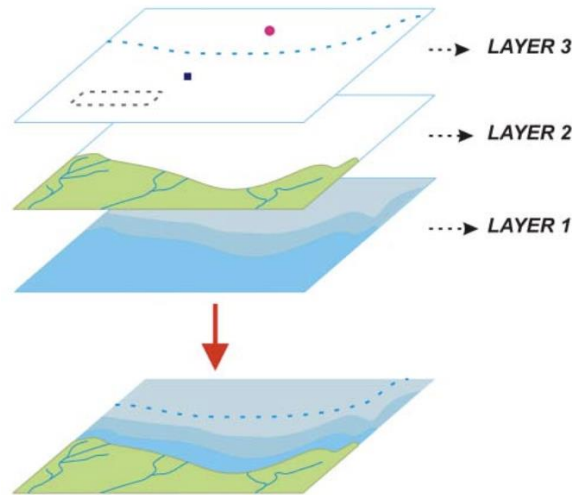


Рис. 2 – Принцип роботи техніки накладення географічної та додаткової інформації векторних навігаційних карт [1]

Важливим завданням є забезпечення розрізнення РЛ інформації на тлі ЕНК та оптимальне узгодження рівнів прозорості шарів [2].

Ще одним аспектом є частота оновлення зображень. Картографічні дані ЕКНІС є відносно статичними, в той час як радіолокаційна картинка повинна оновлюватися з високою періодичністю для відображення динаміки навколишнього оточення. При цьому оновлення накладених шарів має відбуватися синхронно, щоб уникнути неузгодженості [3].

Переваги використання накладення РЛ зображення на ЕКНІС. Головною перевагою поєднання РЛ зображення з ЕНК є надання судноводіві найповнішої та найактуальнішої інформації про навігаційну ситуацію на єдиному дисплеї. Це дає змогу оптимізувати процес оцінювання обстановки та ухвалення рішень, знижуючи ймовірність помилки та підвищуючи ситуаційну обізнаність [3, 4].

Наявність шару РЛ інформації на екрані ЕКНІС дає можливість:

- Візуально зіставляти радіолокаційні цілі з картографічними об'єктами, що спрощує їхнє розпізнавання та оцінку потенційної небезпеки.
- Уточнювати місце розташування судна за береговими орієнтирами, забезпечуючи незалежний контроль точності визначення координат за ГНСС (Глобальна Навігаційна Супутникова Система).
- Контролювати дрейф і кутову орієнтацію ЕНК щодо радіолокаційного зображення, що дає змогу своєчасно виявляти неузгодженість позиціювання.
- Виявляти об'єкти, відсутні або невірно відображені на ЕНК, зокрема динамічні (інші судна, навігаційні небезпеки).
- Контролювати навігаційні параметри руху судна (шляховий кут, швидкість, відстані до об'єктів) за допомогою електронних ліній і кілець дальності.

Використання функції накладення дає змогу зменшити інформаційне навантаження на судноводія, оскільки позбавляє необхідності подумки комбінувати дані, отримані від різних джерел [5]. Крім того, накладення дає можливість швидкого перемикання між відображенням РЛ інформації, ЕНК або комбінованим режимом залежно від поточної ситуації та завдань. Особливу цінність накладення РЛ зображення на ЕКНІС має у вузькостях і під час плавання в обмежених водах (рис. 3), коли потрібна підвищена точність контролю місця розташування судна відносно

навігаційних небезпек і засобів навігаційного обладнання [6, 7]. А при плаванні в умовах обмеженої видимості поєднане зображення є незамінним засобом забезпечення безпеки.

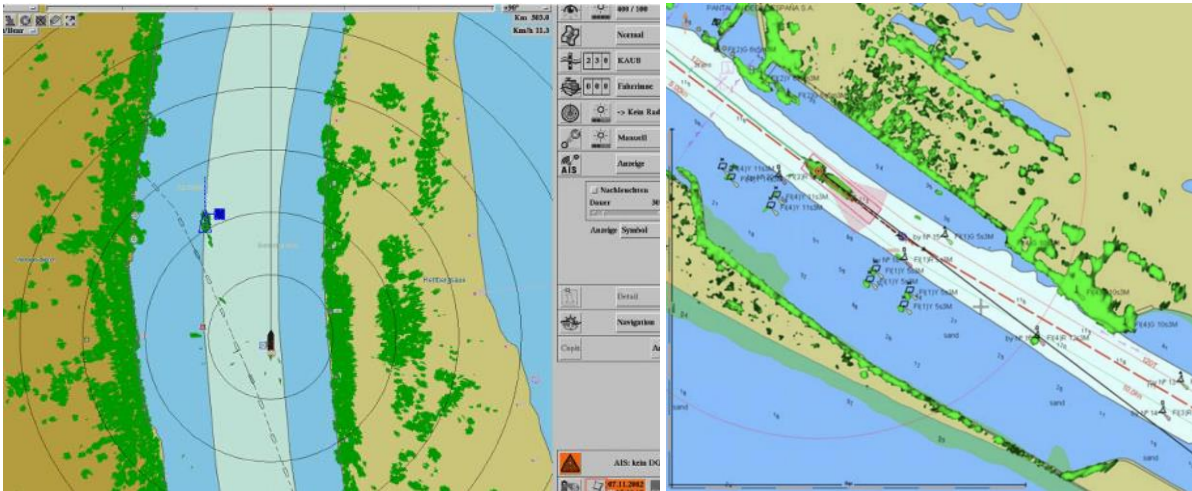


Рис. 3 – Використання функції накладення РЛ зображення на ЕКНІС у вузькостях, під час плавання в обмежених водах та при плаванні в умовах обмеженої видимості [11,13]

Обмеження та недоліки накладення РЛ зображення. Незважаючи на очевидні переваги, накладення радіолокаційної інформації на екран ЕКНІС має низку обмежень і недоліків, які необхідно враховувати під час його використання. Головна проблема полягає в можливій невідповідності РЛ зображення та електронної карти через похибки під час суміщення. Причинами розбіжностей можуть бути:

- Помилки або неточності картографічних даних ЕНК.
- Похибки позиціонування судна за даними ГНСС.
- Похибки в орієнтації ЕНК через помилки курсовказівки.
- Затримки в передачі та обробці даних між системами.

Неузгодженість між шарами суміщеного зображення (рис. 4) може призводити до невірної інтерпретації навігаційної ситуації і, як наслідок, помилкових дій судноводія [8]. Особливо критичним це може бути під час плавання в обмежених водах і вузькостях, коли потрібна максимальна точність контролю місця розташування.



Рис. 4 – Зміщення радіолокаційного зображення через помилки в обчисленні під час суміщення та помилку датчика курсу судна [2]

Іншою проблемою є можливе зниження помітності РЛ інформації на тлі ЕНК за неоптимальних налаштувань рівня прозорості шарів [9, 10]. Символіка і колірна палітра електронної карти може ускладнювати розпізнавання радіолокаційних цілей, особливо малорозмірних. Це може збільшувати ризик пропуску важливої інформації.

Крім того, надмірна кількість графічної інформації на об'єднаному дисплеї може призводити до інформаційного перевантаження судноводія і розсіювання уваги. Важливо забезпечити можливість гнучкого налаштування складу і ступеня деталізації відображуваних даних залежно від умов плавання.

Необхідно пам'ятати, що ЕНК і РЛ зображення мають різну природу і не завжди можуть безпосередньо зіставлятися. Радіолокаційна картинка представляє фактичну ситуацію, тоді як електронна карта є моделлю, яка може містити неточності та спрощення [2]. Розбіжність між ними не завжди свідчить про помилку.

І нарешті, важливим обмеженням є залежність точності суміщення від якості використовуваних датчиків і систем. Для мінімізації похибок необхідні високоточні засоби позиціонування, курсовказівки і точної гіроскопічної стабілізації антени РЛС [11]. Це ускладнює технічну реалізацію і підвищує вартість системи.

Вплив на процес прийняття рішень судноводієм. Накладення РЛ зображення на екран ЕКНІС істотно впливає на процес прийняття навігаційних рішень судноводієм. З одного боку, об'єднане відображення інформації сприяє швидшій і точнішій оцінці ситуації, з іншого – може призводити до деяких негативних ефектів.

Позитивні аспекти впливу:

- Поліпшене сприйняття навігаційної обстановки за рахунок поєднання планової та фактичної інформації.
- Підвищення ситуаційної обізнаності завдяки цілісному поданню даних на єдиному дисплеї.
- Можливість раннього виявлення розбіжностей між картографічним і радіолокаційним зображенням акваторії.
- Скорочення часу реакції на зміни навігаційної ситуації за рахунок зниження інформаційного навантаження.
- Полегшення контролю місця розташування судна щодо навігаційних орієнтирів і небезпек.

Водночас необхідно враховувати потенційні негативні ефекти:

- Можливість зниження критичності сприйняття інформації та надмірної довіри до системи.
- Ризик пропуску важливої інформації за рахунок зменшення помітності РЛ цілей на тлі навантаженого дисплея.
- Складнощі інтерпретації за наявності розбіжностей між РЛ зображенням і ЕНК через похибки суміщення.
- Небезпека інформаційного перевантаження внаслідок надмірності відображуваних даних.

Для мінімізації негативних ефектів ключове значення має правильне налаштування параметрів відображення інформації залежно від умов плавання і розв'язуваних завдань. Крім того, вкрай важливими є базові компетенції судноводія, його здатність критично аналізувати дані, що надходять від різних джерел і систем [12].

Застосування функції накладення не скасовує необхідності використання основних навігаційних принципів, таких як:

- Безперервний візуальний контроль навколишнього оточення.
- Регулярна перевірка достовірності даних шляхом порівняння показань різних незалежних систем.
- Врахування чинників, що впливають на точність використовуваних систем (обмеження ГНСС, похибки курсовказівки тощо).
- Готовність до відмов обладнання та використання альтернативних методів навігації.

Накладення РЛ інформації на ЕКНІС є інструментом підвищення ефективності та зручності роботи судноводія, але не замінює базових навігаційних навичок і здорового глузду [13]. Надмірна довіра до системи і нехтування принципами доброї морської практики неприпустимі.

Вплив на безпеку судноводіння. Застосування функції накладення радіолокаційного зображення на екран ЕКНІС потенційно сприяє підвищенню рівня безпеки судноплавства завдяки наданню судноводію найповнішої та найдостовірнішої інформації про навігаційну обстановку [13, 14].

Можливість комплексного оцінювання ситуації на базі зіставлення фактичних і картографічних даних знижує ймовірність помилок інтерпретації, пропуску важливої інформації, неправильної оцінки ризиків [13]. Це особливо критично в обмежених водах, під час розходження з іншими суднами, навігації в умовах обмеженої видимості [15].

Поєднання систем також сприяє реалізації принципу резервування, забезпечуючи незалежний контроль достовірності даних. Виявлення розбіжностей між РЛ-зображенням і ЕНК дає змогу своєчасно ідентифікувати проблеми з позиціонуванням, курсовказівкою або неточності картографічної інформації.

Водночас, для забезпечення позитивного впливу на безпеку ключове значення мають:

- Надійність і точність використовуваного обладнання (РЛС, ЕКНІС, системи позиціонування, гірокомпаси).
- Коректне налаштування параметрів відображення інформації для забезпечення її сприйнятливості та читабельності.
- Компетентність і підготовленість судноводіїв у частині використання комплексованих систем.
- Суворе дотримання правил і процедур щодо забезпечення безпеки судноводіння, контролю достовірності даних, врахування обмежень технічних систем.

Некоректне використання функції накладення, нехтування її обмеженнями або надмірна залежність від неї можуть, навпаки, негативно впливати на безпеку завдяки ухваленню неправильних рішень на основі недостовірної або неправильно інтерпретованої інформації.

Таким чином, накладання РЛ зображення на ЕКНІС є ефективним інструментом підвищення безпеки судноводіння, але тільки за умови його грамотного застосування, з урахуванням наявних обмежень і в поєднанні з традиційними навігаційними практиками.

Висновки

Накладення радіолокаційного зображення на екран ЕКНІС – важлива функція сучасних інтегрованих навігаційних систем, що забезпечує підвищення ситуаційної обізнаності судноводія і ефективніший контроль безпеки судноводіння. Поєднання в реальному часі планової картографічної інформації та фактичної радіолокаційної обстановки дає можливість комплексної оцінки навігаційних загроз і ризиків, раннього виявлення небезпечних ситуацій, перевірки достовірності даних.

Водночас застосування цієї технології пов'язане з низкою технічних складнощів і обмежень. Для ефективної роботи функції накладення потрібна висока точність і надійність використовуваного обладнання, коректність налаштування параметрів відображення, врахування особливостей і похибок суміщуваних систем. Ключову роль також відіграє компетентність судноводія, його здатність грамотно інтерпретувати інформацію, критично аналізувати дані та ухвалювати рішення з урахуванням можливих обмежень системи.

Надмірна довіра до технології накладення, ігнорування принципів доброї морської практики, візуального контролю і повторної перевірки даних альтернативними методами неприпустима і може негативно впливати на безпеку. Судноводій повинен розглядати накладення РЛ зображення на ЕКНІС як додатковий інструмент, що полегшує роботу, але не замінює базових навігаційних компетенцій і навичок.

Подальший розвиток технологій поєднання картографічної та радіолокаційної інформації пов'язаний з підвищенням точності та надійності систем позиціонування, курсовказання, орієнтації та стабілізації антени РЛС. Важливими напрямками також є вдосконалення алгоритмів і методів суміщення даних, оптимізація людино-машинного інтерфейсу, розробка більш досконалих методів і критеріїв оцінювання точності накладення.

Значна увага має приділятися питанням підготовки та перепідготовки судноводіїв, формуванню навичок ефективного використання комплексних систем відображення навігаційної інформації. Навчання повинно включати відпрацювання методів оцінки ситуації в умовах неузгодженості даних, вироблення критичного мислення, навичок резервування та використання

альтернативних технологій навігації. Тільки комплексний підхід, що поєднує вдосконалення технологій і людського фактора, може забезпечити максимальну ефективність і безпеку застосування функції накладення.

Таким чином, накладення радіолокаційного зображення на екран ЕКНІС є перспективною технологією підвищення безпеки судноплавства, що знаходить дедалі ширше застосування в сучасних інтегрованих навігаційних системах. Однак для реалізації її повного потенціалу потрібен подальший розвиток технічних засобів, удосконалення підходів до відображення інформації та підготовки фахівців. Врахування обмежень, критичний підхід до оцінки даних і дотримання правил доброї морської практики є обов'язковими умовами безпечного й ефективного використання цієї функції.

Перелік використаних джерел:

1. Sediono W., Dharmawan T. S., Lestari A. A. Method and implementation to overlay radar image on the electronic chart. *AAU Journal of Defense Science and Technology*. 2010. Vol. 1. № 2. Pp. 33-37.
2. Radar Overlay to Improve ECDIS Navigation. The Maritime Executive. URL: <https://maritime-executive.com/article/Radar-Overlay-to-Improve-ECDIS-Navigation-2014-09-12> (дата звернення: 03.04.2024).
3. The multi-layered art of navigation. Nautical Institute – Maritime Industry. URL: <https://www.nautinst.org/resources-page/the-multi-layered-art-of-navigation.html> (дата звернення: 30.03.2024).
4. Wingrove M. Using radar overlays to improve ECDIS navigation. URL: <https://www.rivieramm.com/opinion/opinion/using-radar-overlays-to-improve-ecdis-navigation-37429> (дата звернення: 02.04.2024).
5. Helmut H. Lanziner. Impact of radar integration with electronic charting. *International hydrographic review*. 2001. Vol. 2. No. 1. Pp. 54-68.
6. Zhang S., Liu X., Zhang N. Exploration of the fusion display of ECDIS and radar image information in high latitude sea area. *International conference on education technology and information system (ICETIS 2013)*. 2013. Pp. 53-57. DOI: <https://doi.org/10.2991/icetis-13.2013.13>.
7. ECDIS and the modern navigator. Shipowners. URL: <https://www.shipownersclub.com/latest-updates/news/ecdis-and-modern-navigator/> (дата звернення: 10.04.2024).
8. Recommendation on electronic chart display and information system for inland navigation (inland ECDIS). Resolution No. 48, Revision 4. URL: https://unece.org/sites/default/files/2022-12/ECE-TRANS-SC3-156-Rev4e_1.pdf (дата звернення: 15.02.2024).
9. Perceptual fusion of electronic chart and marine radar image / C. Zhang et al. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. Vol. 9. No. 11. Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse9111245>.
10. Rolfe G. A. Radar image overlay on an ECDIS system – an overview. *Proceedings of Position, Location and Navigation Symposium – PLANS '96*, Atlanta, GA, USA, 22-25 April, 1996. Pp. 130-136. DOI: <https://doi.org/10.1109/PLANS.1996.509067>.
11. Weintrit A. Six in one or one in six variants. Electronic navigational charts for open sea, coastal, off-shore, harbour, sea-river and inland navigation. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2010. Vol. 4. № 2. Pp. 165-177.
12. Overreliance on ECDIS technology: A Challenge for Safe Navigation / Kristić M., Žuškin S., Brčić D., Car M. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2021. Vol. 15. № 2. Pp. 277-287. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.02>.
13. Legiec W. Position cross-checking on ECDIS in view of international regulations requirements and OCIMF recommendations. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2016. Vol. 10. № 1. Pp. 105-113. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.10.01.12>.
14. Wärtsilä Navi-Radar – Integrates to ECDIS. URL: <https://www.wartsila.com/ancs/integrated-vessel-control-systems/navigation/navi-radar> (дата звернення: 10.03.2024).
15. Weintrit A. Radar image overlay in ECDIS display versus electronic navigational chart overlay on radar screen. *Prace wydziału nawigacyjnego akademii morskiej w Gdyni*. 2008. No. 22. Pp. 122-136.

16. Alexander L. Harmonizing chart and navigation-related information on ECDIS. *Proceedings of U.S. Hydrographic Conference*, Norfolk, 21-24 May 2001. Pp. 1-13.
17. Томчаковський Г. Г., Оберто Сантана Л. Е., Мущенко П. В. Функція накладення радарного зображення на екрані ECDIS / . *Modern education using the latest technologies: Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference*, Лісабон, Португалія, 17-20 січня 2023. С. 490-497.

References:

1. W. Sediono, T.S. Dharmawan, and A.A. Lestari, «Method and implementation to overlay radar image on the electronic chart», *AAU Journal of Defense Science and Technology*, vol. 1, № 2, pp. 33-37, 2010.
2. Radar Overlay to Improve ECDIS Navigation. The Maritime Executive. [Online]. Available: <https://maritime-executive.com/article/Radar-Overlay-to-Improve-ECDIS-Navigation-2014-09-12>. Accessed on: April 03, 2024.
3. The multi-layered art of navigation. Nautical Institute – Maritime Industry. [Online]. Available: <https://www.nautinst.org/resources-page/the-multi-layered-art-of-navigation.html>. Accessed on: March 30, 2024.
4. Wingrove M. Using radar overlays to improve ECDIS navigation. [Online]. Available: <https://www.rivieramm.com/opinion/opinion/using-radar-overlays-to-improve-ecdis-navigation-37429>. Accessed on: April 02, 2024.
5. Helmut H. Lanziner, «Impact of radar integration with electronic charting», *International hydrographic review*, vol. 2, no. 1, pp. 54-68, 2001.
6. S. Zhang, X. Liu, and N. Zhang, «Exploration of the fusion display of ECDIS and radar image information in high latitude sea area», *International conference on education technology and information system (ICETIS 2013)*, pp. 53-57, 2013. doi: **10.2991/icetis-13.2013.13**.
7. ECDIS and the modern navigator. Shipowners. [Online]. Available: <https://www.shipownersclub.com/latest-updates/news/ecdis-and-modern-navigator/>. Accessed on: April 10, 2024.
8. Recommendation on electronic chart display and information system for inland navigation (inland ECDIS). Resolution No. 48, Revision 4. [Online]. Available: https://unece.org/sites/default/files/2022-12/ECE-TRANS-SC3-156-Rev4e_1.pdf. Accessed on: February 15, 2024.
9. C. Zhang, M. Fang, C. Yang, Re. Yu, and T. Li, «Perceptual fusion of electronic chart and marine radar image», *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, no. 11, pp. 1-16, 2021. doi: **10.3390/jmse9111245**.
10. G.A. Rolfe, «Radar image overlay on an ECDIS system-an overview», in *Proceedings of Position, Location and Navigation Symposium – PLANS '96*, Atlanta, GA, USA, 1996, pp. 130-136. doi: **10.1109/PLANS.1996.509067**.
11. A. Weintrit, «Six in one or one in six variants. Electronic navigational charts for open sea, coastal, off-shore, harbour, sea-river and inland navigation», *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 4, № 2, pp. 165-177, 2010.
12. M. Kristić, S. Žuškin, D. Brčić, and M. Car, «Overreliance on ECDIS technology: A Challenge for Safe Navigation», *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 15, № 2, pp. 277-287, 2021. doi: **10.12716/1001.15.02.02**.
13. W. Legiec, «Position cross-checking on ECDIS in view of international regulations requirements and OCIMF recommendations», *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 10, № 1, pp. 105-113, 2016. doi: **10.12716/1001.10.01.12**.
14. Wärtsilä Navi-Radar – Integrates to ECDIS. [Online]. Available: <https://www.wartsila.com/ancs/integrated-vessel-control-systems/navigation/navi-radar>. Accessed on: March 10, 2024.
15. A. Weintrit, «Radar image overlay in ECDIS display versus electronic navigational chart overlay on radar screen», *Prace wydziału nawigacyjnego akademii morskiej w Gdyni*, no. 22, pp. 122-136, 2008.
16. L. Alexander, «Harmonizing chart and navigation-related information on ECDIS», in *Proceedings of U.S. Hydrographic Conference*, Norfolk, 2001, pp. 1-13.

17. Н.Н. Tomchakovskiy, L.E. Oberto Santana, and P.V. Mushchenko, «Funktsiia nakladennia radar-noho zobrazhennia na ekrani ECDIS» [«Radar image overlay function on the ECDIS screen»], in Proceedings of the II Int. Sci. and Pract. Conf. «Modern education using the latest technologies», Lisbon, Portugal, 2023, pp. 490-497. (Ukr.)

Стаття надійшла 01.05.2024

Стаття прийнята 03.06.2024

УДК 62-723.82

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310707

© Погорлецький Д.С.¹, Грицук І.В.², Худяков І.В.³, Самарін О.Є.⁴

ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЛУБРИКАТОРНОЇ СИСТЕМИ МАЩЕННЯ СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ

В статті розглядаються питання оптимізації витрати високолузжого циліндрового масла в лубрикаторних системах мащення суднових малообертових двигунів (МОД) та особливості експлуатації системи циліндрового мащення з огляду на сучасні тенденції розвитку МОД. Проведено огляд систем лубрикаторного мащення циліндрів суднових головних двигунів та розглянуто можливі перспективи вдосконалення систем лубрикаторного мащення циліндрів суднових дизельних двигунів. Приділено увагу причинам виникнення та способам боротьби з цілою гамою проблем, які представляють собою можливість збільшення зносу втулок циліндрів, поршнів, поршневих кілець, це пов'язано з типом та сортом палива і вмістом сірки в ньому. Сірка в паливі нейтралізується з допомогою циліндрових масел з високою лужністю, проблеми виникають під час зміни сорту палива, це вимагає зміни марки циліндрового масла (CLO BN). Запропоновано та розглянуто можливість використання системи змішування циліндрових масел (АСОМ) для нейтралізації сірки в паливі та покращення захисту від низькотемпературної корозії циліндрових втулок МОД. Дана система змішує та дозує циліндрове масло в залежності від навантаження суднового двигуна і типу палива. АСОМ дозволяє дозувати масло на суднових двигунах, які працюють у режимах споживання подвійного виду палива (SDF), де визначається співвідношення між пілотним (запальним) та газовим паливом, система змішує два різних типи циліндрового масла в одне з потрібним лужним числом BN, його можна визначити як здатність масла нейтралізувати кислоти, що утворюються під час використання. Наведено результати оптимальної витрати циліндрового масла, що забезпечує мінімальне зношування циліндрових втулок дизельного двигуна. Описано особливості режимів мащення та контролю технічного стану циліндрової групи суднових малообертових дизельних двигунів при їх роботі на зниженій частоті обертання.

Ключові слова: енергетична установка, лубрикаторна система мащення, циліндрове масло, лужне число, малообертотвий двигун.

¹ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1256-8053, dimon150582@gmail.com

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 канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-2690-7298, samarin162@gmail.com

D.S. Pohorletskiy, I.V. Gritsuk, I.V. Khudiakov, O.E. Samarin. Features of the operation of the lubrication system for lubricating ships' low-speed engines. The article examines the optimization of high-alkaline cylinder oil consumption in lubrication systems of marine low-speed engines (MODs), as well as the peculiarities of operation of the cylinder lubrication system in view of modern trends in the development of low-speed marine engines. An overview of the lubricator lubrication systems of the cylinders of marine main engines was carried out and possible prospects for improving the lubricator lubrication systems of the cylinders of marine diesel engines were considered. Attention is paid to the causes of occurrence and methods of combating a whole range of problems, which represent the possibility of increased wear of cylinder sleeves, pistons, piston rings, this is related to the type and grade of fuel and its sulfur content. Sulfur in the fuel is neutralized with the help of cylinder oils with high alkalinity, problems arise when changing the grade of fuel, this requires changing the brand of cylinder oil (CLO BN). The possibility of using a cylinder oil mixing system (ACOM) to neutralize sulfur in the fuel and improve protection against low-temperature corrosion of MOD cylinder liners is proposed and considered. This system mixes and doses cylinder oil depending on the load of the ship's engine and the type of fuel. ACOM allows the dosing of oil on marine engines operating in dual fuel consumption (SDF) modes, where the ratio between pilot (ignition) and gas fuel is defined, the system mixes two different types of cylinder oil into one with the required BN base number, it can be determined as the oil's ability to neutralize acids produced during use. The results of optimal consumption of cylinder oil, which ensures minimal wear of cylinder liners of a diesel engine, are given. Features of lubrication regimes and control of the technical condition of the cylinder group of marine low-speed diesel engines during their operation at reduced rotation frequency are described.

Key words: power plant, lubricator lubrication system, cylinder oil, alkaline number, low-speed engine.

Постановка проблеми. Під час експлуатації суднових малооборотних двигунів (МОД) виникають різні суперечливі положення, до яких відносять застосування важких палив з високим вмістом сірки в них. Вони мають низьку вартість, за рахунок чого їх використання в судновій енергетиці розпочалося з котельних установок та поширилося на судові малооборотні двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ). Використання важких сортів палива на даний час відбувається у крейцкопфних та тронкових судових дизельних двигунах [1-8]. Поглиблення переробки нафти дозволяє вийти на велику кількість синтетичних продуктів, що супроводжується погіршенням якості багатьох видів палив та викликає погіршення надійності і ресурсних показників судових МОД. Також збільшується інтенсивність старіння моторного масла, забруднення внутрішніх поверхонь двигуна вуглецевими відкладеннями і швидкість зношування деталей кривошипно-шатунного механізму та циліндро-поршневої групи (ЦПГ).

Серед розробників нових марок моторних масел лідируючими є міжнародні компанії (Shell, Mobil, Castrol, BP), особлива увага приділяється питанням економії витрати моторних масел в процесі їх використання на судових дизельних МОД і можливості регенерації експлуатаційних властивостей масел. За цієї мети двигунобудівні фірми разом з виробниками мастильних матеріалів досліджують і удосконалюють режими та способи мащення для забезпечення мінімальної подачі масла до зон контакту і розробляють спеціальні установки для відновлювання експлуатаційних властивостей масел [2-8]. Основні властивості та функції масел зводяться до підтримання надійної роботи вузлів тертя, зменшення та запобігання зносу у всіх його формах, видалення та відведення з зони тертя забруднюючих матеріалів, часткового охолодження за рахунок відведення тепла від поверхонь тертя, підтримання щільності кільцевих ущільнень поршнів, утворюючи плівку між поршневими кільцями і стінками циліндрів, запобігання корозії та утворенню іржі на металевих поверхнях, створюючи бар'єр для захисту внутрішніх компонентів двигуна від вологи і наслідків окислення [1-8]. Необхідність розробки нових сортів циліндрових масел, виникла на початку 60-х років і була пов'язана з появою судових енергетичних установок, обладнаних малооборотними дизельними двигунами з можливістю їх роботи на важких сортах судових палив збільшеної в'язкості.

У зв'язку з погіршенням умов роботи мастил на судових МОД та з необхідністю надання

відповідних хімічних та фізичних властивостей, нафтовими компаніями було розроблено та створено сорти спеціальних циліндрових масел, до складу яких вводили спеціальні з'єднання лугу. Вміст в мг гідроксиду калію КОН на 1 грам масла досягав 100 мг КОН/г. Циліндрові масла другого покоління (Mobilgard 570, Castrol S, Shell «Alexia 50») з рівнем лужності 60...70 мг КОН/г, використовувались у форсованих суднових МОД в різних умовах експлуатації та сортах палива з в'язкістю 120...320 сСт, і місткістю сірки 3...4%. Експлуатація суднових дизельних двигунів на таких сортах палива і масла відбувалася до нинішнього століття, далі флот поповнився суднами з енергетичними установками, обладнаними моделями довгоходових двотактних дизельних двигунів, та посилювалися вимоги до дотримання екологічних параметрів роботи суднових енергетичних установок (СЕУ). Економічність двигунів досягала за рахунок підвищення максимального тиску згоряння, ці зміни стосуються до формування товщини масляної плівки на поверхнях деталей ЦПГ. Збільшення максимальної температури та тиску у верхній частині циліндрової втулки вимагає покращення вимог до якості масла, запобігання утворенню вуглецевих відкладень та зносу [5-8]. Матеріали, які будуть приведені та розглянуті в даній статті, відносяться до класу малообертових суднових двигунів, додатково обладнаних морськими судновими скруберами (marine scrubber), призначення якого полягає в ефективній нейтралізації вихлопних газів від дизельного палива або мазуту. Судна, які обладнані даними типами двигунів та системами нейтралізації відпрацьованих газів, на даний час використовуються у морських перевезеннях та займають своє місце серед багатьох інших типів суднових енергетичних установок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційний спосіб подачі циліндрового масла на дзеркало циліндрової втулки це спеціальні пристрої, які отримали назву механічні лубрикатори. Двигунобудівні компанії використовували системи різних виробників: MAN B&W – Hans Jensen, Sulzer – Bosh, конструкції даних систем суттєво не відрізняються [1-8]. Лубрикаторні системи фірми Hans Jensen використовувались на двигунах фірми MAN B&W аж до 2000 р. Тиск масла в лубрикаторах фірми Hans Jensen створюється за допомогою плунжерів, а на поверхню циліндрової втулки масло подається за допомогою штуцерів (незворотних клапанів) на канавки особливої форми. Витрата циліндрового масла в лубрикаторах Hans Jensen становить 0,7...1,2 г/(кВт·год). Лубрикатори Bosh застосовували переважно на двигунах Sulzer, витрата циліндрового масла в лубрикаторах Bosh становить 0,72...1,1 г/(кВт·год) для двигунів RD та 0,67...0,94 г/(кВт·год) – двигуни RND. Суднове двигунобудування за останні 20 років внесло свої корективи в організацію проходження процесів лубрикаторного мащення циліндрової втулки [2-8]. Першою з відомих компаній, яка змінила свій підхід до розгляду даного питання, стала Hans Jensen, у розробці систем лубрикаторного мащення циліндрів було змінено спосіб подачі масла на стінки циліндрової втулки. Традиційні штуцери змінили на спеціальні пристрої, а саме Swirl Injection Principle (SIP). У системі циліндрового мащення SIP застосовують форсунки, які розпилюють циліндрове масло по всій циліндровій втулці у верхній її частині [1-8]. Покращення ефекту розпилювання і рівномірного розподілу циліндрового масла по всій поверхні циліндрової втулки дозволило під час кожного циклу розпилю покращити стан третєвих поверхонь, подаючи зменшену кількість циліндрового масла, в порівнянні зі звичайною системою циліндрового мащення. Багато суднових МОД було обладнано або модернізовано шляхом встановлення системи циліндрового мащення SIP.

У цей проміжок часу провідні корпорації з виготовлення та розроблення лубрикаторних систем мащення працювали над створенням власних систем мащення ЦПГ суднових крейцкопфних малообертових дизельних двигунів. Найпершою з них у цьому питанні досягла успіху в розробці та використанні даних систем компанія MAN Diesel, яка провела випробування та застосувала на своїх базових марках суднових МОД двигунів систему циліндрового мащення «Альфа-лубрикатор».

Компанія MAN Diesel, з 2000 років використовує альфалубрикатори на всіх моделях МОД серії MC. Застосування альфалубрикаторів і безпосереднього упорскування масла на поверхню циліндрової втулки дозволило знизити витрату циліндрового масла, а також вміст шкідливих викидів у відпрацьованих газах в атмосферу, у порівнянні з використанням механічних лубрикаторів. Слідуючи тим же напрямком, що і компанія MAN Diesel, світовій спільноті суднобудівних компаній було презентовано свою розробку і компанією WARTSILA NSD, нею було розроблено та впроваджено на МОД серії RTA свою оригінальну систему циліндрового мащення циліндрів «Petrofit Pulse Lubricating System» (PPLS) – (PLS). Принцип її роботи полягає у впорскуванні

заданого об'єму циліндрового масла у певний момент часу під тиском до пакету поршневих кілець та спідницю самого поршня, а звідти масло рівномірно розподіляється по всій поверхні циліндрової втулки [1-5]. Однак такий бурхливий розвиток лубрикаторних систем мащення циліндрів крейцкопфних малообертових дизелів одночасно поставив серйозні питання, пов'язані з безпечною, ефективною та економічною експлуатацією деталей ЦПГ. Аналізуючи тенденції розвитку судових дизельних МОД, можливо зробити висновок, що для забезпечення кращої надійності та довговічності сучасних судових дизельних двигунів до лубрикаторних систем циліндрового мащення та самого масла пред'являються значно жорсткіші вимоги ніж ті, які висувалися для попередніх моделей судових МОД. У довгоходових судових малообертових дизельних двигунів, працюючих на важких сортах палива, зі зменшенням частоти обертання (економ хід) потрібно збільшити час утримання масляної плівки на поверхні циліндрової втулки до її оновлення (слідкуючої подачі), масло повинно витримувати термічні навантаження, підтримуючи та виконуючи свої функції. Найважливішим завданням є забезпечення та підтримання товщини і міцності мастильної плівки під час низьких швидкостей руху поршня (рух судна на економ ході), на умови роботи циліндрового масла також дуже сильно впливає якість використовуваного палива [3-8].

Метою дослідження є огляд особливостей експлуатації та обґрунтування способів модернізації системи циліндрового мащення (лубрикаторної системи мащення) МОД для забезпечення нижчої швидкості подачі циліндрового масла в циліндр та таким чином знизити витрату і оптимізувати мащення поршневих кілець та гільз циліндрів; показати результат впливу якісної організації технічної експлуатації системи циліндрового мащення на покращення техніко-економічних показників головного судового двигуна. Також враховуючи не дуже точні рекомендації щодо дозування циліндрового масла, що зумовлено зміною конструкції лубрикаторних систем мащення, а також різними сортами циліндрових масел і вмістом сірки в паливі, стає очевидним, що ступінь невизначеності з вибором питомої ефективної витрати циліндрового масла суттєво зростає, а це збільшує інтерес до використання способів та систем регулювання подачі циліндрового масла в залежності від вмісту сірки в паливі.

Виклад основного матеріалу. Робота судових МОД енергетичних установок відбувається на сортах палив, які поділяють на важкі і легкі (дизельні). Дана класифікація основана на питомій вазі, густині палива, дизельних палив при 20°C у межах 840...860 кг/м³, важких палив 980 кг/м³. До складу палива входить велика кількість різних компонентів, але найбільший негативний вплив на екологічні параметри і технічний стан судових МОД енергетичних установок має сірка [1-8], для нейтралізації впливу якої на деталі ЦПГ судових дизельних двигунів у системах циліндрового мащення використовують масла, які мають вміст лугів до 70...100 мгКОН/г. Суднові дизельні МОД енергетичних установок та системи подачі, підготовки, очищення та обробки палива модифіковані та обладнані спеціальними пристроями для використання важких палив, в'язкість яких становить 750 сСт при 50°C та щільність до 1010 кг/м³. Під час роботи у МОД циліндрові масла на поверхні ЦПГ при застосуванні в'язких сортів палив повинні витримувати тривале згоряння палива на лінії розширення, високий температурний вплив на масляну плівку, попадання великої кількості сажі у результаті неповного згоряння палива, можливе потрапляння остатків незгорілого палива на масляну плівку зі збільшенням довжини розпилу палив з великою густиною. Даний процес змішування частинок палива, які знаходяться на поверхні циліндрової втулки, має негативний вплив на змащувальні властивості циліндрового масла, а також сприяє зменшенню термічної і термоокислювальної стабільності, інтенсифікує сірчистий знос деталей ЦПГ, проточної частини газотурбонагнітача та випускного тракту МОД [1-4]. Застосування важких сортів палив у крейцкопфних МОД посилює ряд вимог до фізичних та хімічних властивостей циліндрового масла, це пов'язано з забезпеченням нейтралізуючої здатності відносно сірки, термоокислювальної стабільності і антинагарних властивостей. Доступнішим методом в умовах роботи енергетичної установки морського судна для визначення лужного числа масла і кількості металевих домішок в ньому є відбір проб масла з підпоршневих просторів дизельного двигуна, це виконується з допомогою переносних судових комплексів, лабораторій (Digi TBN Test Kit; Cylinder Scrape-Down Oil Analysis; Signum onboard test kit of ExxonMobil). За допомогою різних систем та методів діагностування, аналізуючи рівень корозійної стійкості втулок циліндрів судових дизельних МОД, визначається залишкове лужне число циліндрового масла (BN), відібране

з підпоршневого простору двигуна, згідно остаточної величини BN можливо оцінити загальний стан ЦПГ [1-8].

Стан корозії циліндрових втулок поділяється на три основні групи:

- 1) $BN = 17...45$ – циліндрові втулки експлуатуються у допустимому режимі, їх знос у допустимому значенні;
- 2) $BN = 10...16$ – циліндрові втулки піддаються збільшеному корозійному зносу, що сприяє інтенсифікації процесу зношування;
- 3) BN менше 10 – в циліндрах дизельного малообертового двигуна проходить сірчиста корозія, що збільшує знос ЦПГ.

Під час експлуатації МОД в умовах 1-го режиму ($BN = 17...45$) циліндрова масляна система не регулюється, питома витрата циліндрового масла є оптимальною в даному режимі роботи. При умовах 2-го режиму ($BN = 10...16$) недостатня кількість масла, яка подається на поверхню циліндрової втулки, для відновлення BN необхідно провести регулювання подачі масла. Роботу МОД на 3-му режимі ($BN < 10$) відносять до аварійних умов експлуатації, що свідчить про підвищений знос ЦПГ і вважають неприпустимим. У цьому випадку необхідно провести регулювання подачі циліндрового масла та регулювання терморегуляційних клапанів системи охолодження циліндрових втулок, і переведення двигуна на режим роботи зі зменшенням навантаження. Показником кількості поданого циліндрового масла на втулку циліндру є АСС-фактор (adaptive cylinder oil control) та витрата FR (feed rate), АСС фактор приймають згідно експериментальних даних, в залежності від значення PQI (Particle Quantity Index), а саме кількості металевих домішок і BN масла, взятого з підпоршневого простору двигуна. Для суднових малообертових двигунів АСС-фактор становить 0,2...0,35. Сучасні судові енергетичні установки з МОД обладнані системами автоматичного керування (LUBECES), вони призначені для підтримання постійної мінімальної витрати циліндрового масла 0,6 г/(кВт·год) на всіх режимах роботи двигуна [1-8]. Для перевірки технічного стану ЦПГ двигуна відбиралися проби масла та виконувався аналіз з підпоршневих просторів малообертового двигуна MAN-B&W типу 5S70ME-C. Під час проведення досліджень, двигун працював на паливі RMK 700, густина якого 15°C, 990 кг/м³; в'язкість сСт, 50°C – 700; температура спалаху (min) 60°C; сірки 2,5...2,7%. Для мащення циліндрових втулок, у системі лубрикаторного мащення двигуна використовували масло марки Mobilgard 570: густиною 15°C, 820 кг/м³; температурою спалаху 256°C; в'язкість у сСт, при 40°C – 229; в'язкість у сСт, 100°C – 21; лужне число масла (total base number – TBN) становить 70 мг КОН/г. Завданням дослідження було визначення оптимальної витрати циліндрового масла разом з діагностикою технічного стану циліндро-поршневої групи двигуна. Дослідження щодо визначення оптимальної подачі циліндрового масла виконувались тільки на режимах роботи дизеля, що встановилися. Постійність навантаження на дизель визначалося незмінними частотою обертання колінчастого валу дизельного двигуна, а також підтриманням циклової подачі палива. Кожен окремий циліндр двигуна мав свої встановлені значення подачі масла, відхилення величини подачі допускалося не більше 5% від середнього. Постійно виконувався відбір масла з підпоршневого простору циліндрів, для визначення значень BN і PQI за допомогою судової переносної лабораторії, експерименти були виконані протягом десяти циклів та мали інтервал відбору 24 год. Згідно отриманих даних обчислено оптимальне значення АСС-фактора (згідно наявної кількості сірки у важкому паливі), за рахунок цього було визначено рекомендовану витрату масла FR. Було доведено, що витрата циліндрового масла (оптимальна) для малообертового дизельного двигуна, який працює на важкому паливі з високим вмістом сірки, досягається за рахунок визначення оптимального АСС-фактора, дане значення визначається для двигунів різних моделей та марок окремо, має залежність від технічного стану, конструкційних особливостей та налаштувань системи циліндрового мащення двигуна. АСС-фактор є постійним, витрата циліндрового масла (Feed Rate) під час роботи двигуна на різних сортах палив має залежність від наявності сірки в паливі (Min Feed Rate) – це мінімальна розрахункова витрата масла, яке йде на змащування циліндрів. Під час роботи судового дизельного МОД на малих навантаженнях (обертах - 61, 66, 68 хв⁻¹) до циліндрів двигуна подається обмежений об'єм циліндрового масла за одне впорскування, на цих режимах роботи значення FR – 0,462...0,554 г/(кВт·год), виконується примусова подача циліндрового масла на 5-му ході поршня, аж до досягнення величини об'єму подачі 0,6 г/(кВт·год). Для контролю, у зв'язку з перевірками стану ЦПГ МОД, виконували пробовідбір відпрацьованого масла та здавання проб для проведення аналізу береговою незалежною

лабораторією. Параметри, які враховувалися під час діагностики та перевірки стану циліндрових втулок МОД, це наявність та кількість металевих домішок – Fe, у відпрацьованому маслі, нікелю – Ni, ванадію – V, кремнію – Si, в мг/кг і величини BN і PQI.

У результаті отримані значення підтвердили коректність запропонованої методики та вірність налаштувань системи лубрикаторного мащення циліндрів (подачу масла). Згідно отриманих результатів аналізів відібраного масла, берегова лабораторія надала діаграми, на яких відображено значення характеристик вмісту окремих домішок у відпрацьованому маслі (рис. 1) [1-8]. Отримані результати берегової лабораторії констатували підвищення BN, зменшення PQI та Fe в аналізах масла і підтвердили вірність виконаних регулювань подачі циліндрового масла, зміни значень Ni та Si, і V характеризували погіршення якості використаного палива. Результати досліджень оптимізації витрати циліндрового масла дозволили визначити оптимальний АСС-фактор для конкретного двигуна і прийняти його рівним 0,27 для забезпечення безпечної експлуатації ЦПГ суднового дизельного МОД під час роботи на різних сортах палив з вмістом сірки до 3% та для визначення оптимальної подачі циліндрового масла. За рахунок цього було забезпечено економічно ефективний режим роботи суднового МОД та мінімальне корозійне зношування втулок циліндрів [1-8].

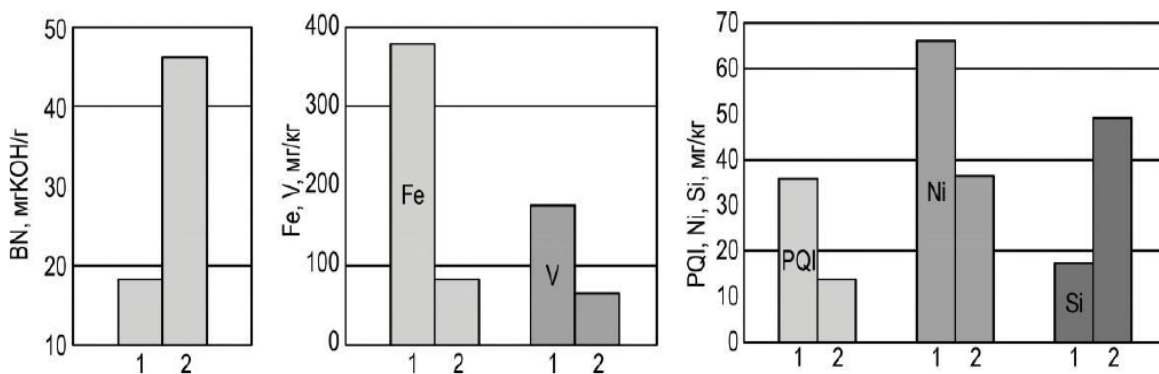


Рис. 1 – Вміст домішок і значення BN (base number) масла у пробах, взятого з суднового дизельного МОД: 1 – після 9500 годин напрацювань; 2 – після 11800 годин: V – Vanadium, Si – Silicon, Ni – Nickel, Fe – Iron, PQI – Particle Quantity Index

Зміна ліміту сірки внесена 1 січня 2020 року, максимальний вміст сірки в суднових важких сортах палив зменшено з 3,5% до 0,5% [1-8]. Пошкодження або збільшений знос гільзи циліндрів МОД є саме джерелом недостатнього чи навпаки надмірного змащування поверхні циліндрової втулки, дозування циліндрового масла бере залежність від саме кількості та наявності сірки в важких сортах палив і навантаження на двигун, що, у свою чергу, рекомендує необхідну кількість лужних присадок у циліндровому маслі. Лужне число масла – це саме показник здатності нейтралізувати сірчану кислоту, яка може виникнути на поверхні гільзи циліндра двигуна за сприятливих умов. За великого значення BN робоча поверхня гільзи циліндрів буде відполірована, це може призвести до порушення тертя і ризику пошкодженнь робочої поверхні гільзи циліндрів та кілець поршня, низьке значення BN призводить до поганої нейтралізації сірки та ризику виникнення низькотемпературної корозії втулки циліндрів [1-8]. Сірчана кислота виникає під час згоряння палива, яке містить сірку, розріджується на робочій поверхні гільзи циліндрів, що пов'язано з можливою наявністю води у повітрі та термодинамічним процесом горіння, це відбувається за температури та тиску, які створюють атмосферу, де температура нижче точки роси SO₃, як це представлено на рис. 2.

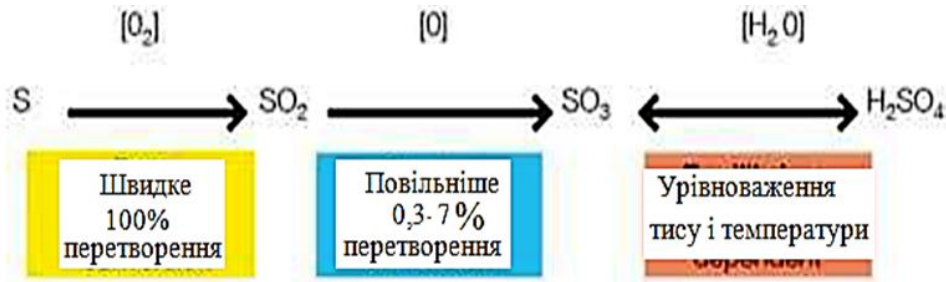


Рис. 2 – Процес перетворення S в H₂SO₄

Під час поганої нейтралізації сірки, кількість заліза в циліндровому маслі може збільшитися. Згідно інформації від компанії MAN Diesel&Turbo, рівень 200 мг/кг повинен відповідати номінальному зносу циліндрової втулки МОД і дорівнювати 0,1 мм/1000 напрацювань РН, згідно чого високі значення свідчать про підвищений знос циліндрової втулки, кілець та поршнів [1-8]. Компанія MAN Diesel&Turbo встановила мінімальну подачу CLO – 0,6 г/(кВт·год), яка досягається за рахунок використання палива з вмістом сірки 1,15%, CLO BN 100, це встановило теоретичну межу застосування BN 100 CLO – 1,15 % S. Під час застосування CLO BN 40 (робота з метаном) лімітовано 0,6 г/(кВт·год), це не дозволяє досягти BN – S, що показано на рис. 3.

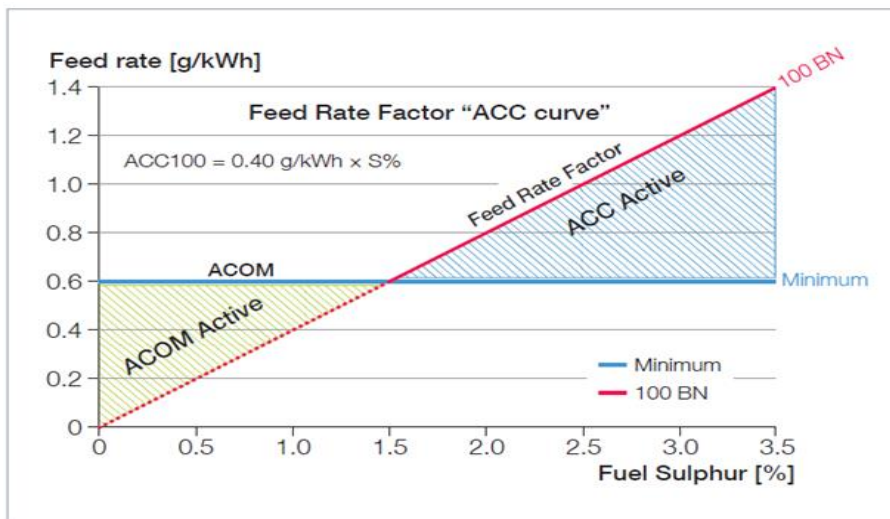


Рис. 3 – Коефіцієнт швидкості подачі циліндрового масла типу BN100

Проведення вимірювань вмісту заліза, а також залишкового числа BN у маслі, дозволяє зробити оцінку стану циліндрової втулки та потребу регулювання швидкості та кількості подачі масла для повернення в зону безпечної роботи. Недостатнє або погане змащування є причиною зносу та пошкодження робочої поверхні гільзи циліндра, поршневих кілець, поршня через підвищену корозію і зменшені мийні властивості циліндрового масла. Судновому дизельному МОД погрожує погане змащення у діапазоні великих навантажень, що пов'язано з активацією РК-дисплея при навантаженнях нижче 25% MCR. Поява занадто багатої кількості масла в циліндрах двигуна призводить до надмірного змащування та з часом до заповнення робочої поверхні циліндрової втулки [1-8]. На роботу системи EGR МОД двигуна, оснащеного газотурбонагнітачем, впливає потреба у видаленні твердих часток лугу і відсутність рівноваги РН в контурі охолоджувача повітря (інтеркулера) [1-8]. Стає очевидним існування потреби у використанні двох марок різних циліндрових масел, які розрізняються базовим числом BN, а місце зміни базується тільки на отриманому досвіді (рис. 4).

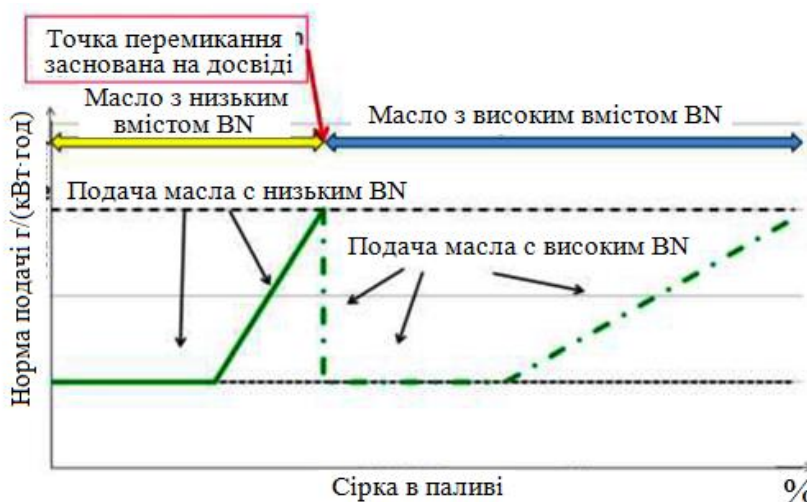


Рис. 4 – Рекомендована зміна подачі різних циліндрових масел за BN

Беручи до уваги розглянуті особливості роботи системи лубрикаторного мащення циліндрів суднового двигуна MAN-B&W типу 5S70ME-C, для покращення його техніко-економічних показників, при роботі на паливі з різним вмістом сірки, пропонуємо можливість застосування системи змішування різних типів циліндрових масел – АСОМ (автоматична система для змішування циліндрових масел різних марок), яка застосовується для покращення нейтралізації сірки в паливі і захисту від низькотемпературної корозії циліндрової втулки, система АСОМ є однією з сучасних рішень, яке на даний час застосовується для суднових МОД, працюючих на різних сортах важких палив та з різним вмістом сірки в них, загальна схема продемонстрована на рис. 5.

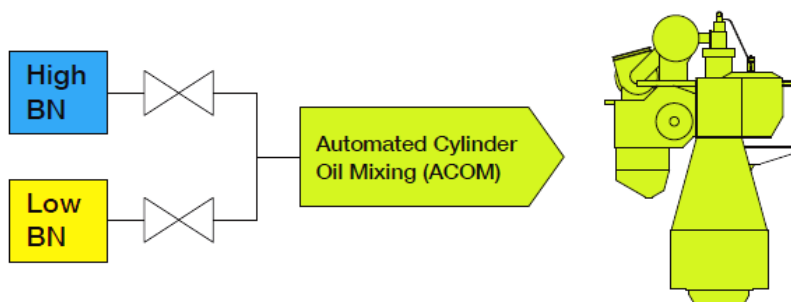


Рис. 5 – Система автоматизованого змішування циліндрового масла

Система АСОМ змішує та виконує дозування різних марок циліндрового масла, в залежності від навантаження на судновий МОД та типу палива, вона також дозує масло на МОД, які працюють у спеціальних режимах роботи подвійних сортах палив – SDF, де визначається загальне співвідношення між пілотним та основним газовим паливом, змішуються два різних сорти масла з різним BN у одне з потрібним BN, циліндрові масла з BN 100 та BN 16 застосовують, як початкові базові масла [1-8]. За рахунок чого створюється гнучке середовище, в якому доступні всі значення BN, система АСОМ управляється з допомогою системи ECS суднового двигуна, за рахунок цього здійснюється постійний моніторинг, налаштування виконуються з допомогою панелі керування MOP чи АСОМ. Сама апаратна частина має досить невелику площу і складається з відносно невеликої кількості деталей. Тому найбільшою проблемою, з якою зіткнеться оператор, буде забезпечити СЛО належну кількість присадок BN, коли двигун працює на паливі з низьким вмістом сірки.

Припустимо, що: Двигун працює в режимі HFO на рідкому паливі, що складається з 1,8% сірки. АСС Коефіцієнт швидкості подачі = $0,25 \text{ г/(кВт·год)} \times S \%$ (встановлюється під час тесту розгортки). Мінімальна питома швидкість подачі СЛО рівна $0,6 \text{ г/(кВт·год)}$, отже:

розрахована мінімальна питома швидкість подачі $CLO = 0,25 \times 1,8 = 0,45$ г/(кВт·год). Значення 0,45 г/(кВт·год) нижче мінімальної швидкості подачі. Тому ECS запитуватиме 0,6 г/(кВт·год). Тоді сірчана кислота може бути повністю нейтралізована, що збільшує ризик полірування і, таким чином, збільшення зносу [1-8]. На панель керування АСОМ виводяться показники та вносяться нові дані, а саме: високе значення BN – налаштування значення BN для палива з високим вмістом сірки; низьке значення BN – налаштування значення BN для палива з низьким вмістом сірки; коефіцієнт швидкості подачі – значення, отримане під час тесту; середній ефективний тиск двигуна, наведений у відсотках; мінімальна швидкість подачі – мінімальна доза CLO, що надходить до двигуна в діапазоні RPM алгоритму. Мінімальна швидкість подачі палива $S \% = FRF$, $0,6/1,8 = 0,33$ (оптимальний FRF), FRF для BN 100 = 0,25. Установка 76BN дозволить правильно дозувати при мінімальній швидкості подачі 0,6 г/(кВт·год). Коефіцієнт подачі був встановлений згідно розрахунків і документації двигуна MAN-B&W 5S70ME-C, що працює на HFO з вмістом сірки 2,97%. Тестування проводилося протягом п'яти днів, за умов, як зазначено в сервісному листі MAN SL2014-587: двигун завантажено вище контрольної точки РК; коефіцієнт коригування швидкості подачі = 1,00. Швидкість подачі встановлено на: 1,38 г/(кВт·год) для першого циліндра; 1,24 г/(кВт·год) для другого циліндра; 1,00 г/(кВт·год) для третього циліндра; 0,87 г/(кВт·год) для четвертого і 0,64 г/(кВт·год) для п'ятого. Встановлення системи змішування масла циліндрів (АСОМ) показано на рис. 6.

Система АСОМ змішує доступні на судні марки циліндрових масел до отримання необхідного значення BN, яке вона отримала від системи керування двигуном чи було внесено вручну членами машинної команди з огляду на вміст сірки у використовуваному паливі. У результаті BN циліндрового масла знаходиться в діапазоні значень, яке отримано з двох марок циліндрових масел, за допомогою їх змішування, загальний принцип є у змішуванні циліндрових масел для отримання потрібного BN масла. Змішування циліндрових масел ґрунтується на введенні кількості масла у залежності від наявності сірки у важкому судовому паливі, на якому працює МОД, а система ME-ECS контролює АСОМ, система автоматично вираховує еквівалент сірки Se у паливі та потрібне BN масла для нейтралізації.

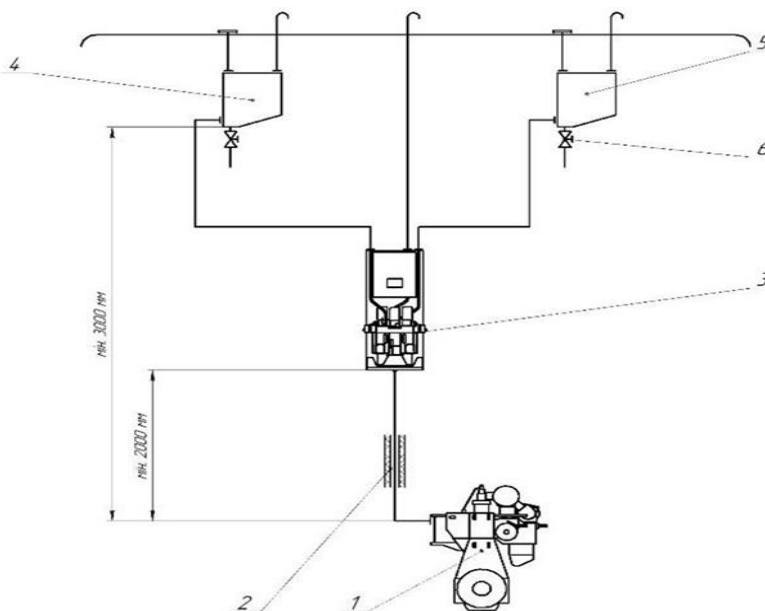


Рис. 6 – Встановлення системи автоматичного змішування АСОМ: 1 – головний двигун; 2 – теплоізолятор; 3 – АСОМ; 4 – витратна цистерна циліндрового масла BN 100; 5 – витратна цистерна циліндрового масла BN 25; 6 – зливний кран

Дана система має змогу працювати з відомими системами керування двигунами серії ME-C/-GI/ LGI і ME-B-GI/-LGI (рис. 7), показники вмісту сірки в судовому важкому паливі вносяться до системи АСОМ членами машинної команди, на двигунах фірми MAN-B&W серії ME-

В типу МС-С система АСОМ працює автономно та керується з панелі АСОМ або MES-ECS у співпраці та обміном даними з блоком керування судновим двигуном [1-8].

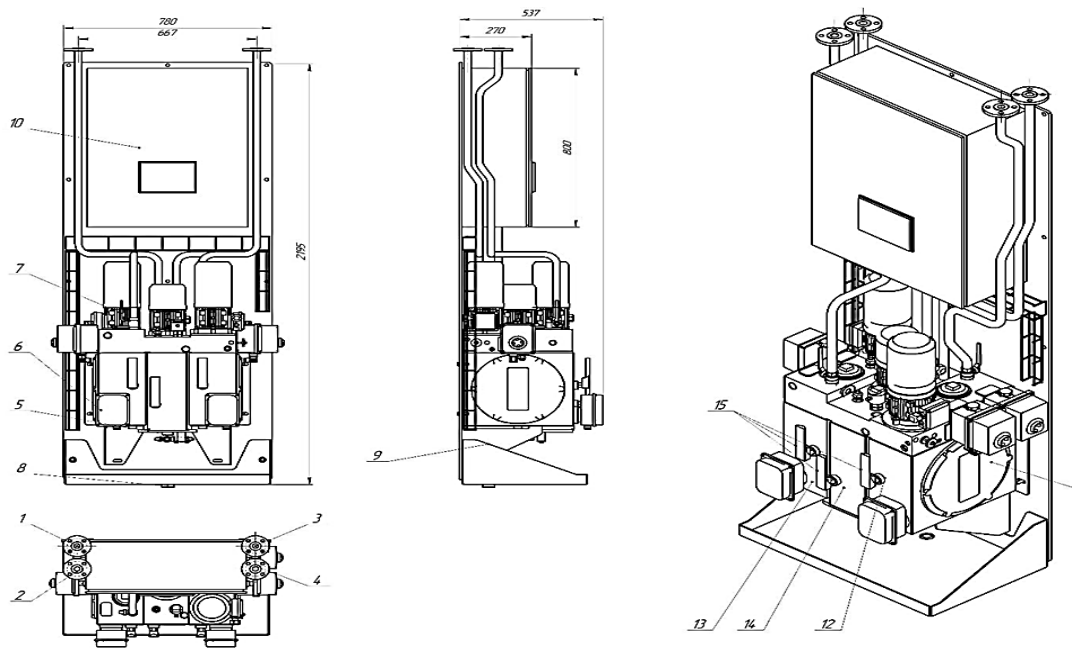


Рис. 7 – Компонування системи АСОМ: 1 – трубопровід повернення масла до двигуна; 2 – трубопровід підводу циліндрового масла марки BN 25; 3 – трубопровід деаерації масла; 4 – трубопровід підводу циліндрового масла марки BN 100; 5 – трубопровід подачі масла на лубрикатори; 6 – електронний блок; 7 – насос; 8 – пробка для зливу; 9 – остов; 10 – електронний блок керування системою; 11 – люк; 12 – ємність для циліндрового масла марки BN 100; 13 – ємність для циліндрового масла марки BN 25; 14 – ємність для змішаного циліндрового масла; 15 – показчик рівня масла

Загальний об'єм змішаного масла невеликий, що робить можливим швидкий перехід від одного числа BN до іншого, в залежності від вмісту сірки в паливі, система АСОМ вимірює та постійно проводить контроль щоденного споживання циліндрового масла, за рахунок цього не потрібен постійний контроль з боку машинної команди судна [2-8]. У порівнянні з традиційною системою циліндрового мащення, система АСОМ виключає два невеликих резервуари з підігрівниками масла, циліндрове масло подають від резервуарів до АСОМ за допомогою насосів або самопливом, система розташовується у машинному відділенні судна [1-8]. Стандарти, які прописані в системі АСОМ, EoD: 442171, для двигунів ME-C-GI і ME-B-GI, що працюють у режимі використання палива двох видів (SDF), для інших двигунів система АСОМ доступна як додаткова і встановлюється за бажанням судновласника. Циліндрове масло подається до лубрикаторної системи мащення Alpha від сервісного баку або системи АСОМ. Вся система контролюється блоком керування (БК), який контролює частоту впорскування на основі сигналу швидкості та навантаження двигуна, заданий тахометром та індексом палива. Перед пуском циліндри можна попередньо змастити і протягом експлуатації оператор може вибрати подачу масла до максимуму, встановленого на рівні 200% [1-8]. Відомо, що потреба в кількості циліндрового масла залежить від умов експлуатації судна та енергетичної установки. Alpha ACC (Adaptive Cylinder-Oil Control) – режим мащення для двотактних двигунів компанії MAN Diesel, дозування масла пропорційне навантаженню двигуна і вмісту сірки в паливі. Рекомендовані рівні лужного числа циліндрового масла для МОД фірми MAN B&W показано на рис. 8. Регулювання швидкості подачі слід виконувати відповідно до якості і обсягу палива в будь-який момент часу [1-8].

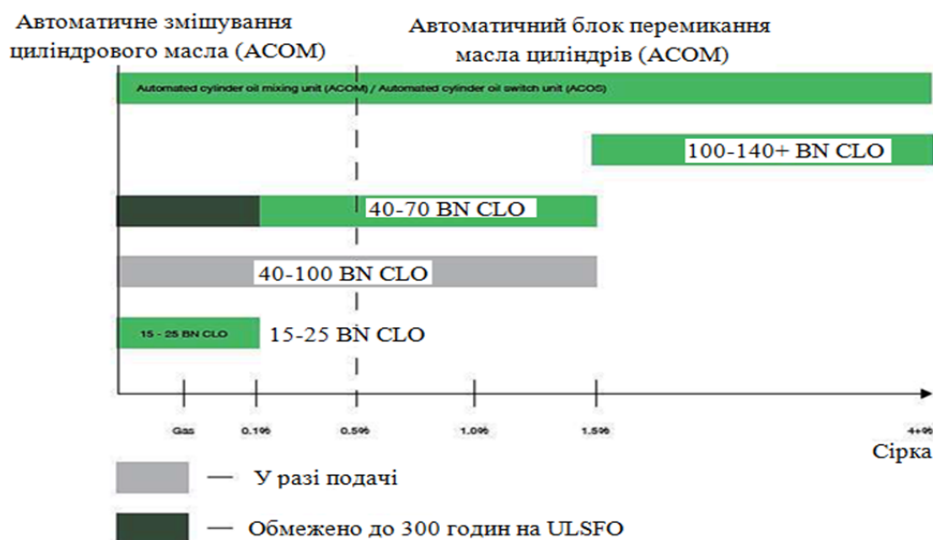


Рис. 8 – Рекомендовані рівні TBN для двигунів фірми MAN B&W

Висновки

На підставі огляду та врахування особливостей і умов експлуатації лубрикаторної системи мащення суднового МОД, констатуємо, що на даний період часу вимоги для забезпечення та підтримання надійності і довговічності сучасних суднових двигунів, а особливо вимоги до циліндрових масел, є жорсткішими, аніж для МОД попередніх моделей. За рахунок використання системи «АСОМ» у судновій енергетичній установці, можуть бути виготовлені з допомогою змішування різні циліндрові масла з різним лужним числом, з огляду на вимоги правил експлуатації суднового МОД, сорту важкого палива і вмісту сірки в ньому. Автоматично відбувається регулювання швидкості подачі циліндрового масла системою в залежності від умов експлуатації МОД та числа TBN використовуваного циліндрового масла. Перевагами АСОМ є її здатність забезпечувати своєчасне змішування різних марок циліндрових масел, враховуючи вміст сірки у паливі 0,1% до 3,5%, за рахунок цього нейтралізувати сполуки сірки, система «АСОМ» забезпечує точне дозування і безперервну подачу циліндрового масла до лубрикаторів, а це збільшує час напрацювання між капітальними ремонтами ЦПП суднового двигуна.

Перелік використаних джерел:

1. Alpha Adaptive Cylinder Oil Control (Alpha ACC). MAN Diesel, PrimeServ, 2007.
2. Богач В. М. Эффективность электронной системы смазывания цилиндров «PULS». *Судовые энергетические установки*. 2011. № 28. С. 13-20.
3. Богач В. М. Моделирование процессов смазывания сопряжений ЦПП при эксплуатации судовых дизелей. *Судовые энергетические установки*. 2012. № 29. С. 55-64.
4. Sagin S. V., Semenov O. V. Motor oil viscosity stratification in friction units of marine diesel motors. *American Journal of Applied Sciences*. 2016. Vol. 13. № 2. Pp. 200-208. DOI: <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.200.208>.
5. The ME Engines Service Experience. 3rd ed. Copenhagen : MAN B&W DIESEL A/S, 2008. 13 p.
6. Sagin S. V., Solodovnikov V. G. Cavitation treatment of high-viscosity marine fuels for medium-speed diesel engines. *Modern Applied Science*. 2015. Vol. 9. № 5. Pp. 269-278. DOI: <https://doi.org/10.5539/mas.v9n5p269>.
7. Эксплуатационные показатели эффективности лубрикаторных систем судовых дизелей / Богач В. М., Шебанов О. М., Колієв І. Д., Журавльов Ю. І. *Судовые энергетические установки*. 2007. Вип. 19. С. 10-22.
8. Погорлецкий 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. С. 22-26.

References:

1. *Alpha Adaptive Cylinder Oil Control (Alpha ACC)*. MAN Diesel, PrimeServ, 2007.
2. V. M. Bohach, «Effektivnost elektronnoi systemy smazivaniya tsylyndrov «PULS» [«Efficiency of the electronic cylinder lubrication system «PULS»], *Sudovie enerhetycheskye ustanovky – Marine power plants*, № 28, pp. 13-20, 2011. (Rus.)
3. V. M. Bohach, «Modelyrovanye protsessov smazivaniya sopriazhenyi TsPH pry ekspluatatsyy sudovikh dyzelei» [«Modeling of lubrication processes of CPG joints during operation of marine diesel engines»], *Sudovie enerhetycheskye ustanovky – Marine power plants*, № 29, pp. 55-64, 2012. (Rus.)
4. S.V. Sagin, and O.V. Semenov, «Motor oil viscosity stratification in friction units of marine diesel motors», *American Journal of Applied Sciences*, vol. 13, № 2, pp. 200-208, 2016. doi: **10.3844/ajassp.2016.200.208**.
5. *The ME Engines Service Experience*, 3rd ed. Copenhagen : MAN B&W DIESEL A/S, 2008.
6. S.V. Sagin, and V. G. Solodovnikov, «Cavitation treatment of high-viscosity marine fuels for medium-speed diesel engines», *Modern Applied Science*, vol. 9, № 5, pp. 269-278, 2015. doi: **105539/mas.v9n5p269**.
7. V.M. Bohach, O.M. Shebanov, I.D. Koliiev, and Yu.I. Zhuravlov, «Ekspluatatsyonnie pokazately effektivnosti lubrykatornikh system sudovikh dyzelei» [«Performance indicators of the efficiency of lubricating systems of marine diesel engines»], *Sudovie enerhetycheskye ustanovky – Marine power plants*, vol. 19, pp. 10-22, 2007. (Rus.)
8. D.S. Pohorletskiy, I.V. Gritsuk, and I.V. Khudiakov, «Osoblyvosti ekspluatatsii lubrykatornoii systemy mashchennia sudnovoho dvyhuna MAN - B&W 5S70ME-C» [«Features of operation of the MAN - B&W 5S70ME-C marine engine lubrication system»], in Proceedings of 14-th Int. sci.-pract. conf. «Modern energy installations in transport, technologies and equipment for their maintenance», Kherson, 2023, pp. 22-26. (Ukr.)

Стаття надійшла 18.04.2024

Стаття прийнята 12.05.2024

УДК 656.61.052

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310709

© Калініченко Т.В.*

ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОВОДІННЯ ШЛЯХОМ ПОПЕРЕДЖЕННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН

Стаття присвячена дослідженню основних напрямків підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнень суден. Сучасний розвиток світового судноплавства характеризується зростанням інтенсивності морських перевезень, що значно підвищує ризики виникнення аварійних ситуацій, зокрема, зіткнень суден. Ці інциденти є однією з основних причин аварій на морі, що призводить до значних економічних втрат, шкоди навколишньому середовищу та ризику для життя людей. У статті проаналізовано різноманітні аспекти підвищення безпеки судноводіння, зокрема, використання сучасних технологій, організаційних заходів, підвищення кваліфікації екіпажу та ефективного технічного обслуговування суден. Основну увагу приділено наступним напрямкам: технічному забезпеченню, організаційним заходам, навчанням і тренінгам для екіпажу, системам зв'язку та міжнародній координації, а також забезпеченню технічної справності суден. Радіолокаційні системи дозволяють виявляти і відстежувати судна на різних відстанях, що є критично важливим у складних погодних умовах. Важливим аспектом є підвищення кваліфікації

* здобувачка ступеня доктора філософії, ст. викладач, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-3531-8281, tkatana1002@gmail.com

екіпажу. Регулярні професійні навчання, тренінги та імітаційні тренажери допомагають екіпажам адаптуватися до нових технологій і ефективно реагувати на небезпечні ситуації. Ефективна система зв'язку і міжнародна координація є критично важливими для оперативного реагування на надзвичайні ситуації. Системи аварійного зв'язку забезпечують швидкий обмін інформацією між суднами і береговими службами, а міжнародна співпраця сприяє підвищенню рівня підготовки та узгодженості дій. Забезпечення технічної справності суден через регулярні інспекції і технічний огляд є основою безпеки судноплавства, дозволяючи виявляти і усувати потенційні проблеми. Стаття підкреслює важливість комплексного підходу до підвищення безпеки судноводіння, що включає інтеграцію передових технологій, організаційних процесів, навчання та технічного обслуговування. Цей підхід сприяє зменшенню ризиків зіткнень суден і підвищенню загальної безпеки на морі.

Ключові слова: безпека судноводіння, попередження зіткнень суден, сучасні навігаційні технології, радіолокаційні системи, судові системи, морський транспорт, водний транспорт.

T.V. Kalinichenko. Main directions for improvement of navigation safety through prevention of ship collisions. The article is devoted to the study of the main directions of improving the safety of navigation by preventing ship collisions. The modern development of global shipping is characterized by an increase in the intensity of maritime transportation, which significantly increases the risks of emergencies, in particular ship collisions. These incidents are one of the main causes of maritime accidents, resulting in significant economic losses, environmental damage and risk to human life. The article analyzes various aspects of improving safety of navigation, including the use of modern technologies, organizational measures, crew training and efficient ship maintenance. The focus is on the following areas: technical support, organizational measures, education and training for the crew, communication systems and international coordination, as well as ensuring the technical serviceability of ships. Radar systems allowing to detect and track ships at different distances, which is critical in difficult weather conditions. Another important aspect is crew training. Regular professional education, training, and simulation training help crews adapt to new technologies and respond effectively to dangerous situations. An effective communication system and international coordination are critical for rapid response to emergencies. Emergency communication systems ensure rapid exchange of information between ships and coastal services, and international cooperation contributes to increased preparedness and coordination. Ensuring the technical serviceability of ships through regular inspections and technical surveys is the basis for safe navigation, allowing to identify and eliminate potential problems. The article emphasizes the importance of a comprehensive approach to improving shipping safety, including the integration of advanced technologies, organizational processes, training and maintenance. This approach helps to reduce the risk of ship collisions and improve overall safety at sea.

Key words: safety of navigation, prevention of ship collisions, modern navigation technologies, radar systems, ship systems, maritime transport, waterborne transport.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток світового судноплавства супроводжується зростанням інтенсивності морських перевезень, що, у свою чергу, підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій, зокрема, зіткнень суден. Зіткнення суден є однією з основних причин аварій на морі, що призводить до значних економічних втрат, шкоди навколишньому середовищу та ризику для життя людей. Тому актуальність проблеми забезпечення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнень суден не викликає сумнівів.

Незважаючи на наявність міжнародних правил та стандартів, таких як Міжнародні правила попередження зіткнень на морі (COLREGs), частота інцидентів залишається значною, що свідчить про необхідність удосконалення наявних методів і засобів забезпечення безпеки. З огляду на це, виникає потреба в аналізі та впровадженні новітніх технологій, зокрема, систем автоматизованого керування, радіолокаційного обладнання, систем навігаційного спостереження, а також у розробці нових підходів до навчання та підвищення кваліфікації екіпажу.

Таким чином, проблема підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнень суден залишається актуальною і вимагає комплексного підходу, що включає технічні, організаційні та навчально-тренувальні заходи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні технології запобігання зіткненню суден у морі включають електронні системи відображення карт та інформації (ECDIS) і автоматичні ідентифікаційні системи (AIS), які підвищують безпеку навігації та зв'язку [1]. Автоматичні системи запобігання зіткненням (ACAS) з'являються як потенційно ефективні рішення для зменшення аварій, пов'язаних з людськими помилками [2]. Останні дослідження зосереджені як на виявленні, так і на вирішенні конфліктів, причому дослідження стосуються пілотованих і безпілотних суден [3]. Інтеграція мобільних додатків, хмарних обчислень і аналізу великих даних у проєктах «розумних суден» пропонує багатообіцяючі досягнення в галузі безпеки на морі [4]. Ці технології спрямовані на поліпшення ситуаційної обізнаності, забезпечення обробки даних у режимі реального часу і розширення можливостей прийняття рішень для судових операторів і берегових станцій. Існуючі технології досягли значного прогресу, але поточні дослідження спрямовані на подальше зменшення кількості морських аварій і підвищення загальної безпеки на морі шляхом розробки і впровадження цих передових систем.

Інтеграція заходів безпеки з організаційними процесами може оптимізувати як безпеку, так і продуктивність. Соціотехнічний підхід розглядає безпеку як емерджентну властивість складних систем, що вимагає спільної оптимізації соціальних і технічних компонентів [5]. Це передбачає оцінку загального рівня безпеки, визначення відповідних заходів, оцінку організаційної готовності та ефективне впровадження покращень. Конкретні заходи, які можуть підвищити як безпеку, так і продуктивність праці, включають вдосконалення обладнання, забезпечення просторих робочих зон і підтримання належного порядку в приміщеннях [6]. Для вирішення протиріч між продуктивністю і безпекою можна застосувати інноваційний підхід з використанням системної інтеграції безпеки і методів вирішення протиріч, таких як TRIZ [7]. Організації також можуть отримати вигоду від впровадження стандарту ISO 45001, який містить рекомендації щодо вибору і впровадження технічних заходів для зменшення загроз і поліпшення умов праці [8]. Ці комплексні підходи можуть призвести до більш ефективного управління безпекою та покращення організаційних показників.

Проаналізовані статті разом підкреслюють важливість комплексного підходу до забезпечення безпеки судноводіння, який включає інтеграцію передових технологій, організаційних процесів та соціотехнічних аспектів для зменшення ризиків і підвищення загальної ефективності роботи суден.

Мета статті полягає в аналізі основних напрямків підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнень суден, з акцентом на використання сучасних методів оптимального керування, математичного моделювання та інтеграції інноваційних технологій.

Виклад основного матеріалу. Безпека судноплавства є критичним аспектом морської діяльності, що потребує постійної уваги і вдосконалення. Основні напрямки підвищення безпеки судноводіння (рисунок), спрямовані на попередження зіткнень суден, включають технічне забезпечення, організаційні заходи, підвищення кваліфікації персоналу, забезпечення ефективного зв'язку та координації, а також регулярне технічне обслуговування суден. Схема зображена на рисунку відображає основні напрями і заходи, спрямовані на підвищення безпеки судноводіння, структуровані за категоріями.

Одним з ключових елементів забезпечення безпеки є впровадження сучасних технологій, таких як радіолокаційні системи, автоматична ідентифікаційна система (AIS) і електронні картографічні та навігаційні системи (ECDIS).

Радіолокаційні системи дозволяють виявляти і відстежувати судна на різних відстанях, що є критично важливим у складних погодних умовах або при недостатній видимості.

AIS забезпечує передачу даних про судна, таких як курс, швидкість і позиція, що дозволяє операторам краще контролювати ситуацію на воді і приймати обґрунтовані рішення щодо запобігання зіткнень.

ECDIS покращують можливості навігації, допомагаючи уникати небезпек, таких як мілководдя або підводні перешкоди, і забезпечують точну інформацію про навігаційну обстановку.

Організаційні заходи включають управління маршрутами та регулювання руху суден, а також забезпечення дотримання міжнародних правил попередження зіткнень на морі (COLREGs).



Рисунок – Схема основних напрямків підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнень суден

Маршрутне управління передбачає визначення спеціальних морських шляхів і зон, де обмежено або заборонено плавання, що дозволяє оптимізувати рух суден і зменшити ризик аварійних ситуацій.

COLREGs встановлюють стандарти поведінки для суден у різних ситуаціях, включаючи правила пріоритету руху і поведінки у випадку зустрічного руху, що є важливим для уникнення конфліктів на воді.

Навчання і підвищення кваліфікації екіпажу є невід'ємною частиною забезпечення безпеки судноплавства.

Регулярні професійні навчання та тренінги дозволяють екіпажу освоювати нові технології і методи управління, що сприяє більш ефективному реагуванню на небезпечні ситуації.

Імітаційні тренажери дають можливість відпрацьовувати навички у різних навігаційних ситуаціях і умовах, що сприяє підвищенню готовності екіпажу до надзвичайних ситуацій.

Ефективна система зв'язку і міжнародна координація є критично важливими для забезпечення безпеки на морі.

Системи аварійного зв'язку забезпечують швидкий і надійний обмін інформацією між суднами та береговими службами, що є ключовим фактором у випадку виникнення небезпеки.

Міжнародна координація включає співпрацю між країнами щодо стандартів безпеки і участь у спільних навчаннях, що сприяє підвищенню рівня підготовки та узгодженості дій.

Забезпечення технічної справності суден є основою безпеки судноплавства.

Інспекції і технічний огляд суден дозволяють виявляти і усувати потенційні проблеми, що можуть вплинути на безпеку, забезпечуючи тим самим належне функціонування навігаційних систем і обладнання.

Таким чином, впровадження цих заходів спрямоване на мінімізацію ризиків зіткнень суден, підвищення загальної безпеки на морі і покращення реагування на надзвичайні ситуації.

Висновки

У статті було проаналізовано основні напрямки підвищення безпеки судноводіння шляхом попередження зіткнень суден, з акцентом на використання сучасних методів оптимального керування, математичного моделювання та інтеграції інноваційних технологій. Основні висновки дослідження можна сформулювати наступним чином:

1. Технічні інновації є критично важливими для підвищення безпеки. Впровадження сучасних технологій, таких як радіолокаційні системи, автоматична ідентифікаційна система (AIS) і електронні картографічні та навігаційні системи (ECDIS), значно підвищує точність навігації, дозволяє своєчасно виявляти потенційні загрози і забезпечує обґрунтоване прийняття рішень для запобігання зіткненням.

2. Організаційні заходи є необхідними для ефективного управління рухом суден. Ретельне управління маршрутами, дотримання міжнародних правил попередження зіткнень (COLREGs) та впровадження чітких процедур регулювання руху суден дозволяє зменшити ризик аварій і забезпечити безпеку навігації.

3. Підвищення кваліфікації персоналу має безпосередній вплив на безпеку. Регулярні тренінги, навчання та імітаційні тренажери допомагають екіпажам адаптуватися до нових технологій і ефективно реагувати на небезпечні ситуації, що сприяє загальному підвищенню рівня безпеки.

4. Ефективна система зв'язку і міжнародна координація є необхідними для оперативного реагування. Системи аварійного зв'язку та міжнародна співпраця між країнами в питаннях безпеки сприяють своєчасному обміну інформацією та узгодженості дій у випадку надзвичайних ситуацій.

5. Регулярне технічне обслуговування суден забезпечує їх справність і безпеку. Інспекції та технічний огляд суден є критично важливими для виявлення і усунення потенційних проблем, що можуть вплинути на безпеку навігації.

Впровадження комплексного підходу, який включає технологічні інновації, організаційні заходи, підвищення кваліфікації екіпажу, ефективний зв'язок і технічну справність суден, є ключовим для досягнення високого рівня безпеки судноводіння. Подальше вдосконалення в цих областях та інтеграція нових технологій і методів управління сприятимуть зменшенню ризиків зіткнень суден і підвищенню загальної безпеки на морі.

Перелік використаних джерел:

1. Jincan H., Maoyan F. Based on ECDIS and AIS ship collision avoidance warning system research. *8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, Nanchang, China, 14-15 June 2015. Pp. 242-245. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICICTA.2015.69>.
2. Jingsong Z., Price W. G., Wilson P. A. Automatic collision avoidance systems : towards 21st century. 2008. 10 p.
3. Ship collision avoidance methods: State-of-the-art / Y. Huang et al. *Safety Science*. 2020. Vol. 121. Pp. 451-473. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.018>.
4. García-Domínguez A. Mobile applications, cloud and bigdata on ships and shore stations for increased safety on marine traffic; a smart ship project. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seville, Spain, 17-19 March 2015. Pp. 1532-1537. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125314>.
5. Houssin R., Coulibaly A. An approach to solve contradiction problems for the safety integration in innovative design process. *Computers in Industry*. 2011. Vol. 62(4). Pp. 398-406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2010.12.009>.
6. Dainoff M. J. A sociotechnical approach to occupational safety. *Work*. 2017. Vol. 56(3). Pp. 359-370. DOI: <https://doi.org/10.3233/wor-172500>.
7. Salminen S., Saari J. Measures to improve safety and productivity simultaneously. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 1995. Vol. 15(4). Pp. 261-269. DOI: [https://doi.org/10.1016/0169-8141\(94\)00042-2](https://doi.org/10.1016/0169-8141(94)00042-2).
8. Górný A. Application of technical measures to improve the work safety – systemic guidelines. *MATEC Web of Conferences*. 2021. Vol. 343. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134310006>.

References:

1. H. Jincan, and F. Maoyan, «Based on ECDIS and AIS ship collision avoidance warning system research», in Proceedings of 8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), Nanchang, China, 2015, pp. 242-245. **doi: 10.1109/ICICTA.2015.69.**
2. Z. Jingsong, W.G. Price, and P.A. Wilson, *Automatic collision avoidance systems : towards 21st century*. 2008.
3. Y. Huang, L. Chen, P. Chen, R.R. Negenborn, and P. Van Gelder, «Ship collision avoidance methods: State-of-the-art», *Safety Science*, vol. 121, pp. 451-473, 2020. **doi: 10.1016/j.ssci.2019.09.018.**
4. A. García-Domínguez, «Mobile applications, cloud and bigdata on ships and shore stations for increased safety on marine traffic; a smart ship project», in Proceedings of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Seville, Spain, 2015, pp. 1532-1537. **doi: 10.1109/ICIT.2015.7125314.**
5. R. Houssin, and A. Coulibaly, «An approach to solve contradiction problems for the safety integration in innovative design process», *Computers in Industry*, vol. 62(4), pp. 398-406, 2011. **doi: 10.1016/j.compind.2010.12.009.**
6. M.J. Dainoff, «A sociotechnical approach to occupational safety», *Work*, vol. 56(3), pp. 359-370, 2017. **doi: 10.3233/wor-172500.**
7. S. Salminen, and J. Saari, «Measures to improve safety and productivity simultaneously», *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 15(4), pp. 261-269, 1995. **doi: 10.1016/0169-8141(94)00042-2.**
8. A. Górny, «Application of technical measures to improve the work safety – systemic guidelines», *MATEC Web of Conferences*, vol. 343, pp. 1-7, 2021. **doi: 10.1051/mateconf/202134310006.**

Стаття надійшла 10.01.2024

Стаття прийнята 08.02.2024

274 АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 629.017:629.083:681.518

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310711

© Матейчик В.П.¹, Навроцький А.В.²**СИСТЕМАТИЗАЦІЯ СХЕМ АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ
МОНІТОРИНГУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

Інформаційний моніторинг є найважливішим етапом контролю технічного стану сучасного автомобіля в умовах експлуатації. Дистанційний контроль експлуатації транспортного засобу може бути раціонально сформований на основі систематизації схем апаратного забезпечення систем моніторингу. В статті виконано структурний аналіз та синтез можливих схем апаратного забезпечення систем моніторингу транспортного засобу у взаємодії з інфраструктурним середовищем на основі дослідження технічної системи «Транспортний Засіб – Інфраструктура». В статті проведено систематизацію систем моніторингу за видами апаратних засобів, використовуваних для отримання інформації про транспортний засіб та інфраструктурне середовище на різних етапах виконання властивих їм функцій в умовах експлуатації. В статті показано, що доцільно розглядати засоби отримання інформації про стан операторів, транспортних засобів і об'єктів перевезень (вантаж чи пасажери) як окремі функціональні елементи інформаційної системи моніторингу. Для систематизації можливих схем апаратного забезпечення систем моніторингу виділено 5 функціональних елементів як множини спеціалізованих апаратних засобів. Для кожного з функціональних елементів інформаційної системи моніторингу виділено основні морфологічні ознаки, які характеризують вид інформації, способи її отримання, обробки, передачі, аналізу та використання для вирішення визначених завдань експлуатації транспортного засобу. Визначено перелік конкретних варіантів технічного забезпечення виділених морфологічних ознак, поєднання яких визначає структуру і функціональні можливості сформованої інформаційної системи моніторингу для вирішення поставлених задач у визначених умовах експлуатації. В статті показаний процес дослідження формування схем структури апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації транспортних засобів з різною компоновкою у вигляді морфологічної формули. Отриману схему структури апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації транспортного засобу можливо розглядати як дієвий спосіб забезпечення ефективного моніторингу транспортного засобу в умовах експлуатації.

Ключові слова: транспортний засіб, технічний стан, експлуатація, моніторинг, система, засоби отримання інформації, морфологічна матриця, схеми апаратного забезпечення, ефективність.

V.P. Mateichyk, A.V. Navrotskyi. Systematization of hardware schemes of vehicle operation monitoring systems. Information monitoring is the most important stage of monitoring the technical condition of a modern car in operating conditions. Remote control of vehicle operation can be rationally formed on the basis of the systematization of the hardware schemes of the monitoring systems. In the article, a structural analysis and synthesis of possible hardware schemes of vehicle monitoring systems in interaction with the

¹ д-р техн. наук, професор, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: 0000-0002-3683-7246, wmate@ukr.net

² аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: 0009-0009-0188-4630, andrewnav888@gmail.com

infrastructural environment is performed on the basis of the study of the technical system «Vehicle – Infrastructure». The article systematizes monitoring systems according to the types of hardware used to obtain information about the vehicle and infrastructure environment at various stages of performance of their inherent functions in operational conditions. The article shows that it is advisable to consider the means of obtaining information about the condition of operators, vehicles and objects of transportation (cargo or passengers) as separate functional elements of the monitoring information system. In order to systematize possible schemes of hardware support of monitoring systems, 5 functional elements are selected as a set of specialized hardware. For each of the functional elements of the monitoring information system, the main morphological features that characterize the type of information, methods of obtaining, processing, transmitting, analyzing and using it to solve specific tasks of vehicle operation are highlighted. A list of specific options for technical support of selected morphological features is determined, the combination of which determines the structure and functionality of the formed information monitoring system to solve the tasks in the specified operating conditions. The article shows the process of researching the formation of diagrams of the structure of the hardware of information systems for monitoring the operation of vehicles with different layouts in the form of a morphological formula. The obtained diagram of the structure of the hardware support of information systems for monitoring the operation of the vehicle can be considered as an acting way to ensure effective monitoring of the vehicle in operating conditions.

Key words: *vehicle, technical condition, operation, monitoring, system, means of obtaining information, morphological matrix, hardware schemes, efficiency.*

Постановка проблеми. З метою забезпечення ефективної експлуатації транспортного засобу (ТЗ) в умовах навколишнього середовища необхідно системно отримувати інформацію про технічний стан його вузлів і агрегатів. Для цього застосовуються нові технологічні, інформаційні методи та підходи для вибору систем і засобів моніторингу на постійній основі. Конструкція сучасного ТЗ передбачає широке використання електронних (комп'ютерних, інформаційних) систем, які контролюють різноманітні процеси експлуатації, забезпечують інформатизацію технічних і технологічних процесів, дозволяють оптимізувати та спланувати свою роботу, створити умови для моніторингу параметрів технічного стану ТЗ в умовах інфраструктури. При цьому актуальним завданням є оптимізація та обґрунтування технічних заходів з систематизації схем апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу (ІСМ) експлуатації ТЗ.

Контроль (моніторинг) транспорту – це ефективне рішення проблеми стеження за місцезнаходженням і переміщенням та технічним станом ТЗ. Системи дистанційного моніторингу допомагають на практиці вирішувати великий спектр технічних, технологічних, бізнес- і соціальних завдань, що вирішує транспорт. Вони дозволяють: за допомогою засобів моніторингу виявляти точні координати дислокації ТЗ, його швидкість переміщення, витрати пального; здійснювати систематизацію збору статистики для оптимізації розробки раціональних конфігурацій маршрутів; сприяти в забезпеченні безпеки (наприклад, в разі аварії система контролю авто за допомогою супутникового зв'язку може автоматично транслювати сигнал про дорожньо-транспортну пригоду в службу порятунку); вести контроль дотримання графіка пересування ТЗ (вказана задача має особливе значення для вантажних автотранспортних підприємств і організацій, що займаються пасажирськими перевезеннями). Для забезпечення якісного дистанційного моніторингу повинні бути проаналізовані основні вимоги і особливості апаратного забезпечення дистанційного моніторингу технічного стану засобів транспорту в умовах експлуатації. Усі запропоновані сьогодні на ринку технологічні рішення, що відповідають за моніторинг і контроль ТЗ, мають одну мету – оперативно надавати достовірні відомості про ТЗ і його місцезнаходження, які потім можуть бути застосовані відповідно до бізнес-потреб споживачів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ефективність роботи ТЗ, як складної технічної системи, залежить, в першу чергу, від його технічного стану [1]. У зв'язку з цим виникає проблема управління технічним станом в процесі експлуатації ТЗ [1-3]. Управління експлуатацією транспортним засобом базується на даних, отриманих у процесі моніторингу, та прогнозі його основних параметрів. Також на технічний стан ТЗ впливає оточуюче середовище і умови

експлуатації. Роботи [1, 4, 5] показують, що зовнішнє середовище і умови експлуатації можуть викликати невизначеність і випадковість вихідних даних і можливих ситуацій експлуатації ТЗ. Засоби моніторингу як на транспортному засобі, так і в інфраструктурному середовищі, створюють раціональне органічне поєднання засобів і технологій в процесах моніторингу для отримання найбільш достовірних даних про технічний стан і експлуатацією ТЗ. Ускладнення полягають у використанні сучасних технологій автомобілебудування, значній просторовій протяжності, складності і розподілі експлуатаційних умов та транспортної і дорожньої інфраструктури з їх особливостями та різновидами. Саме поєднання засобів і технологій у відповідні схеми апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ і гарантує отримання найбільш достовірної інформації та забезпечує ефективну експлуатацію ТЗ в процесах самого моніторингу. Систематизація схем апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ і є предметом дослідження в представленій статті. З точки зору авторів, для виконання систематизації схем найбільш доцільно використовувати метод морфологічного аналізу, який ще називають методом морфологічного ящика.

Метод морфологічного аналізу являє собою комбінацію методу класифікації і методу узагальнення. Його суть полягає в декомпозиції проблеми її елементам, пошуку в цій схемі найбільш перспективного щодо всієї проблеми елемента її вирішення [4, 5]. Однак морфологічний аналіз передбачає не просту декомпозицію, а саме розкладання цілого на складові його частини, виділення елементів за принципами функціональної значимості та ролі, тобто впливу елемента або підсистеми на загальну проблему, а також прямий або опосередкований зв'язок із зовнішнім середовищем (іноді це називають надсистемою). Морфологічний аналіз, як один з найбільш розповсюджених методів творчого пошуку, базується на класифікації елементів [6-9]. Всі частини проблеми і підходи до їх вирішення умовно можуть бути зображені у вигляді морфологічної матриці. Морфологічний аналіз починається з певного рівня знань про об'єкт, що досліджується [10, 11]. Необхідність перебору всіх можливих альтернатив вирішення проблеми і вибір найбільш оптимального напрямку вимагає від дослідника різнобічні знання з різних галузей [12, 13]. Все це сприяє підвищенню знань про об'єкт, що досліджується, на якісно новий рівень. Автор методу Ф. Цвіккі довів на конкретному прикладі ефективність свого методу, побудувавши морфологічну матрицю для реактивних двигунів, які працювали на хімічному паливі [10, 11, 14-18].

Безперервний дистанційний моніторинг параметрів технічного стану сучасного ТЗ при його експлуатації забезпечує різні електронні системи керування робочими процесами вузлів і агрегатів. Вони виконують функції власної діагностики (самодіагностики) і діагностики керованих ними процесів та інформують оператора про відхилення, які виникли [1-5]. Запропонований підхід включає систему інформаційної взаємодії компонентів моніторингу: ТЗ з оператором; умови експлуатації транспортних засобів; транспортна та дорожня інфраструктура.

Метою дослідження є систематизація схем апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації ТЗ за допомогою морфологічної матриці.

Виклад основного матеріалу. За допомогою методу морфологічного аналізу, що дозволяє досліджувати структуру об'єктів і систем [4, 5], було виконано структурний аналіз та синтез можливих схем апаратного забезпечення ІСМ ТЗ у взаємодії з інфраструктурним середовищем (технічна система «Транспортний Засіб – Інфраструктура»). Дослідження проводилось за видами апаратних засобів, використовуваних для отримання інформації як про ТЗ, так і про інфраструктурне середовище, саме на різних етапах виконання властивих їм функцій в умовах експлуатації. Причому для зручності аналізу і синтезу ІСМ експлуатації ТЗ в заданих умовах інфраструктурного середовища доцільно розглядати засоби отримання інформації про стан операторів, ТЗ і об'єктів перевезень (вантаж чи пасажирів) як окремі функціональні елементи ІСМ.

Особливість наведених результатів дослідження полягає в тому, що в досліджуваній ІСМ технічної системи «Транспортний Засіб – Інфраструктура» виділено 5 функціональних елементів як множини спеціалізованих апаратних засобів, які забезпечують отримання, передачу, аналіз та використання отриманої інформації з метою підвищення ефективності експлуатації ТЗ у визначених умовах інфраструктурного середовища. Для кожного з функціональних елементів ІСМ виділено основні морфологічні ознаки, які характеризують вид інформації, способи її отримання, обробки, передачі, аналізу та використання для вирішення визначених завдань експлуатації ТЗ. За кожною з морфологічних ознак складений максимально повний перелік різних конкретних варіантів технічного забезпечення реалізації виділених морфологічних ознак, поєднання яких і

визначає структуру і функціональні можливості сформованої ІСМ для вирішення поставлених задач і досягнення основної мети функціонування ІСМ у визначених умовах експлуатації.

Морфологічні елементи (ознаки, варіанти) апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ розташовані у вигляді морфологічної матриці. Для коректного виконання морфологічного аналізу були точно сформульовані цілі функціонування технічної системи «Транспортний Засіб – Інфраструктура». Для ТЗ в умовах експлуатації такими цілями є сформований підхід для гарантування отримання повноцінної інформації про транспортний засіб в інфраструктурному середовищі в залежності від конфігурації і технічних можливостей апаратного забезпечення ІСМ і особливостей інфраструктурного середовища. Крім особливостей апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу ІСМ експлуатації ТЗ цілі реалізуються за поєднанням рівня використання вказаного обладнання для отримання інформації споживачем, в тому числі і за значеннями комбінованих (інтегрованих) показників.

Для кожного з функціональних елементів системи, саме для адаптації за особливими властивостями, характерні морфологічні ознаки, від яких залежить досягнення поставленої мети, показані в табл. 1. Представлення системи і варіації схем апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ в системних об'єктах дозволяє виділити їх основні функціональні елементи на різних рівнях системної взаємодії в частині засобів отримання і передачі інформації: для операторів функціонування системи (водій ТЗ, оператор системи моніторингу тощо); для отримання інформації про технічний стан ТЗ; для моніторингу стану об'єктів перевезення на ТЗ; для отримання інформації про параметри інфраструктурного середовища; для отримання інформації про засоби аналізу і використання інформації споживачем.

В морфологічній матриці схем структури апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ для функціонального елемента «Засоби отримання і передачі інформації про операторів» виділено 3 основних ознаки, від яких суттєво залежать складові структури апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу: 1 – вид інформації; 2 – спосіб отримання інформації; 3 – спосіб передачі споживачу. Для функціонального елемента «Засоби отримання і передачі інформації про технічний стан ТЗ» виділено 5 морфологічних ознак: 4 – вид сформованої / отриманої інформації; 5 – спосіб отримання інформації; 6 – вид переданої інформації; 7 – спосіб обробки інформації; 8 – спосіб передачі споживачу. Найбільш важливими морфологічними ознаками функціонального елемента «Засоби отримання і передачі інформації про стан об'єктів перевезення на ТЗ» є 4 ознаки: 9 – вид інформації; 10 – вид передачі інформації; 11 – спосіб отримання інформації; 12 – спосіб передачі. Для функціонального елемента «Засоби отримання і передачі інформації про параметри інфраструктурного середовища» виділено 4 морфологічних ознаки: 13 – спосіб отримання інформації; 14 – вид передачі; 15 – спосіб отримання інформації; 16 – спосіб передачі. А для функціонального елемента «Засоби аналізу і використання інформації споживачем» виділено також 4 морфологічних ознаки: 17 – спосіб зберігання; 18 – тривалість зберігання; 19 – рівень обробки інформації для використання за призначенням ІСМ; 20 – рівень використання.

Для кожної з 20 морфологічних ознак системи вибрано основні варіанти їх реалізації (від 3 до 7). Зміна варіанту будь-якої з 20 ознак формує нову схему структури апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ.

Для формування морфологічних формул досліджуваних варіантів (позначення відповідно x_{11} (перший варіант першої морфологічної ознаки), x_{21} , x_{31} тощо) включаємо окремі схеми усіх ознак відповідно до досліджуваного варіанту із властивими їм характеристиками і особливостями. Сформовані морфологічні матриці містять певну кількість можливих варіантів на подальших етапах розвитку ІСМ. Такий підхід дозволяє системно аналізувати різні структури ІСМ, що впливають із можливого поєднання різних варіантів реалізації окремих морфологічних ознак усіх функціональних елементів.

Таблиця 1

Морфологічна матриця структури апаратного забезпечення інформаційних систем моніторингу експлуатації ТЗ

Засоби отримання і передачі інформації про операторів	1. Вид інформації	1.1. Статистична інформація	1.2. Інформація про особу	1.3. Інформація довідкового характеру	1.4. Спеціальна інформація		
	2. Спосіб отримання інформації	2.1. Додаткових датчиків або обладнання, що встановлене на операторі		2.2. Додаткових датчиків ТЗ або робочого місця оператора	2.3. Спеціальне обладнання в інфраструктурному середовищі		
	3. Спосіб передачі споживачу	3.1. Накопичення інформації на транспортному засобі		3.2. Застосування зовнішніх мереж	3.3. Комбінований варіант		
Засоби отримання і передачі інформації про технічний стан ТЗ	4. Вид сформованої / отриманої інформації	4.1. Статистична інформація	4.2. Інформація про ТЗ		4.3. Інформація довідкового характеру	4.4. Спеціальна інформація	
	5. Спосіб отримання інформації	5.1. Штатних датчиків і систем	5.2. Додаткових датчиків ТЗ	5.3. Комбінований варіант	5.4. Спеціальне обладнання в інфраструктурному середовищі		
	6. Вид переданої інформації	6.1. Статистична інформація	6.2. Інформація про ТЗ	6.3. Інформація довідкового характеру	6.4. Спеціальна інформація		
	7. Спосіб обробки інформації	7.1. На транспортному засобі	7.2. На зовнішньому носії в інфраструктурному середовищі	7.3. Хмарна технологія	7.4. Комбінований варіант		
	8. Спосіб передачі споживачу	8.1. Накопичення інформації на транспортному засобі		8.2. Застосування зовнішніх мереж	8.3. Комбінований варіант		
Засоби отримання і передачі інформації про стан об'єктів перевезення на ТЗ	9. Вид інформації	9.1. Інформація відсутня	9.2. Статистична інформація	9.3. Інформація про стан об'єктів перевезення на ТЗ	9.4. Інформація довідкового характеру	9.5. Спеціальна інформація	
	10. Вид передачі інформації	10.1. Без передачі інформації	10.2. Побудована на основі систем супутникової навігації	10.3. Побудована на основі обладнання та технологій стільникового та/або радіозв'язку		10.4. Побудована на основі обчислювальної техніки і цифрових карт	
	11. Спосіб отримання інформації	11.1. Без отримання інформації	11.2. Штатних датчиків і систем	11.3. Додаткових датчиків ТЗ	11.4. Комбінований варіант	11.5. Спеціальне обладнання в інфраструктурному середовищі	
	12. Спосіб передачі	12.1. Без передачі інформації	12.2. Накопичення інформації на транспортному засобі		12.3. Застосування зовнішніх мереж	12.4. Комбінований варіант	
Засоби отримання і передачі інформації про параметри інфраструктурного середовища	13. Вид інформації	13.1. Статистична інформація	13.2. Інформація про параметри інфраструктурного середовища		13.3. Інформація довідкового характеру	13.4. Спеціальна інформація	
	14. Вид передачі	14.1. Радіо, відео		14.2. Від ТЗ	14.3. Від інфраструктури	14.4. Комбінований варіант	
	15. Спосіб отримання інформації	15.1. Штатних датчиків і систем	15.2. Додаткових датчиків ТЗ	15.3. Комбінований варіант	15.4. Спеціальне обладнання в інфраструктурному середовищі		
	16. Спосіб передачі	16.1. Кабельним з'єднанням	16.2. Застосуванням гаджетів	16.3. Зовнішніми мережами	16.4. Спеціальне обладнання в інфраструктурному середовищі		
Засоби аналізу і використання інформації споживачем	17. Спосіб зберігання	17.1. На транспортному засобі	17.2. На зовнішньому носії в інфраструктурному середовищі		17.3. Хмарна технологія	17.4. Комбінований варіант	
	18. Тривалість зберігання	18.1. Короткострокова		18.2. Тривалий час	18.3. Постійне зберігання		
	19. Рівень обробки інформації	19.1. Неструктурована інформація	19.2. Структурована інформація певного типу	19.3. Структурована і неструктурована інформація, адаптована до використання комп'ютерними системами		19.4. Систематизована інформація за допомогою відповідного ПО	
	20. Рівень використання	20.1. Відомо	20.2. Контроль в цілому та(або) за окремими параметрами	20.3. Діагностика	20.4. Планування ТО і Р	20.5. Визначення показників експлуатаційної ефективності	20.6. Прогнозування

Кількість можливих схем (N_{mc}) структури апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ у випадку використання представленої морфологічної матриці складає:

$$N = 4 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 4 \cdot 7 = 4,57 \cdot 10^{11}.$$

Так, схема структури апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ при моніторингу оператора (водія) і самого ТЗ сканером-комунікатором через CAN-шину включає такі сполучення визначених ознак:

$$\left[\begin{array}{l} (x_{14}; x_{23}; x_{32}) + (x_{41}; x_{51}; x_{61}; x_{72}; x_{82}) + \\ + (x_{91}; x_{101}; x_{111}; x_{121}) + (x_{132}; x_{143}; x_{154}; x_{163}) \\ + (x_{172}; x_{182}; x_{193}; x_{202}) \end{array} \right]. \quad (1)$$

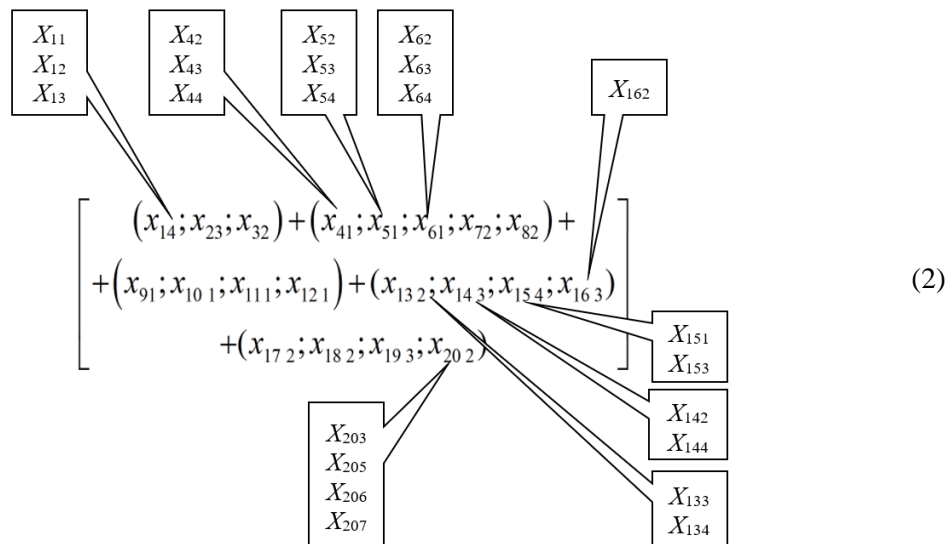
Тобто це система моніторингу, в основу якої покладений збір спеціальної інформації про операторів (водія, тощо) (x_{14}), що отримується за допомогою спеціального обладнання в інфраструктурному середовищі (x_{23}) і передається споживачу інформацію при застосуванні зовнішніх мереж (x_{32}); яка працює на основі статистичної інформації (x_{42}), як різновиду сформованої / отриманої інформації про технічний стан ТЗ, що отримується від штатних датчиків і систем (x_{51}) і передається у вигляді статистичної інформації (x_{61}), яка обробляється на зовнішньому носії в інфраструктурному середовищі (x_{72}) і передається із застосуванням зовнішніх мереж комунікацій (x_{82}); у якій відсутня інформація про стан об'єктів перевезення на ТЗ (x_{91}), як різновид інформації про стан об'єктів перевезення на ТЗ, яка не передається (x_{101}) і не отримується ззовні ТЗ (x_{111}) та не передається за межі ТЗ (x_{121}); у якій інформація про параметри інфраструктурного середовища отримується на основі інформації саме про параметри інфраструктурного середовища (x_{132}), яка передається від інфраструктури (x_{143}) за допомогою спеціального обладнання в інфраструктурному середовищі (x_{154}) та передається із застосуванням зовнішніх мереж комунікацій (x_{163}); інформація про параметри інфраструктурного середовища (x_{132}), яка передається від інфраструктури (x_{143}) за допомогою спеціального обладнання в інфраструктурному середовищі (x_{154}), що передається із застосуванням зовнішніх мереж комунікацій (x_{163}); що базується на основі використання засобів аналізу і інформації споживачем і зберігається на зовнішньому носії в інфраструктурному середовищі (x_{172}) на протязі тривалого часу (x_{182}), при чому рівень обробки інформації для формування відповідної бази – структурована і неструктурована інформація, адаптована до використання комп'ютерними системами (x_{193}), що використовується для контролю в цілому та(або) за окремими параметрами ТЗ (x_{202}).

Для здійснення аналізу і використання інформації споживачем, крім показаного варіанту, в частині способу зберігання інформації можуть використовуватись варіанти зберігання на транспортному засобі (x_{171}) або в хмарному середовищі з використанням відповідних технологій (x_{173}), або можуть застосовуватись комбіновані варіанти (x_{174}) зберігання інформації. При цьому рівень обробки інформації для формування відповідної бази може бути неструктурований (x_{191}) або структурований (x_{192}), або систематизований (x_{194}) за допомогою відповідного програмного забезпечення. Рівень використання інформації в системі моніторингу передбачений також у варіанті до відома (x_{201}) або для реалізації задач діагностування (x_{203}), або для планування ТО і Р (x_{204}), визначення показників експлуатаційної ефективності (x_{205}), для виконання прогнозування параметрів стану (x_{206}) або ж формування комбінованих (інтегрованих) показників ТЗ (x_{207}).

Сформований підхід до формування структури апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ дозволяє системно досліджувати можливості використання різних методів і засобів моніторингу для функціонування системи «Транспортний Засіб – Інфраструктура». Можливі варіанти складових системи витікають із закономірностей (морфології) будови розробленої матриці (табл. 1). Підхід до формування морфологічної матриці дозволяє враховувати крім вже відомих для використання варіантів ще й нетрадиційні варіанти, які при звичайному переборі могли залишитись непоміченими. Завдяки цьому підходу унеможливується варіант пропуску якихось поєднань складових. Крім цього, не втрачається можливість розглядати перспективні технологічні рішення, які поки ще знаходяться на стадіях функціональної розробки автовиробниками

(наприклад, поєднання варіантів x_{51} і x_{71} або x_{207}), або тих варіантів, що на сьогодні здаються взагалі несумісними в дослідженні процесів моніторингу експлуатації ТЗ.

Виходячи із поставлених задач дослідження, в представленій статті показаний процес дослідження можливих схем структури апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ з різною компоновкою, морфологічна формула якої має вигляд (стрілками показані варіанти, що планується варіювати в дослідженні), а саме структура апаратного забезпечення інформаційної системи моніторингу експлуатації ТЗ при моніторингу оператора (водія) і самого ТЗ сканером-комунікатором через CAN-шину.



Отриману схему структури апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ з варіантами компоновки складових можливо розглядати як дієвий спосіб забезпечення моніторингу ТЗ в умовах експлуатації, які на сьогодні складають основу діючого парку легкових і вантажних ТЗ.

Висновки

Дистанційний контроль експлуатації ТЗ може бути раціонально сформований на основі систематизації схем апаратного забезпечення ІСМ. Виконано структурний аналіз та синтез можливих схем апаратного забезпечення ІСМ ТЗ у взаємодії з інфраструктурним середовищем на основі технічної системи «Транспортний засіб - Інфраструктура». В статті проведено систематизацію систем моніторингу за видами апаратних засобів, використовуваних для отримання інформації про транспортний засіб та інфраструктурне середовище на різних етапах виконання властивих їм функцій в умовах експлуатації. Показано, що доцільно розглядати засоби отримання інформації про стан операторів, транспортних засобів і об'єктів перевезень (вантаж чи пасажери) як окремі функціональні елементи інформаційної системи моніторингу. Для систематизації можливих схем апаратного забезпечення систем моніторингу виділено 5 функціональних елементів як множини спеціалізованих апаратних засобів. Для кожного з функціональних елементів ІСМ виділено основні морфологічні ознаки, які характеризують вид інформації, способи її отримання, обробки, передачі, аналізу та використання для вирішення визначених завдань експлуатації ТЗ. Для кожної з морфологічних ознак визначено перелік конкретних варіантів технічного забезпечення, поєднання яких визначає структуру і функціональні можливості сформованої ІСМ для вирішення поставлених задач і досягнення основної мети функціонування інформаційної системи моніторингу у визначених умовах експлуатації. Показаний процес дослідження саме формування схем структури апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ з різною компоновкою у вигляді морфологічної формули. Отриману схему структури апаратного забезпечення ІСМ експлуатації ТЗ з варіантами компоновки складових можливо розглядати як дієвий спосіб забезпечення моніторингу ТЗ в умовах експлуатації.

Перелік використаних джерел:

1. Інтелектуальні системи моніторингу транспорту: монографія / В. П. Волков та ін. Харків : Вид-во НТМТ, 2015. 246 с.
2. The complex application of monitoring and express diagnosing for searching failures on common rail system units / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018-01-1773. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
3. Information security risk management of vehicles / D. Klets et al. *SAE Technical Paper*. 2018-01-0015. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>.
4. Матейчик В. П. Системний підхід до аналізу структурних схем енергоустановок транспортних засобів. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2002. № 7. Т. 2. С. 162-167.
5. Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки: навч. посіб. / Дмитриченко М. Ф., Матейчик В. П., Грищук О. К., Цюман М. П. Київ : НТУ, 2014. 168 с.
6. Катренко А. В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації: Навчальний посібник. Львів : «Новий світ – 2000», 2003. 424 с.
7. Пилипенко Д. Є. Оцінка достовірності результатів аналізу перехресного впливу при розв'язанні задач технологічного передбачення. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2008. № 3. С. 129-140.
8. Панкратова Н. Д., Савченко І. О. Стратегія застосування методу морфологічного аналізу в процесі технологічного передбачення. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2009. № 2. С. 35-44.
9. Панкратова Н. Д., Савченко І. О. Застосування методу морфологічного аналізу до задач технологічного передбачення. *Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили. Серія «Комп'ютерні технології»*. 2008. Т. 90. Вип. 77. С. 6-13.
10. The Analytic Hierarchy Process (АHP). URL: http://www.ivm.vu.nl/en/Images/MCA3_tcm234-161529.pdf (дата звернення: 15.11.2023).
11. Saati T. Decision-making. Method of the analysis of hierarchies. 1993. 278 p.
12. Петруня Ю. Є., Говоруха В. Б., Літовченко Б. В. Прийняття управлінських рішень. Київ : Центр учбової літератури, 2011. 216 с.
13. Грабовецький Б. Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання. Вінниця : ВНТУ, 2010. 171 с.
14. Rethinking morphological analysis application for concept synthesis in engineering design. URL: <https://www.athensjournals.gr/technology/2016-3-2-4-Heller.pdf> (дата звернення: 03.12.2023).
15. Morphological Analysis in Inventive Engineering. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162517314208> (дата звернення: 03.12.2023).
16. Ritchey T. Morphological analysis – a general method for non-quantified modeling. Adapted from a paper presented at the 16th Euro Conference on Operational Analysis, Brussels, July 1998. URL: <https://www.swemorph.com/pdf/gma.pdf> (дата звернення: 01.12.2023).
17. Ritchey T. Modeling complex socio-technical systems using morphological analysis. Adapted from an address to the Swedish Parliamentary IT Commission, Stockholm, December 2002. URL: <https://www.swemorph.com/pdf/it-webart.pdf> (дата звернення: 01.12.2023).
18. Ritchey T. Futures studies using morphological analysis. Adapted from an article for the UN University Millennium Project: Futures Research Methodology Series, 2005. URL: <https://www.swemorph.com/pdf/futures.pdf> (дата звернення: 01.12.2023).

References:

1. V.P. Volkov, V.P. Mateichyk, P.B. Komov, I.V. Hrytsuk, M. Smeshek, T.V. Volkova, and M.P. Tsiuman, *Intelektualni systemy monitorynhu transportu: monohrafiia* [Intelligent transport monitoring systems: monograph]. Kharkiv, Ukraine: Vyd-vo NTMT Publ., 2015. (Ukr.)
2. I. Gritsuk, E. Y. Zenkin, N. Bulgakov, A. Golovan, I. Kuric, V. Mateichyk, M. Saga, V. Vychuzhanin, R. Symonenko, E. Rabinovich, V. Pavlenko, and D. Pohorletskyi, «The complex application of monitoring and express diagnosing for searching failures on common rail system units», *SAE Technical Paper*, 2018-01-1773, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1773**.
3. D. Klets, I. Gritsuk, A. Makovetskyi, N. Bulgakov, M. Podrigalo, I. Kyrychenko, O. Volska, and N. Kyzminec, «Information security risk management of vehicles», *SAE Technical Paper*, 2018-01-0015, 2018. doi: **10.4271/2018-01-0015**.

4. V. P. Mateichyk, «Systemnyi pidkhdid do analizu strukturnykh skhem enerhoustanovok transportnykh zasobiv» [«A systematic approach to the analysis of structural schemes of vehicle power plants»], *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of the National Technical University «KhPI»*, № 7, vol. 2, pp. 162-167, 2002. (Ukr.)
5. M.F. Dmytrychenko, V.P. Mateichyk, O.K. Hryshchuk, and M.P. Tsiuman, *Metody systemnoho analizu vlastyvostei avtomobilnoi tekhniki: navch. posib.* [Methods of system analysis of the properties of automotive equipment: a study guide]. Kyiv, Ukraine: NTU, 2014. (Ukr.)
6. A.V. Katrenko, *Systemnyi analiz ob'ektiv ta protsesiv kompiuteryzatsii: Navchalnyi posibnyk* [System analysis of objects and processes of computerization: Study guide]. Lviv, Ukraine: «Novyi svit – 2000» Publ., 2003. (Ukr.)
7. D.Ye. Pylypenko, «Otsinka dostovirnosti rezultativ analizu perekhresnoho vplyvu pry rozv'iazanni zadach tekhnolohichnoho peredbachennia» [«Assessment of the reliability of the results of cross-impact analysis when solving technological forecasting problems»], *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii – System research and information technologies*, № 3, pp. 129-140, 2008. (Ukr.)
8. N.D. Pankratova, and I.O. Savchenko, «Stratehiia zastosuvannia metodu morfolohichnoho analizu v protsesi tekhnolohichnoho peredbachennia» [«Strategy of applying the method of morphological analysis in the process of technological prediction»], *Naukovi visti NTUU «KPI» – KPI Science News*, № 2, pp. 35-44, 2009. (Ukr.)
9. N.D. Pankratova, and I.O. Savchenko, «Zastosuvannia metodu morfolohichnoho analizu do zadach tekhnolohichnoho peredbachennia» [«Application of the method of morphological analysis to the problems of technological prediction»], *Naukovi pratsi Chornomorskoho derzhavnoho universytetu imeni Petra Mohyly. Seriiia «Kompiuterni tekhnolohii» – Scientific works of the Black Sea State University named after Petro Mohyla. Series «Computer technologies»*, vol. 90, iss. 77, pp. 6-13, 2008. (Ukr.)
10. The Analytic Hierarchy Process (AHP). [Online]. Available: http://www.ivm.vu.nl/en/Im-ages/MCA3_tcm234-161529.pdf. Accessed on: November 15, 2023.
11. T. Saati, *Decision-making. Method of the analysis of hierarchies*. 1993.
12. Yu.Ye. Petrunia, V.B. Hovorukha, and B.V. Litovchenko, *Pryiniattia upravlinskykh rishen* [Making management decisions]. Kyiv, Ukraine: Tsentr uchbovoi literatury Publ., 2011. (Ukr.)
13. B.Ye. Hrabovetskyi, *Metody ekspertnykh otsinok: teoriia, metodolohiia, napriamky vykorystannia* [Methods of expert evaluations: theory, methodology, directions of use]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2010. (Ukr.)
14. Rethinking morphological analysis application for concept synthesis in engineering design. URL: <https://www.athensjournals.gr/technology/2016-3-2-4-Heller.pdf>. Accessed on: December 03, 2023.
15. Morphological Analysis in Inventive Engineering. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162517314208>. Accessed on: December 03, 2023.
16. Ritchey T. Morphological Analysis – A general method for non-quantified modeling. Adapted from a paper presented at the 16th Euro Conference on Operational Analysis, Brussels, July 1998. [Online]. Available: <https://www.swemorph.com/pdf/gma.pdf>. Accessed on: December 01, 2023.
17. Ritchey T. Modeling Complex Socio-Technical Systems using Morphological Analysis. Adapted from an address to the Swedish Parliamentary IT Commission, Stockholm, December 2002. [Online]. Available: <https://www.swemorph.com/pdf/it-webart.pdf>. Accessed on: December 01, 2023.
18. Ritchey T. Futures Studies using Morphological Analysis. Adapted from an article for the UN University Millennium Project: Futures Research Methodology Series, 2005. [Online]. Available: <https://www.swemorph.com/pdf/futures.pdf>. Accessed on: December 01, 2023.

Стаття надійшла 7.01.2024

Стаття прийнята 15.02.2024

275 ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

УДК 656.2

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310712

© Пархоменко Л.О.¹, Прохоров В.М.²

УТОЧНЕННЯ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ ПЛАНУ ФОРМУВАННЯ ПОЇЗДІВ ЗА РАХУНОК УРАХУВАННЯ ЕФЕКТУ НАВАНТАЖЕНОСТІ СОРТУВАЛЬНИХ СТАНЦІЙ

Стаття присвячена вдосконаленню математичної моделі розрахунку плану формування поїздів (ПФП) на мережі залізниць АТ «Укрзалізниця». Система організації вагонопотоків на залізничному транспорті базується на стратегічному плануванні на основі ПФП, що дозволяє підвищити ефективність використання вагонів та інфраструктури, зменшити затримки при формуванні поїздів та скоротити тривалість перевезення. Існуючі моделі не відображають певні нюанси процесу формування поїздів на сортувальних станціях в першу чергу тому, що існуючі методи розрахунку ПФП не передбачають використання таких ускладнених моделей. Таке становище фактично створює підґрунтя для наявності високого рівня епістемічної невизначеності в системі управління експлуатаційною роботою підсистеми вантажних залізничних перевезень і гальмує прогрес в цьому напрямку. Запропоноване уточнення моделі у вигляді функції змінного коефіцієнта завантаженості технічних станцій відображає реальний ефект уповільнення переробки вагонопотоків і відповідно додаткових витрат вагоно-годин у випадках, коли технічні станції працюють у навантажених режимах роботи. Для здійснення розрахунків використано автоматизований метод розрахунку ПФП, раніше розроблений одним з авторів даного дослідження, що ґрунтується на застосуванні математичного апарату генетичних алгоритмів. Порівняльний аналіз результатів розрахунків за типовою та вдосконаленою моделями показав, що врахування впливу перевантаженості станцій дозволило скоротити витрати на 405,7 вагоно-годин, або 3,5% від загальних витрат на накопичення та переформування составів. Реалізація даного підходу щодо уточнення моделі, який базується на використанні сучасного методу розрахунку ПФП, може слугувати основою для подальшого вдосконалення методів стратегічного планування перевізного процесу та мінімізації впливу факторів невизначеності. Запропоноване уточнення моделі розрахунку ПФП також представляє теоретичний інтерес як приклад застосування підходу, спрямованого на зменшення рівня невизначеності епістемічного типу в системі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту.

Ключові слова: план формування поїздів, залізничний транспорт, математична модель, генетичні алгоритми, перевантаженість станцій, епістемічна невизначеність.

L.O. Parkhomenko, V.M. Prokhorov. Refinement of the train formation plan calculation model by considering the effect of switchyard stations' workload. The article is dedicated to improving the mathematical model for calculating the freight train formation plan (TFP) on the railway network of JSC «Ukrzaliznytsia». The system of organizing freight flows in

¹ канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0003-1647-7746, parkhomenko@kart.edu.ua

² канд. техн. наук, доцент, Український державний університет залізничного транспорту, м. Харків, ORCID: 0000-0001-8963-6467, vicmmx@gmail.com

rail transport is based on strategic planning through TFP, which allows increasing the efficiency of using cars and infrastructure, reducing delays in forming trains, and reducing their transportation time. At the same time, the existing TFP calculation models have certain shortcomings, in particular, the complexity of taking into account the numerous factors that influence the process of train formation. This study proposes a refinement of the TFP mathematical model by including the dependence of wagon-hour costs on the function of the variable utilization factor of technical stations. An automated calculation method developed by one of the authors, based on the application of the mathematical apparatus of genetic algorithms, was used for the calculations. A comparative analysis of the calculation results using the standard and improved models showed that taking into account the impact of station congestion allowed reducing costs by 405.7 wagon-hours, or 3.5% of the total costs for train accumulation and reformatting. The application of the proposed refinement of the TFP model allows the railway operator to obtain more accurate and justified planning results, which will contribute to improving the efficiency of wagon flow management. In addition, the implementation of this approach can serve as the basis for further improving the methods of strategic planning of the transportation process and minimizing the impact of uncertainty factors. The proposed refinement of the TFP calculation model has not only a practical focus, but also represents a theoretical example of the application of an approach aimed at reducing the level of epistemic uncertainty in the management system of the operational work of rail transport. The systematic development and implementation of such approaches creates the basis for mitigating the negative impact of factors that represent sources of other types of uncertainty.

Key words: train formation plan, rail transport, mathematical model, genetic algorithms, switchyard station congestion, epistemic uncertainty.

Постановка проблеми. Зниження рівня невизначеності в системі управлінні експлуатаційною роботою залізничного транспорту є критично важливим для підвищення ефективності використання ресурсів, зниження операційних витрат та підвищення якості обслуговування клієнтів. Високий рівень невизначеності як алеаторного, так і епістемічного типу, притаманний транспортному процесу, створює різноманітні проблеми при плануванні перевізного процесу на всіх рівнях системи управління експлуатаційною роботою. Уточнення моделі розрахунку плану формування поїздів дозволить знизити рівень епістемічної невизначеності на стратегічному рівні, та дозволить знизити експлуатаційні витрати на рівні всієї підсистеми вантажних залізничних перевезень за рахунок більш оптимального розподілу роботи між сортувальними станціями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження в галузі управління експлуатаційною роботою залізничного транспорту протягом останніх років демонструють значну увагу до питань невизначеності і ризику та методів її зниження. Зокрема, дослідження показують, що високий рівень невизначеності істотно негативно впливає на планування та оперативне управління, викликаючи нестабільність, перепростої рухомого складу та збільшення операційних витрат [1-10]. Слід зазначити, що перевізному процесу притаманні фактори невизначеності як алеаторного типу, тобто такі, що пов'язані з випадковістю і стохастичними процесами, так і фактори невизначеності епістемічного типу, пов'язані з неповнотою або нечіткістю інформації, неточністю моделей тощо.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують необхідність та ефективність застосування методів, спрямованих на зниження рівня невизначеності при управлінні транспортними системами і зокрема при управлінні експлуатаційною роботою залізничного транспорту. Однак більшість методів, які застосовуються для вирішення проблеми зменшення рівня невизначеності в контексті задач управління транспортними процесами, відносяться до імовірнісних методів [5, 8-10], таких як, наприклад, стохастичне програмування, робастна оптимізація, байєсовські підходи.

Тобто в наукових дослідженнях превалюють підходи, спрямовані переважно на зниження рівня невизначеностей алеаторного типу. Однак не менш важливим є також розробка підходів, що спрямовані на елімінацію факторів невизначеності епістемічного типу. Одним з таких підходів є уточнення моделей. Уточнення моделей управління залізничною системою, особливо на

стратегічному рівні, – це найбільш швидкий і раціональний шлях до підвищення ефективності перевізного процесу в умовах невизначеності та обмежених ресурсів.

Мета дослідження – зменшення невикористаних простоїв вагонів та забезпечення нормального режиму роботи сортувальних станцій за рахунок уточнення моделі розрахунку плану формування вантажних одногрупних поїздів (ПФП).

Виклад основного матеріалу. ПФП – це комплексна технологічна система, що координує роботу всієї залізничної мережі. Цей план визначає призначення, склад поїздів та груп вагонів на станціях, категорії відправлених поїздів, станції їхнього розформування та розподіл вагонів, включаючи рухомий склад порожніх вагонів. При формуванні вантажних поїздів план враховує численні економічні та технічні аспекти, як-от витрати на підведення вагонів до пунктів навантаження, переробку та простої на станціях, виконання технічних і вантажних операцій, рух поїздів дільницями, утримання інфраструктури та персоналу. Кінцевою метою плану є мінімізація витрат та максимізація доходів залізничної компанії шляхом оптимізації роботи всієї мережі.

ПФП є стратегічним завданням, оскільки передбачає планування перевезень на тривалій період – зазвичай тижні або місяці наперед. При його розробці враховується багато факторів, таких як попит на перевезення, наявність рухомого складу та пропускна спроможність мережі.

Традиційні методики розрахунку оптимального ПФП застосовують критерій мінімізації сумарних вагоно-годин, витрачених на накопичення та переробку вагонів.

Проведене дослідження мало на меті встановити взаємозв'язок між рівнем завантаженості сортувальної станції та тривалістю перебування вагонів на ній. Для цього було використано фактичні дані про перебування вагонів на сортувальній станції протягом трьох місяців. Результати статистичного моделювання наведені на рисунку 1.

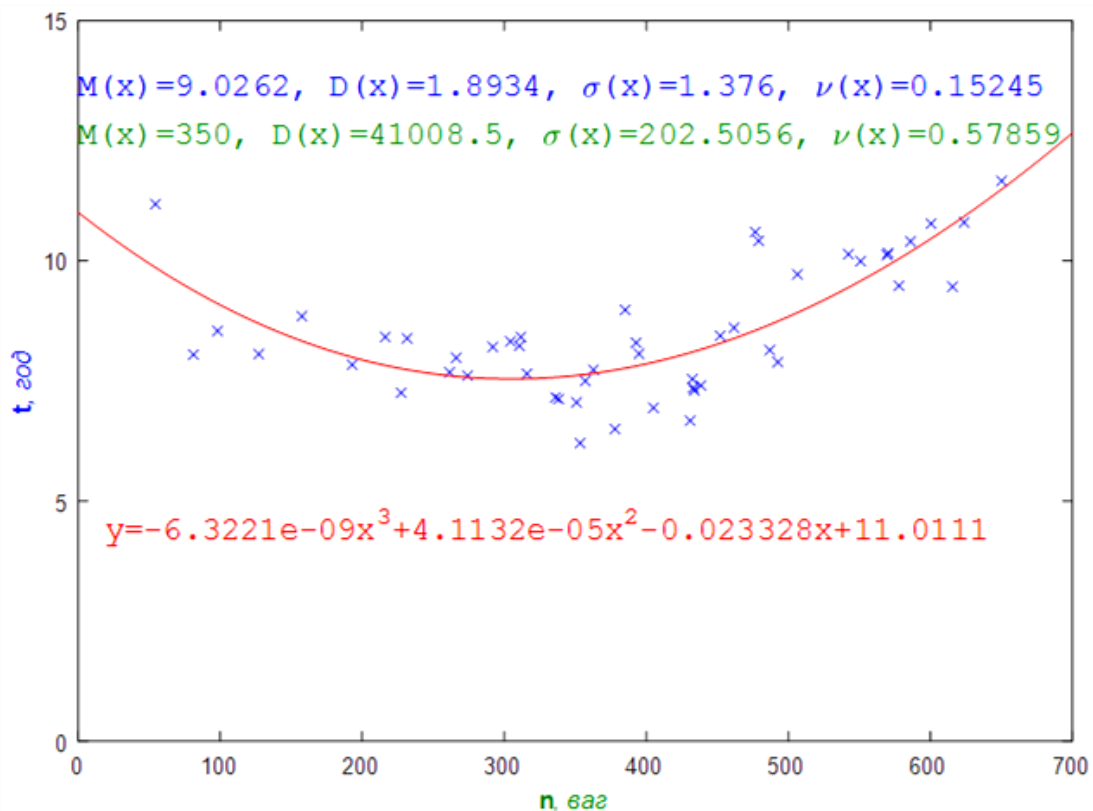


Рис.1 – Залежність середньої тривалості обробки вагона на технічній станції від розміру вагонопотоку, що надходить у переробку

Результати дослідження засвідчили, що збільшення рівня завантаженості станції призводить до зростання часу перебування вагонів на ній. Зокрема, вагони, які надходять на станцію в період її підвищеної завантаженості, в середньому затримуються там на 20% довше, порівняно з вагонами, що прибувають у періоди меншого навантаження.

Поглиблений аналіз показав, що цей ефект пояснюється збільшенням часу очікування вагонами пропуску через станцію, а також більшою тривалістю технологічних процесів перевезення та сортування вагонів в умовах підвищеної завантаженості.

На основі отриманих результатів можна зробити висновок, що взаємозв'язок між часом перебування вагонів на сортувальній станції та рівнем її завантаженості є суттєвим та потребує подальшого дослідження для підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту. Результати даного дослідження фактично підтверджують теоретичні положення про режими роботи сортувальних станцій, які можна зустріти в наукових публікаціях [11] (рис. 2).

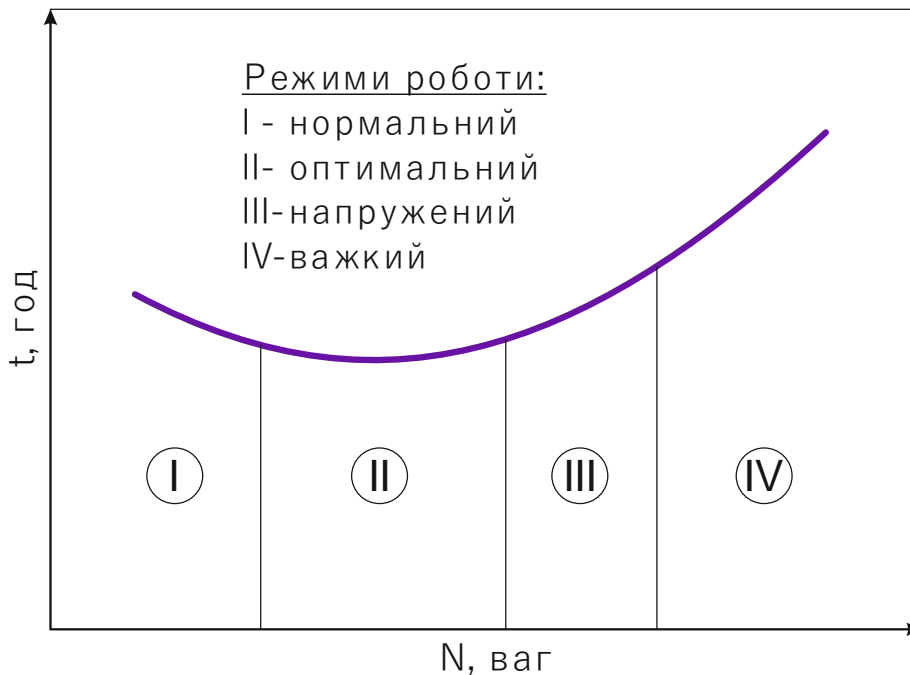


Рис. 2 – Визначення режимів роботи станції

Тривалість перебування вагонів на сортувальних станціях значною мірою визначається рівнем завантаженості цих станцій [12, 13]. Існує оптимальний обсяг навантаження, при якому ефективність роботи сортувальної станції сягає максимуму.

Як демонструє дослідження, для аналізу залежності часу перебування вагонів на сортувальній станції від її завантаженості доцільно застосовувати метод найменших квадратів. Таким чином, врахування взаємозв'язку між рівнем навантаження сортувальної станції та тривалістю знаходження вагонів на ній є важливим чинником підвищення ефективності функціонування залізничного транспорту. Використання методу найменших квадратів дозволяє отримати цінні дані для вдосконалення процесів планування та організації перевізної діяльності.

Процес формування составів – найбільш складний та трудомісткий технологічний процес на станціях. Складність обумовлена необхідністю багаторазового сортування вагонів, що виникає через обмежену кількість колій для сортування та накопичення вагонів, велику кількість груп вагонів у составі, надання «вікон» для технічного обслуговування та ремонту колій [14, 15].

Наведені міркування дозволяють зробити висновок про існування чіткої залежності між тривалістю непродуктивних простоїв вагонів на технічних, зокрема, сортувальних станціях та рівнем навантаженості цих станцій. Попри можливу складність цієї залежності в реальних умовах, навіть врахування її основних тенденцій сприятиме підвищенню адекватності математичної моделі, на якій ґрунтується процедура розрахунку плану формування поїздів. Це, своєю чергою, дозволить покращити якість ПФП та знизити витрати на організацію вантажних залізничних перевезень уже на стадії стратегічного планування.

На першому етапі доцільно виділити режим роботи станції в умовах перевантаження, оскільки більшість досліджень засвідчили факт збільшення непродуктивних простоїв вагонів при зростанні рівня завантаженості станції. При цьому слід враховувати, що такі простой можуть

виникати як на стадії переробки вагонів у підсистемі прийому, так і під час перебування вагонів у сортувальній підсистемі в процесі накопичення составів.

Теоретично, зі збільшенням обсягів вагонопотоків, що переробляються на станції, середній простій одного вагона в підсистемі накопичення має зменшуватися через прискорення цього процесу. Однак, починаючи з певного рівня завантаженості станції, цього ефекту не спостерігається. Натомість, у підсистемі розформування-формування також відбувається збільшення простоїв вагонів через невідповідність інтенсивностей вхідних та вихідних потоків. До того ж, зростання обсягу вагонопотоку, що надходять на технічну станцію згідно з поточним варіантом ПФП, може супроводжуватися збільшенням кількості призначень, на які станція формує та відправляє поїзди. Отже, підвищення рівня завантаженості станції може відбуватися за практичної відсутності або мінімального рівня ефекту прискорення формування составів та зменшення середнього часу простою вагона під накопиченням.

Ключовим питанням у даному контексті є визначення, на якій саме стадії обробки вагонів необхідно враховувати збільшення часу їх непродуктивного простою та відповідні додаткові витрати вагоно-годин. Очевидно, що ці витрати мають обліковуватись там, де вони реально виникають.

Структура витрат вагоно-годин дещо різниться при переформуванні вагонопотоків і в процесі накопичення составів у підсистемі розформування-формування. Витрати, пов'язані з перебуванням вагонів на станції внаслідок переформування відповідно до поточного варіанта плану формування поїздів, пропорційні потужності цих вагонопотоків. Натомість витрати на накопичення, хоча й можуть збільшуватись через надмірне завантаження станції, практично не залежать від потужностей потоків та загальної кількості вагонів, а лише від кількості призначень, для яких формуються состави.

Отже, необхідно враховувати додаткові витрати вагоно-годин не лише за фактом додаткової переробки потоків, а й безпосередньо в процесі накопичення. Наприклад, якщо значно збільшити потужність місцевого вагонопотоку, який не задіяний у переформуванні, а лише у формуванні составів, то згідно з класичною моделлю розрахунку ПФП величина витрат вагоно-годин не зміниться, оскільки кількість призначень на станції не змінюється. Однак на практиці таке збільшення вагонопотоку, що надходять, може спричинити перевантаження станції, що матиме негативні наслідки у вигляді зростання простоїв через збільшення часу очікування обробки.

Для відсіювання таких недопустимих варіантів ПФП, коли кількість вагонів, що надходять на станцію, перевищує її максимальну переробну спроможність, необхідно запровадити жорсткі обмеження-нерівності. Втім, більшість класичних методів розрахунку ПФП не мають механізмів реалізації таких обмежень. Крім того, може трапитися, що певний варіант плану, який незначно порушує таке обмеження, виявиться значно вигіднішим за інші, однак буде відкинутий через жорстку заборону.

Отже, необхідність врахування додаткових витрат у разі перевантаження технічних станцій є очевидною. Постає питання, який спосіб такого врахування буде найпростішим та достатньо адекватним.

Аналіз показує, що за відсутності перевантаженості станції, залежність витрат вагоно-годин від рівня її завантаженості може бути складною та неоднозначною, зумовленою численними факторами. У такому випадку недоцільно вносити зміни до існуючої моделі розрахунку плану формування поїздів. Натомість, коригування доцільно здійснювати лише стосовно режиму роботи станцій в умовах перевантаження.

Відповідно до наведених міркувань, пропонується застосувати модель, проілюстровану на рисунку 3. Ідея полягає у впровадженні коефіцієнта, що збільшує витрати вагоно-годин залежно від рівня завантаженості станції. Коли завантаження не перевищує наявної переробної спроможності, цей коефіцієнт дорівнює одиниці, тобто не відбувається збільшення витрат. Однак, якщо завантаження перевищує наявну переробну здатність станції або певний емпірично встановлений рівень, після якого починається зростання простоїв вагонів, значення коефіцієнта стає більшим за одиницю. При цьому, чим більшим є перевищення рівня завантаження над переробною спроможністю, тим більшим буде й величина цього коефіцієнта, згідно з лінійною залежністю:

$$\beta(\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \alpha \leq 1 \\ \alpha, & \text{якщо } \alpha > 1 \end{cases} \quad (1)$$

що можна також записати наступним чином:

$$\beta(\alpha) = \frac{1}{2}(|\alpha - 1| + \alpha + 1). \quad (2)$$

Графік цієї залежності наведений на рисунку 3.

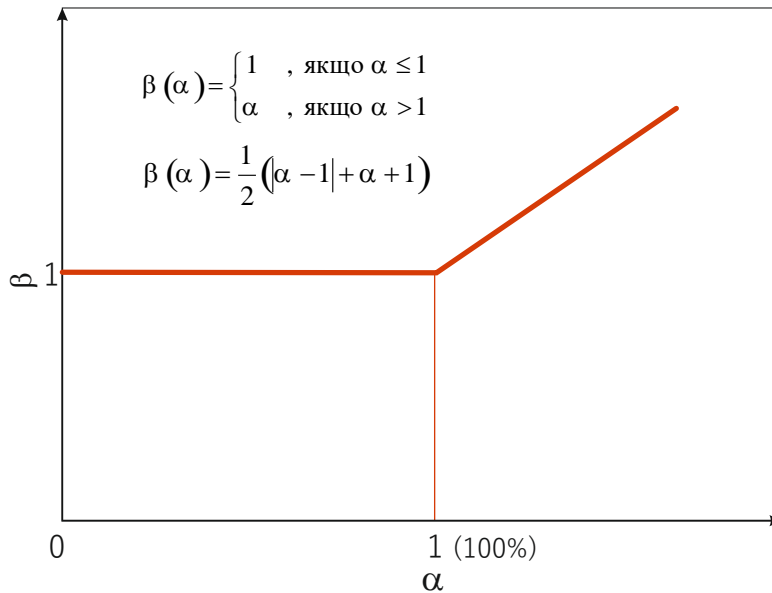


Рис. 3 – Визначення функції коефіцієнту збільшення витрат вагоно-годин

Пропоноване рішення полягає у включенні розробленої функції до складу моделі розрахунку ПФП. Для проведення розрахунків було обрано довільний залізничний полігон, схематично проілюстрований на рисунку 4. Цей рисунок демонструє параметри інфраструктури досліджуваного полігону, а саме: величини параметрів накопичення на технічних станціях (чорним кольором), час, необхідний для переробки одного вагона (не включаючи процес накопичення, позначений синім кольором), а також відстані між технічними станціями. На рисунку 5 наведена топологія і потужності розрахункових вагонопотоків на фоні графу мережі.

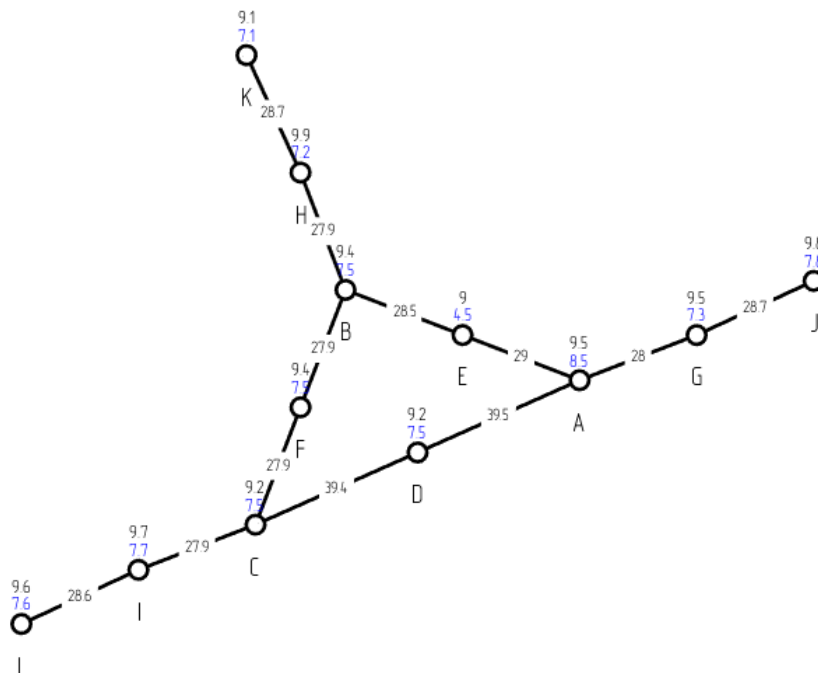


Рис. 4 – Граф залізничного полігону із позначеними параметрами інфраструктури

Отже, використання запропонованої функції в рамках моделі розрахунку ПФП дозволить адекватно врахувати вплив перевантаженості технічних станцій на зростання витрат вагоно-годин, що є важливим для оптимізації процесу формування поїздів на досліджуваному залізничному полігоні.

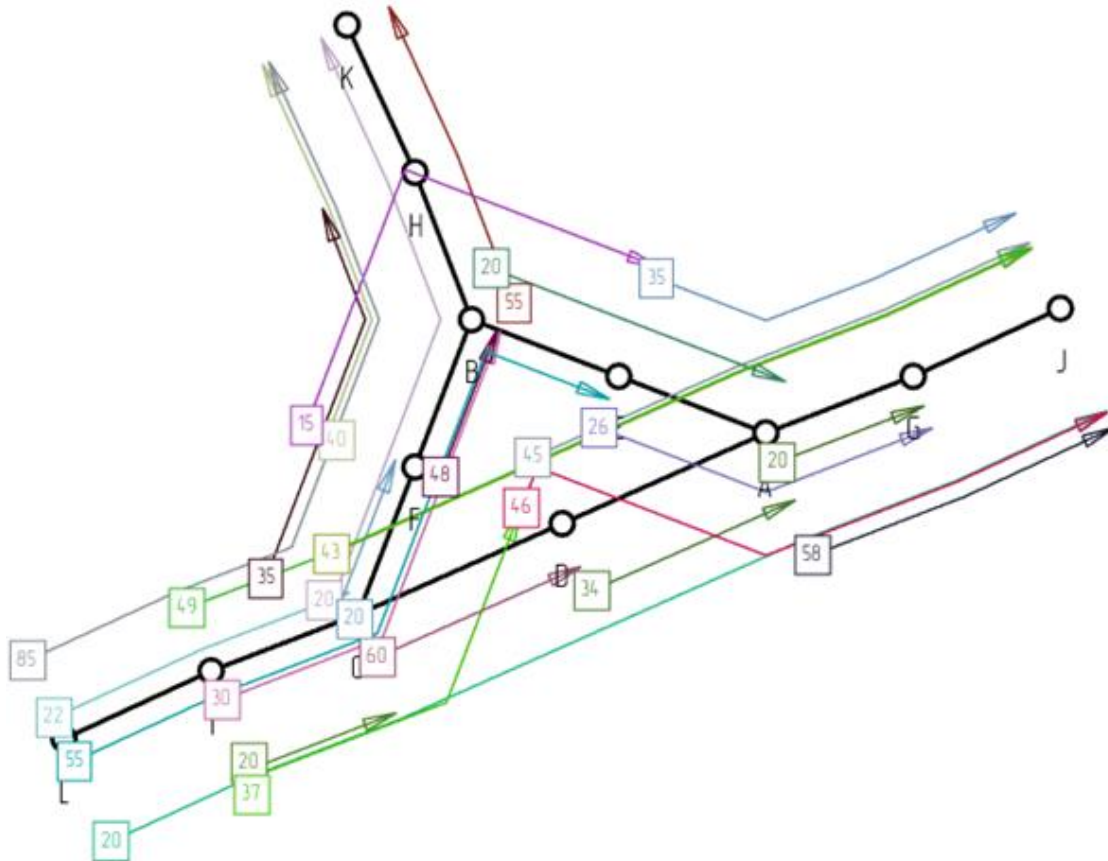


Рис. 5 – Розрахункові потужності струменів вагонопотоків

Розрахунок плану формування поїздів на основі типової моделі. Для здійснення розрахунків було обрано метод, запропонований у [16]. Цей метод був розроблений одним з авторів даного дослідження. Суттєвою перевагою даного методу є те, що він є автоматизованим і базується на застосуванні математичного апарату генетичних алгоритмів. Іншою перевагою даного методу також є те, що він є вільним від спрощень та умовностей класичних методів і дозволяє знаходити такі рішення, які за допомогою класичних методів відшукати фактично неможливо. Таким чином, фактично саме завдяки існуванню даного методу розрахунку ПФП і можливо в повній мірі як дослідити, так і використати на практиці запропоноване уточнення моделі розрахунку ПФП. До того ж даний метод дозволяє здійснювати розрахунки на полігонах, що мають розгалужену мережеву структуру, що є важливим як з теоретичної, так і з практичної точки зору. Таким чином, даний метод дозволяє отримати розрахунки з необхідною точністю, яка фактично залежить лише від обчислювальних потужностей, що використовуються. В таблиці 1 та на рисунку 6 наведено результати розрахунків ПФП за типовою моделлю. Результати цих розрахунків потрібні для їх подальшого порівняння з результатами розрахунків на основі вдосконаленої моделі.

Таблиця 1

Результати розрахунку ПФП на основі типової моделі

№	Струмені у складі напрямів	Початкова станція	Кінцева станція	маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, що переробляються на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона на кінцевій станції маршруту	Витрати на переформування	Витрати на накопичення	В тому числі додаткові витрати на переформування внаслідок перевантаження станції
1	EG,AG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	DJ,EJ, AJ	A	J	A,G,J	138	138	0	9.5	7.8	0	522.5	0
3	FE,BA	B	E	B,E	35	15	20	9.4	4.5	90	517	0
4	CK,FK, BK	B	K	B,H,K	115	115	0	9.4	7.1	0	517	0
5	CD	C	D	C,D	60	60	0	9.2	7.5	0	506	0
6	IB,CK, IF,CF	C	F	C,F	107	57	50	9.2	7.5	375	506	0
7	CH	C	H	C,F,B, H	35	35	0	9.2	7.2	0	506	0
8	LJ,CJ,IJ	C	J	C,D,A, G,J	112	112	0	9.2	7.8	0	506	0
9	DJ,DA	D	A	D,A	79	34	45	9.2	8.5	382.5	506	0
10	EJ,EG, BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	518.5	495	8.64
11	IB,CK, FK, FE,FB	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	562.5	517	140.63
12	FJ	F	J	F,B,E, A,G,J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	0
13	IB,IC, IF,IJ	I	C	I,C	136	20	116	9.7	7.5	870	533.5	571.71
14	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	0
15	LE	L	E	L,I,C, F,B,E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	0
16	LK	L	K	L,I,C, F,B,H, K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	0
	Всього									2948.5	8255.5	720.98
	Значення цільової функції										11204	
	Значення цільової функції, після урахування додаткових витрат, пов'язаних з перевантаженням станцій										11924.98	

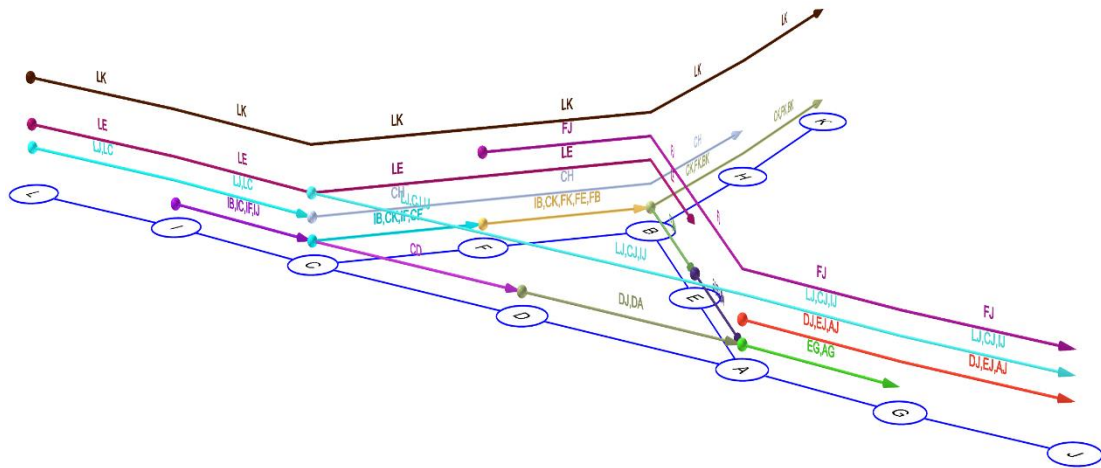


Рис. 6 – Тривимірна інтерпретація отриманого варіанту ПФП на основі типової моделі

Розрахунок плану формування поїздів із урахуванням ефекту збільшення витрат вагоно-годин. Виконання розрахунків з урахуванням функції (2) дає можливість отримати оновлені дані, які відображають вплив запропонованої функції змінного коефіцієнта, що враховує вплив перевантаженості технічних станцій на витрати вагоно-годин. Ці результати можуть бути використані для подальшого аналізу та вдосконалення моделі ПФП.

Результати розрахунків наведені на рис. 7 та в таблиці 2.

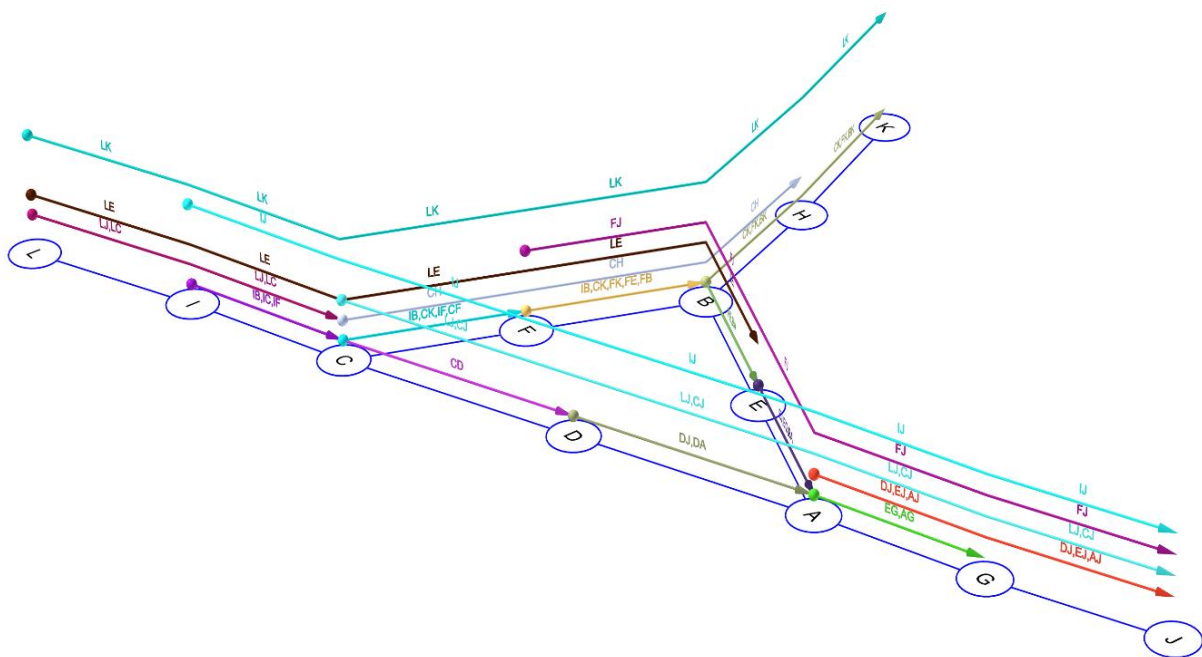


Рис. 7 – Тривимірна інтерпретація отриманого варіанту ПФП

Таблиця 2

Результати розрахунку ПФП із урахуванням ефекту перевантаження станцій

№	Струмені у складі напрямів	Початкова станція	Кінцева станція	маршрут	Потужність призначення	Кількість вагонів, для яких маршрут є кінцевим	Кількість вагонів, що переробляються на кінцевій станції	Параметр накопичення призначення	Витрати часу на переробку одного вагона на кінцевій станції маршруту	Витрати на переформування	Витрати на накопичення	В тому числі додаткові витрати на переформування внаслідок перевантаження станції
1	EG, AG	A	G	A,G	46	46	0	9.5	7.3	0	522.5	0
2	DJ,EJ,AJ	A	J	A,G,J	138	138	0	9.5	7.8	0	522.5	0
3	FE,BA	B	E	B,E	35	15	20	9.4	4.5	90	517	0
4	CK,FK, BK	B	K	B,H,K	115	115	0	9.4	7.1	0	517	0
5	CD	C	D	C,D	60	60	0	9.2	7.5	0	506	0
6	IB,CK, IF,CF	C	F	C,F	107	57	50	9.2	7.5	375	506	0
7	CH	C	H	C,F,B,H	35	35	0	9.2	7.2	0	506	0
8	LJ,CJ	C	J	C,D,A,G,J	63	63	0	9.2	7.8	0	506	0
9	DJ,DA	D	A	D,A	79	34	45	9.2	8.5	382.5	506	0
10	EJ,EG, BA	E	A	E,A	81	20	61	9	8.5	527.14	495	8.64
11	IB,CK, FK,FE, FB	F	B	F,B	153	78	75	9.4	7.5	703.13	517	140.63
12	FJ	F	J	F,B,E,A,G, J	46	46	0	9.4	7.8	0	517	0
13	IB,IC,IF	I	C	I,C	87	20	67	9.7	7.5	502.5	533.5	0
14	IJ	I	J	I,C,D,A,G,J	49	49	0	9.7	7.8	0	533.5	0
15	LJ,LC	L	C	L,I,C	42	22	20	9.6	7.5	150	528	0
16	LE	L	E	L,I,C,F,B,E	55	55	0	9.6	4.5	0	528	0
17	LK	L	K	L,I,C,F,B, H,K	85	85	0	9.6	7.1	0	528	0
Всього										2730.27	8789	149.27
Значення цільової функції											11519.27	
Сумарні витрати вагоно-годин згідно до варіанту ПФП, отриманого без урахування додаткових витрат, пов'язаних з перевантаженням станції, після їх урахування											11924.98	
Економія вагоно-годин											405.714	
Економія %											3.522	

Отже, згідно до отриманих результатів сумарна кількість вагоно-годин, що відповідає отриманому варіанту плану, без урахування впливу перевантаженості станцій на величину невиробничого простою вагонів, становить 11204 вагоно-години. Однак, після врахування цього фактора, загальні вагоно-години за даним варіантом плану зростають до 11924,98. Натомість, варіант плану, розрахований із безпосереднім урахуванням впливу перевантаження станцій на невиробничий простій вагонів, має показник цільової функції 11519,27 вагоно-годин.

Таким чином, врахування впливу перевантаження станцій дозволило скоротити витрати на 405,71 вагоно-годин, що становить 3,5% від загальних витрат на накопичення та переформування составів.

Відповідно, включення запропонованої функції до моделі розрахунку ПФП підвищило адекватність моделі та сприяло оптимізації плану формування поїздів.

Висновки

Система організації вагонопотоків на мережі АТ «Укрзалізниця» ґрунтується на стратегічному плануванні у вигляді ПФП.

ПФП дозволяє підвищити ефективність використання вагонів та залізничної інфраструктури, зменшити затримки при формуванні поїздів та скоротити час їх перевезення. Застосування сучасних методів планування сприяє зниженню витрат на перевезення, зростанню продуктивності та якості послуг.

Водночас існуючі моделі розрахунку ПФП мають свої недоліки, зокрема складність врахування численних факторів, що впливають на процес формування поїздів, таких як технічний стан вагонів, зміна ринкових потреб та планування маршрутів. Тому необхідно постійно вдосконалювати методи планування та застосовувати сучасні технології й аналітичні інструменти.

Одним із напрямків удосконалення технології стратегічного планування роботи залізничного транспорту на основі плану формування поїздів є уточнення математичної моделі, що лежить в основі цієї процедури.

Запропоновано включити до моделі розрахунку плану формування поїздів залежність витрат вагоно-годин при переробці вагонопотоків від функції змінного коефіцієнта завантаженості станцій, визначивши її за допомогою шматочно-лінійної функції.

Запропонований підхід до удосконалення системи стратегічного планування шляхом зниження рівня епістемічної невизначеності є можливим лише завдяки існуванню сучасного методу розрахунку ПФП, який був розроблений у [16].

Порівняльні розрахунки з використанням уточненої моделі на основі розробленого методу виконані одним з авторів даного дослідження автоматизованим методом, що базується на використанні математичного апарату генетичних алгоритмів, показали, що врахування впливу перевантаженості станцій дозволило підвищити адекватність моделі та скоротити витрати на 405,7 вагоно-годин (3,5% від загальних).

Таким чином, запропоноване уточнення моделі розрахунку плану формування вантажних поїздів фактично має не лише суто практичну спрямованість, але з теоретичної точки зору представляє собою приклад застосування підходу, спрямованого на зменшення рівня невизначеності епістемічного типу в системі управління експлуатаційною роботою залізничної транспортної системи. Системна розробка і застосування таких підходів дозволить створити підґрунтя для нівелювання негативного впливу факторів, що представляють джерела й інших типів невизначеності.

Перелік використаних джерел:

1. Управління вантажними перевезеннями в умовах ризиків конкурентного середовища / Бех П. В., Нестеренко Г. І., Стрелко О. Г., Музикін М. І. *Системи та технології*. 2021. № 1 (61). С. 85-97. DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2021-1-61.7>.
2. Handling uncertainty in train timetable rescheduling: A review of the literature and future research directions / S. Zhan et al. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 183. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103429>.
3. Govindan K., Fattahi M., Keyvanshokoh E. Supply chain network design under uncertainty: a comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*. 2017. Vol. 263(1). Pp. 108-141. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009>.
4. Aghezzaf E. Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands. *Journal of the Operational Research Society*. 2005. Vol. 56(4). Pp. 453-462. DOI: <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601834>.
5. Akbari A. A., Karimi B. A new robust optimization approach for integrated multiechelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015. Vol. 79(1). Pp. 229-244. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-6796-9>.
6. Bidhandi H. M., Yusuff R. M. Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach. *Applied Mathematical Modelling*. 2011. Vol. 35(6). Pp. 2618-2630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2010.11.042>.

7. Eco-driving in railway lines considering the uncertainty associated with climatological conditions / Blanco-Castillo M., Fernández A., Fernández A., Cucala A. P. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(14). Pp. 1-26. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14148645>.
8. Gao Y., Yang L., Li S. Uncertain Models on Railway Transportation Planning Problem. *Applied Mathematical Modelling*. 2015. Vol. 40. Iss. 7-8. Pp. 4921-4934. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.12.016>.
9. Haehn R., Abraham E., Nießen N. Probabilistic Simulation of a Railway Timetable. *20th Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems ATMOS 2020* : Pisa, Italy, 7-8 September 2020. Vol. 85. Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.4230/OA-SIcs.ATMOS.2020.16>.
10. Corman F., Kaceman P. Stochastic prediction of train delays in real-time using Bayesian networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018. Vol. 95. Pp. 599-615. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.013>.
11. Гайсинський О. Є. Математична модель дослідження динаміки руху вагонів на сортувальній станції. *Наукові праці Державного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2015. Вип. 165. С. 73-78.
12. Li H., Jin M., He S. Sequencing and scheduling in railway classification yards. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2015. № 2475. С. 72-80. DOI: <https://doi.org/10.3141/2475-09>.
13. Козаченко Д. М., Вернигора Р. В., Горбова О. В. Методи збору даних про функціонування залізничних станцій. *Транспортні системи та технології перевезень* : зб. наук. пр. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ. 2014. Вип. 8. С. 58-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2014/38087>.
14. Музикіна С. І., Музикін М. І., Нестеренко Г. І. Дослідження пропускнуої спроможності сортувальної станції. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2016. Вип. 2. С. 47-60. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/67289>.
15. Музикіна Г. І., Болвановська Т. В., Жорова Є. М. Вплив параметрів накопичення вагонів на їх простій на сортувальній станції. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. академіка В. Лазаряна*. 2008. Вип. 20. С. 198-201.
16. Butko T., Prokhorov V., Chekhunov D. Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2017. Vol. 85. No. 3. Pt. 1. Pp. 55-61. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276>.

References:

1. P.V. Bekh, H.I. Nesterenko, O.H. Strelko, and M.I. Muzykin, «Upravlinnia vantazhnyh perevezenniamy v umovakh ryzykiv konkurentnoho seredovyscha» [«Freight management in the conditions of risks of the competitive environment»], *Systemy ta tekhnologii – Systems and Technologies*, № 1 (61), pp. 85-97, 2021. doi: **10.32836/2521-6643-2021-1-61.7**. (Ukr.)
2. S. Zhan, J. Xie, S.C. Wong, Y. Zhu, and F. Corman, «Handling uncertainty in train timetable re-scheduling: A review of the literature and future research directions», *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 183, pp. 1-24, 2024. doi: **10.1016/j.tre.2024.103429**.
3. K. Govindan, M. Fattahi, and E. Keyvanshokoo, «Supply chain network design under uncertainty: a comprehensive review and future research directions», *European Journal of Operational Research*, vol. 263(1), pp. 108-141, 2017. doi: **10.1016/j.ejor.2017.04.009**.
4. E. Aghezaf, «Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands», *Journal of the Operational Research Society*, vol. 56(4), pp. 453-462, 2005. doi: **10.1057/palgrave.jors.2601834**.
5. A.A. Akbari, and B. Karimi, «A new robust optimization approach for integrated multiechelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 79(1), pp. 229-244, 2015. doi: **10.1007/s00170-015-6796-9**.
6. H.M. Bidhandi, and R.M. Yusuff, «Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach», *Applied Mathematical Modelling*, vol. 35(6), pp. 2618-2630, 2011. doi: **10.1016/j.apm.2010.11.042**.

7. M. Blanco-Castillo, A. Fernández, A. Fernández, and A.P. Cucala, «Eco-driving in railway lines considering the uncertainty associated with climatological conditions», *Sustainability*, vol. 14(14), pp. 1-26, 2022. doi: [10.3390/su14148645](https://doi.org/10.3390/su14148645).
8. Y. Gao, L. Yang, and S. Li, «Uncertain Models on Railway Transportation Planning Problem», *Applied Mathematical Modelling*, vol. 40, iss. 7-8, pp. 4921-4934, 2015. doi: [10.1016/j.apm.2015.12.016](https://doi.org/10.1016/j.apm.2015.12.016).
9. R. Haehn, E. Abraham, and N. Nießen, «Probabilistic Simulation of a Railway Timetable», in *20th Symposium on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems ATMOS 2020*, Pisa, Italy, 2020, vol. 85, pp. 1-14. doi: [10.4230/OASIS.ATMOS.2020.16](https://doi.org/10.4230/OASIS.ATMOS.2020.16).
10. F. Corman, and P. Kecman, «Stochastic prediction of train delays in real-time using Bayesian networks», *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 95, pp. 599-615, 2018. doi: [10.1016/j.trc.2018.07.013](https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.07.013).
11. O.Ye. Haisynskyi, «Matematychna model doslidzhennia dynamiky rukhu vahoniv na sortuvalnii stantsii» [«Mathematical model of the study of the dynamics of the movement of wagons at the sorting station»], *Naukovi pratsi Derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, vol. 165, pp. 73-78, 2015. (Ukr.)
12. H. Li, M. Jin, and S. He, «Sequencing and Scheduling in Railway Classification Yards», *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, № 2475, pp. 72-80, 2015. doi: [10.3141/2475-09](https://doi.org/10.3141/2475-09).
13. D.M. Kozachenko, R.V. Vernyhora, and O.V. Horbova, «Metody zboru danykh pro funktsionuvannia zaliznychnykh stantsii» [«Methods of data collection on the functioning of the railway stations»], *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezen – Transport systems and transportation technologies*, vol. 8, pp. 58-64, 2014. doi: [10.15802/tstt2014/38087](https://doi.org/10.15802/tstt2014/38087).
14. S.I. Muzykina, M.I. Muzykin, and H.I. Nesterenko, «Doslidzhennia propusknoi spromozhnosti sortuvalnoi stantsii» [«Study of working capacity of the marshalling yard»], *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress*, vol. 2, pp. 47-60, 2016. doi: [10.15802/stp2016/67289](https://doi.org/10.15802/stp2016/67289).
15. H.I. Muzykina, T.V. Bolvanovska, and Ye.M. Zhorova, «Vplyv parametriv nakopychennia vahoniv na yikh prostii na sortuvalnii stantsii» [«The influence of the parameters of the accumulation of wagons on their ease at the sorting station»], *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu im. aka-demika V. Lazariana – Bulletin of the Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, vol. 20, pp. 198-201, 2008.
16. T. Butko, V. Prokhorov, and D. Chekhunov, «Devising a method for the automated calculation of train formation plan by employing genetic algorithms», *Eastern-European journal of enterprise technologies*, vol. 85, no. 3, pt. 1, pp. 55-61, 2017. doi: [10.15587/1729-4061.2017.93276](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.93276).

Стаття надійшла 08.02.2024

Стаття прийнята 13.03.2024

UDC 629:123.066

doi: [10.31498/2225-6733.48.2024.310713](https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024.310713)

© Yanenko A.*

INTELLIGENT SYSTEM FOR MONITORING THE OPERATIONAL PROPERTIES OF SHIP POWER EQUIPMENT

The peculiarity of monitoring the technical condition of ship vehicles is that during the service life the main energetic installation is not changed, but its continuous maintenance and periodic repairs are carried out. In the organization of such activities, the leading role

* postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson-Odesa, ORCID: 0009-0004-7992-8369, yanenko9494@gmail.com

belongs to technical diagnostics, which allows you to determine the technical condition of the material, as well as predict possible changes for a certain period. Intelligent system of monitoring of operational properties of ship power equipment with Markov circuits, probabilistic dynamics elements, calculations on probabilistic models, multi-criteria optimization of diagnostic parameters, simulation and scenario generation is proposed. In detail, the content of the main structural units of the system for monitoring the operational properties of ship power equipment is considered. The input information was a generalization of experience in the operation of vehicles. The stages of construction of Markov circuits are described in relation to diagnostics of turbochargers, the feature of which is a replacement of discrete time by a continuous sequence of states. Considered by a separate unit of calculation on probabilistic models on the basis of spectra of vibration signals by combining their main discrete features and establishing new diagnostic parameters. The visualization of relationships consists in the construction of digraphs of interactions of the main structural elements of the SES taking into account probabilistic models. Multi-criteria optimization in the presented system is considered from the standpoint of statistical criteria and their convolution. Simulation and generation of basic scenarios is described, from the point of view, the conversion of analog data about workflows to digital form. Provided information support and tools of the system for monitoring the operational properties of ship power equipment.

Key words: monitoring, technical operation, ship vehicles, intelligent systems, diagnostics, failure, risks, uncertainty.

Яненко А.В. Інтелектуальна система моніторингу експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання. *Особливість моніторингу технічного стану суднових транспортних засобів складається у тому, що протягом терміну служби головну енергетичну установку не змінюють, а здійснюють її неперервне технічне обслуговування та періодичні ремонти. В організації таких заходів провідна роль належить технічному діагностуванню, що дозволяє визначити технічний стан матеріалу, а також прогнозувати можливі зміни на певний період. Запропоновано інтелектуальну систему моніторингу експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання за допомогою ланцюгів Маркова, елементів ймовірнісної динаміки, розрахунків по ймовірнісним моделям, багатокритеріальної оптимізації діагностичних параметрів, симуляції та генерації сценаріїв. Докладно розглянуто змістовий сенс основних структурних блоків системи моніторингу експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання. Вхідною інформацією було узагальнення досвіду експлуатації транспортних засобів. Описуються етапи побудови ланцюгів Маркова стосовно діагностики турбонагнітачів, особливістю яких є заміна дискретного часу безперервною послідовністю станів. Розглянуто окремим блоком обчислення за ймовірнісними моделями на основі спектрів вібраційних сигналів шляхом поєднання їх основних дискретних ознак та встановлення нових діагностичних параметрів. Візуалізація зв'язків полягає у побудові орграфів взаємодій основних структурних елементів суднової енергетичної установки з урахуванням ймовірнісних моделей. Багатокритеріальна оптимізація у представленій системі розглядається з позицій статистичних критеріїв та їх згорток. Симуляція та генерація основних сценаріїв описана з точки зору перетворення аналогових даних про робочі процеси у цифрову форму. Надано інформаційну підтримку та інструментарій системи моніторингу експлуатаційних властивостей суднового енергетичного обладнання.*

Ключові слова: моніторинг, технічна експлуатація, суднові транспортні засоби, інтелектуальні системи, діагностика, відмова, ризику, невизначеність.

Description of the problem.

Introduction. The intensity of use of ship vehicles, violation of operating rules, cyclic sign-shifting loads and various manifestations of the external environment, which cannot be taken into account, lead to a decrease in the accuracy of determining the current state of the material. Regular and peak

loads that affect the material of vehicles during their operation cause changes in structure and affect the strength of the material. In addition, the shortcomings of existing complexes are due to the fact that they reveal an already formed defect ignoring the moment of its origin. They are associated with equipment stops for repair and preventive work, the need to take into account a large number of different indicators, low quality of predictive assessments and low diagnostic performance. Based on this, an important issue of operation and maintenance of vehicles is the creation of models, methods and diagnostics based on new information parameters of identification and prediction of diagnostic objects. The practical direction of such works is to change the inter-repair cycle for diagnostics of ship's power equipment elements by moving from works on regulations to works on the actual condition of equipment.

There is an aging of the marine fleet. The youngest vessels are bulk carriers with an average age of 11.1 years, followed by container ships with an average age of 13.7 years, then oil tankers with an average age of 19.7 years. This is explained by the fact that it is quite difficult to determine the ways that technological development can take, which fuels will be most effective, how the standards for carbon emissions will change. Therefore, the tendency to operate older ships continues. There is a need to create intelligent technical diagnostic systems that combine expert and experimental information with probabilistic forecasting dynamics. This optimization of the monitoring process allows to increase the reliability and reliability of the equipment.

Setting the problem. Any deviation of material properties from the set value provided by the technical documentation is a defect. Disadvantages of materials performance monitoring systems are:

- static;
- large amounts of various operational information;
- limitations in the time and space covered by the solution;
- lack of systemicity in the analysis of information;
- subjectivism of expert assessments;
- unreasonable timing of scheduled works;
- low diagnostic performance;
- scanning and surface preparation for inspection.

The fight against these shortcomings can be carried out through measurements, the creation of identification and modeling techniques, software and mathematical support. There is a need to improve equipment, optimize processes and technologies, ensure timely diagnostics and reliability of equipment condition prediction.

Analysis of latest research and publications. The basis for making decisions on the possibility of further operation of the equipment is the results of the assessment of the residual resource [1-3]. The residual resource is the total operating time of the object from monitoring its technical condition to the limit state. In this sense, the marginal state of the equipment is understood as the state in which further operation of the equipment is impractical [4-6]. If the technical regulations do not set standards for assessing compliance with the requirements to the device, it is subject to expert evaluation. If the number of load cycles exceeds, the calculation of the residual resource of the equipment is included in the industrial safety examination [7-8]. When the technical documentation of the equipment is established by the standard uptime, it can be continued by calculating the residual resource [9-10]. The residual resource is established on the basis of technical diagnostics according to the program, including examination of the technical condition of vehicles, examination of mechanical properties, microstructure and chemical composition, prediction and evaluation of structural elements, analysis of results, issuance of conclusions [11-13].

Prospective work on uncertainty assessments in diagnostic systems is reflected in [14-17]. Elements of construction of intelligent systems of technical diagnostics using Markov circuits and probability dynamics of failures are reflected in works [18-19]. Frequency-time failure of bearing service life is given in [20]. In [21] vibration characteristics are considered and classification of defects is given on the basis of which the use of specific methods of vibration analysis is justified. Based on the generalization of experience in the operation of elements of ship vehicles, a system of technical operation of ship vehicles has been developed [22]. An overview of the cited sources indicates an unabated interest in the problem of intellectualization of monitoring the operational properties of structures during their operation, which excludes or at least reduces the subjectivism of technical condition assessments.

The purpose of the work is to build an intelligent system for monitoring the operational properties of ship power equipment taking into account the specific features of its operation.

The objectives of the study are:

- formulation of ways to improve monitoring and technical diagnostics of ship's power equipment elements;
- establishment of internal combustion engine and turbocharger failure statistics;
- detection of failure causes.

Summary of the main material (research methods, problem solving to achieve the goal).

Parameters of diagnostics of turbochargers were used as research materials: housing, compressor, turbine, seals, rotor, bearings, oil pumps, as well as probabilistic estimates of their failures, obtained on the basis of a large statistical material. Markov circuits and elements of probabilistic dynamics, calculation by probabilistic models, multi-criteria optimization of diagnostic parameters, simulation and scenario generation were used as research methods. Estimates of residual resource in the absence of information about peak and extreme loads on equipment during inter-repair cycles during the operation of products are tested with the use of a number of limitations and limitations of estimates caused by dynamic changes in the environment and stochasticity of processes, that is, there is a risk situation.

There is no single definition of risk and uncertainty. There is only general terminology that is interpreted depending on the specific situation. The word risk, according to the established terminology, has such an interpretation as an effect on luck in the hope of a happy occasion, possible danger, unpredictability of results. Any risk is characterized by an alternative event. The main difference between risk and uncertainty is whether the quantitative probabilities of the occurrence of certain events are known or not.

Uncertainty is not generated by the completeness of information, the chance of the manifestation of external unstable connections, the result of the intersection of independent processes and events. The risk is directly related to decision-making. The notions of uncertainty are ambiguous, while risk has a quantitative dimension. In this case, you should first identify the risks, and then take a number of precautions to reduce or eliminate them.

Risk assessment methods are built taking into account the use of the scenario and the development of negative, in particular, emergency situations, the theory of fuzzy sets and expert assessments, the causal relationships of the occurrence and development of extreme situations.

Understanding the nature of risk and identifying it is related to the probability of danger. On the other hand, risk is a potential opportunity for profitability. Risk is a necessary attribute of transport technologies. The main difficulty in modeling risk situations is to build models adequate to the real situation. If there are in reality several states of the external environment and specific internal conditions of transportation, they correspond to different target functions. This, in turn, determines various alternatives to management. If none of the alternatives dominate the others, a multi-criteria optimization problem arises. Synthesis of multi-criteria optimization ideas is based on probabilistic estimates of results and search for solutions in which the values of target functions are equally acceptable for both suppliers and sea carriers.

Technical diagnostics covers the field of knowledge, including the theory, methods and means of identifying the state of objects. Technical diagnostics are performed during scheduled shutdowns of technical devices and equipment. Visual inspection, hydraulic tests, flaw detection methods, process and mechanical tests are used to identify the condition of the elements of the ship's equipment. Visual inspection and hydraulic tests are used to ascertain the causes of damage. Flaw detection is carried out on board the vessel, and during repair.

Modern systems of technical diagnostics, which use transport in practice, refer to complex objects, characterized by their single use by high risk and uncertainty, due to strong environmental impact, therefore, a whole set of measurements is used to improve the reliability and reliability of the leads.

Diagnostic methods allow to detect gradual failures of technological equipment, determine wear and residual resource, monitor changes in the conditions of controlled objects during inter-repair cycles. And at the same time, the diagnostic system allows you to determine only the information taken from sensors, actuators, controllers. The construction of diagnostic systems that allow to carry out a comprehensive technology for monitoring failures during the technical operation and maintenance of ship vehicles, providing prompt, as objective as possible information about the diagnostic object, is an important scientific and technical task.

Main results and their discussion.

Mathematical models describing the monitoring of technical condition should describe in detail the internal and external characteristics of the processes of interaction between operational and information factors.

Conceptual model of intelligent system for monitoring operational properties of ship power equipment in the form of separate structural units is proposed (Fig. 1).

The content of each of the blocks of this scheme is considered in detail.

Performance of diagnostic works in transport is determined by technical specifications and standards. The initial unit of the presented intelligent system (Fig. 1) is associated with the analysis of input information, technical and design documentation, determination of diagnostic intervals according to the regulations.

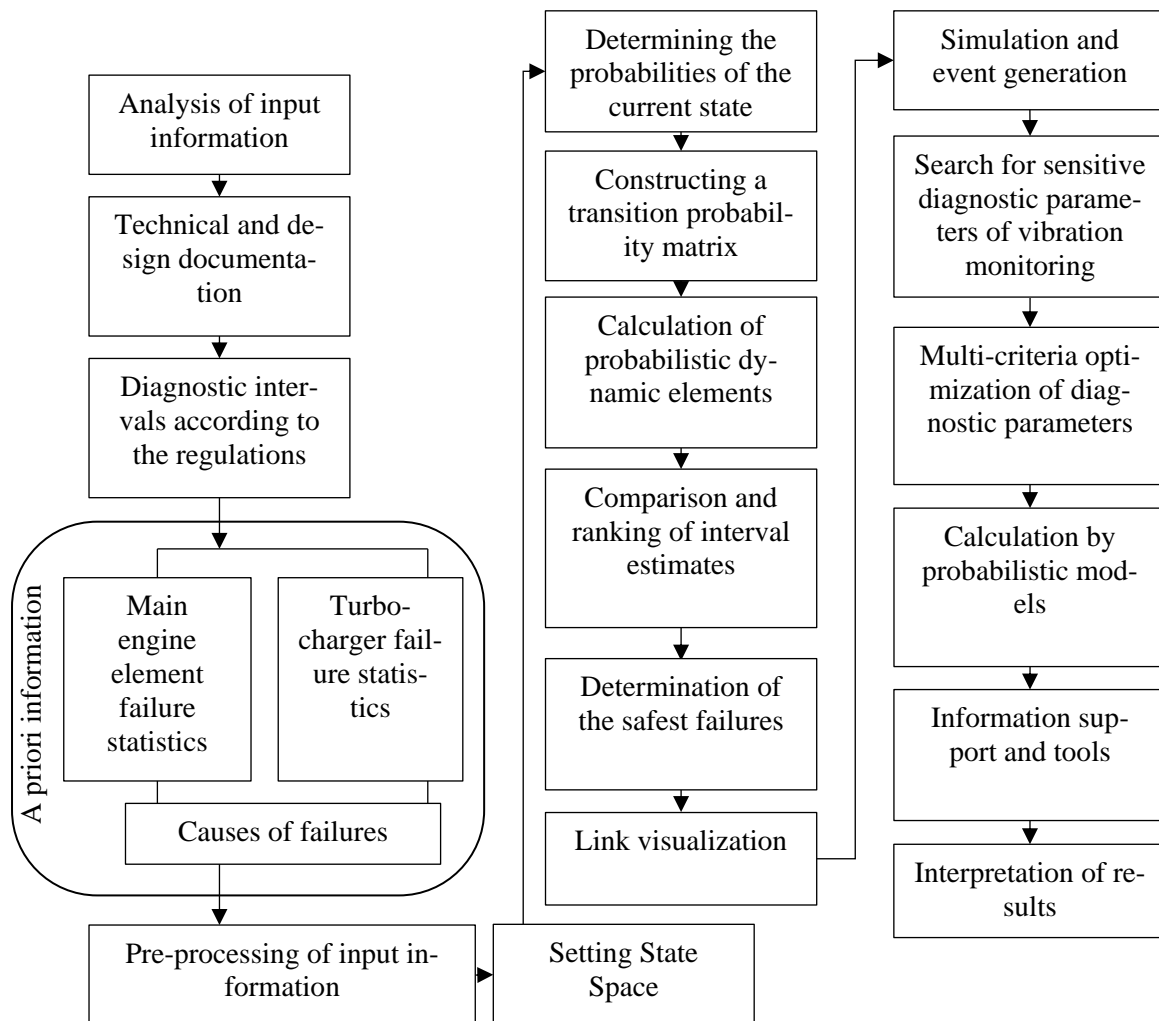


Fig. 1 – Intelligent system for monitoring the operational properties of marine vehicles

Efficiency of performance monitoring is determined by the possibility of transfer of diagnostic works according to the regulations with equipment shutdown to their current state (Fig. 2).

If the condition of the diagnostic object is characterized by the absence of a defect, diagnostics should be carried out with the equipment stopped, in accordance with the requirements of the regulations (Fig. 2a). In case of defect detection, go to state monitoring and perform diagnostics depending on the predicted approach to the state of failure (Fig. 2b).

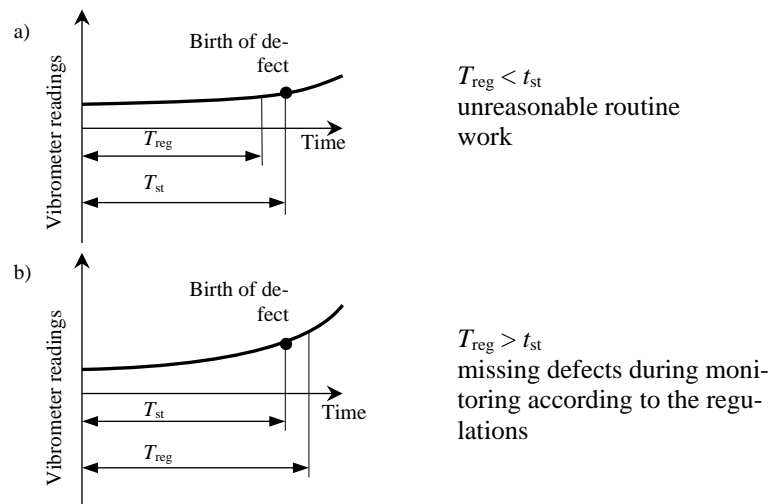


Fig. 2 – Comparative assessment of monitoring effectiveness by regulation and status

Monitoring efficiency can be determined due to the ratio of periodicity of routine works t_{reg} to determination of their need according to the state of t_{st} according to the formula

$$E = \frac{t_{reg} - t_{st}}{t_{reg}} \quad (1)$$

These methods require a priori knowledge of past situations and operating parameters. The next basic unit of the presented intelligent system for monitoring the operational properties of the ship's power equipment is extensive a priori information on the statistics of failures of the main engine and the installation turbochargers during their operation.

As the experience of operating marine vessels shows, the main task of technical diagnostics is to determine the technical condition of the main engines and elements of power plants.

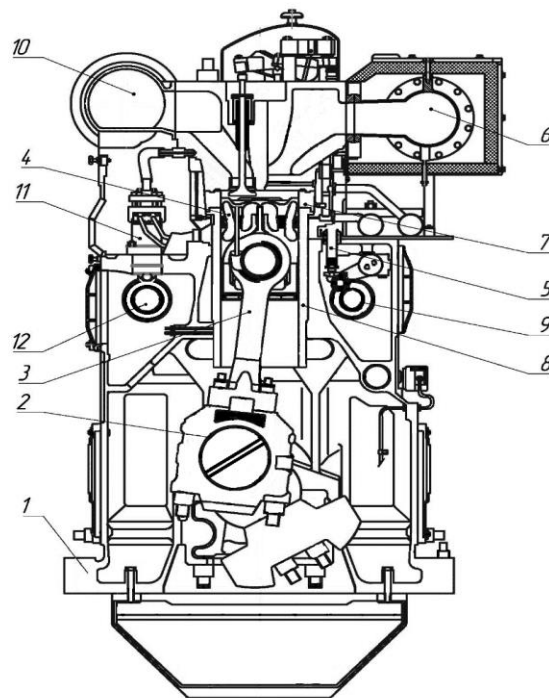


Fig. 3 – Engine cross section MAN B&W L32/40

Marine vehicles include diesel power plants, which include the main engine frame – 1, crankshaft – 2, connecting rod – 3, piston – 4, gas distribution mechanism – 5, exhaust manifold – 6, cooling jacket

– 7, cylinder liner – 8, camshaft – 9, exhaust manifold – 10, high-pressure fuel pump – 11, fuel camshaft – 12 (Fig. 3). In addition, the power plant includes turbochargers, shaft lines, diesel generators, recycling and auxiliary boilers, mechanisms and devices.

Table 1 shows the relative failure rate of the marine internal combustion engine elements.

Table 1

Statistics of the relative failure rate of elements of marine internal combustion engines

<i>№</i>	<i>Unit</i>	<i>Relative failure rate</i>
1	Cylinder liner	0,042
2	Cylinder head	0,017
3	Valve mechanism	0,072
4	Gas distribution mechanism drive	0,032
5	Fuel pump	0,090
6	Nozzle	0,105
7	Fuel injector valve	0,054
8	Turbocharger	0,096
9	High pressure pipeline	0,096
10	Crank and connecting rod mechanism	0,021
11	Cranked the bearings	0,014
12	Air distributor	0,121
13	Hinged mechanisms	0,240

These data confirm the need for the introduction of new technical diagnostics.

The turbocharger is the most loaded unit of the engine, which operates under conditions of high temperature differences and dynamic loads, so any deviations of the engine characteristics affect the operation of the turbine and can lead to failure. Turbocharger – indicator of engine condition. The main task of using turbochargers on internal combustion engines is to increase power when reducing specific fuel consumption, as well as reduce the toxicity of exhaust gases.

Ship turbochargers include: gas-admission casing – 1, turbine nozzle ring – 2, turbine wheel – 3, insert – 4, gas outlet casing – 5, air intake casing – 6.1, silencer – 6.2, insert – 7, compressor wheel – 8, diffuser – 9, compressor casing – 10 (Fig. 4).

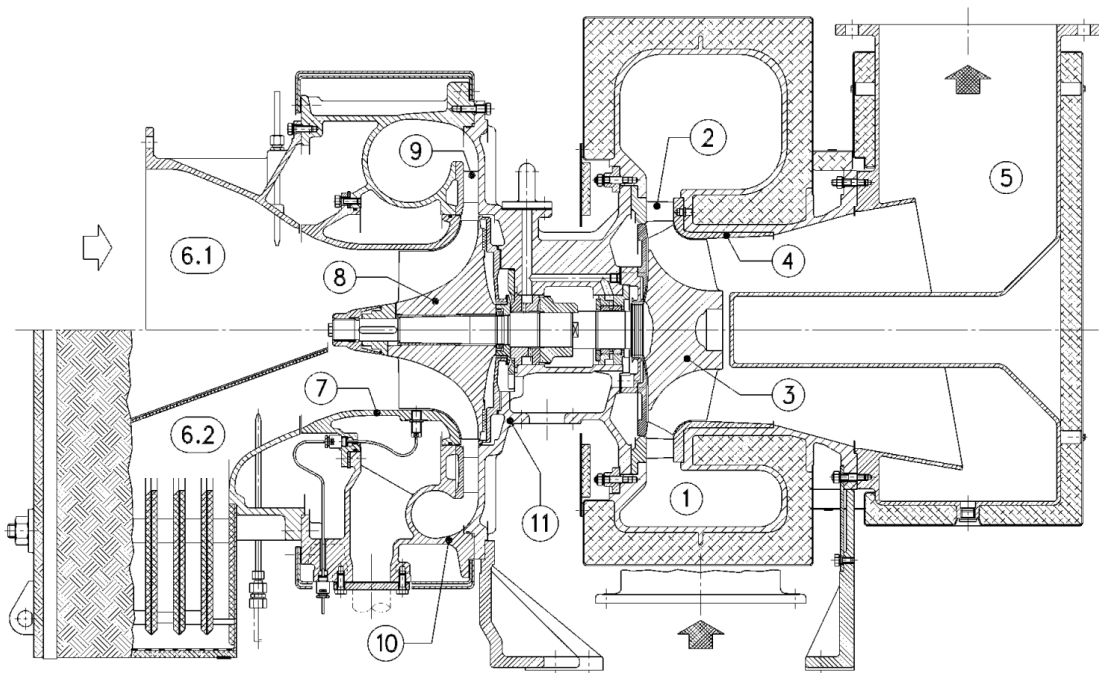


Fig. 4 – Turbocharger NR34/S

The turbocharger is a single-stage centrifugal compressor with a blade diffuser. Exhaust gas from the main engine enters the turbine impeller through the nozzle apparatus. The work blades are twisted, have a bandage and a Christmas tree mount on the wheel. The crankshaft is protected from hot gases by a casing and the compressor impeller by a layer of insulation and a diaphragm.

The most common fault detection of turbocharger assemblies is given in Table 2.

Table 2

Statistics of the reasons for failure of turbocharger units

<i>№</i>	<i>Turbocharger detail</i>	<i>Failure rate, %</i>
1	Casing	9.0
2	Compressor	0.5
3	Turbine	4.8
4	Sealing	16.7
5	Rotor	15.2
6	Bearings	43.8
7	Oil pumps	10.0

According to Fig. 1, another structure-forming unit of the intelligent system for monitoring the operational properties of the ship's power equipment is the analysis of the causes of failures. The most common cause of failures of ship turbochargers is the ingress of foreign particles into the oil and then into the turbine or compressor wheel, which leads to a violation of the rotor balancing. This type of failure causes the bearings to fail.

The causes of failures may be violations of manufacturing processes and hidden defects of the material. It is also possible inaccurate design and disruption of operation. Failures according to strength parameters are found in the folding of the surface of the products or in the form of cracks during bending and torsion.

In general, the cause of failures is degradation of the parameters and characteristics of materials due to physical and chemical processes.

According to statistics, the largest number of failures is accounted for by the wear factor (Table 3).

Table 3

Statistics of causes of failures of turbochargers assemblies

<i>№</i>	<i>Type of damage</i>	<i>% from the total number of refusals</i>
1	Wear and tear	44,7
2	Breakage of elements	11
3	Contamination of filters and systems	8,5
4	Erosion, corrosion, cavitation	6,6
5	Leakage of nodes	5,7
6	Material aging	3,7
7	Jamming elements	3,7
8	Other reasons	16,1

In the structure of all failures of turbochargers, the majority is caused by braking and jamming of the rotor shaft due to overheating of the housing, the signs of which are oil leaks from the turbine side. Along with this, there is a strong overheating of oil, its rapid aging and the formation of deposits on the details of the turbocharger. Thanks to the diagnostics of supercharging units, it is possible to prevent premature wear of parts and extend the service life of the turbocharger.

One of the most common reasons for failure is the wear of the elements of the mechanisms. Statistics indicate that in some cases, failures due to wear of surfaces reach 50-80% of all types of failures occurring during operation. Among the failures of elements of ship power plants, the most common are failures of rolling bearings. Rolling bearings are located in support bearing of propeller shaft in main engine frame bearings, in thrusters. Damage to rolling bearings is determined by measuring vibration. Wear causes changes in the trajectory of displacement of the center of mass and the appearance of shock

pulses. Factors of wear can be metallurgical and operational. The metallurgical ones include cracks and shells, the operational ones – through the eyes of corrosion, drilling of working surfaces, dents and potholes, destruction of surfaces (Fig. 5). From the picture of characteristic damage, you can determine the causes of their appearance.

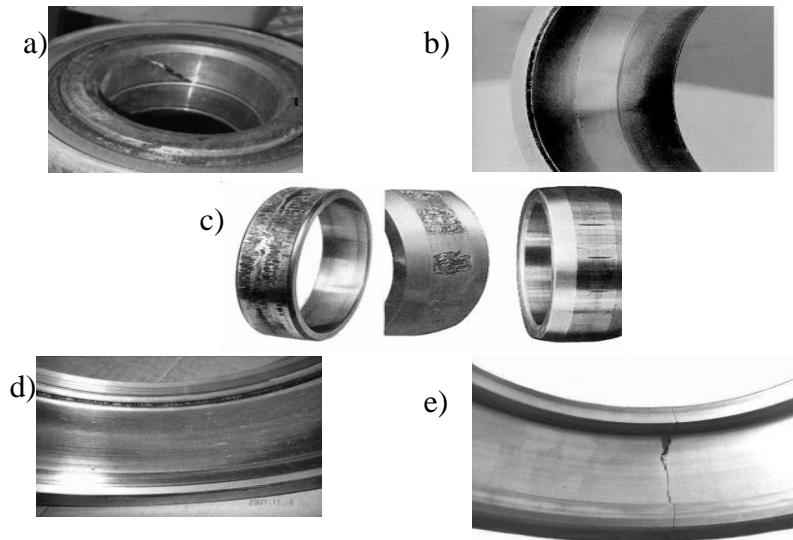


Fig. 5 – Rolling Bearing Operational Defects: a) inner clip defect; b) external clip defect; c) corrosion damage, d) contact fatigue damage, e) cracks

The next structural unit of the intelligent monitoring system Fig. 1 is to determine the probabilities of the current state of the equipment. The technical condition of the materials of the elements of ship vehicles can be in a finite set of states, which consists of a subset of operable states and a subset of incapable states. The division of the set into subsets is determined by the health conditions. Health conditions are set in the space of diagnostic indicators of the health area within which the products perform their functional purpose.

In the conditions of operation of ship's power equipment elements under the influence of unpredictable extreme loads, the identification of their technical condition is probabilistic and the diagnostic process begins without any amendments to the situation, according to the regulations. In case of obtaining new information on detection of defects within the interval of routine work, violations of the diagnosis cycle occur, that is, changes in the start point of diagnosis. Thus, the change in position of the reference point is random, characterized by a discrete temporal and finite number of possible states. Such a process will be Markovsky, since the following states of the starting point of the diagnosis process are independent of the previous ones. Markov chains characterize a stochastic process in which the conditional probability distribution of future states depends only on the current state of these processes.

A separate structural unit of intelligent monitoring systems is the construction of a matrix of transient probabilities of the dynamics of identification of ship's power equipment elements during the loading process. When modeling complex technical lenses, the key is to display the structure of interactions and transitions. According to the failure structure shown in Table 2, the diagnostic system can be in one of seven conditions. Transient probabilities P_{ji} independent of time, but dependent only on j and i

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\text{where } 0 \leq P_{ji} \leq 1 \quad \sum_{i=1}^n P_{ji} = 1 \quad (3)$$

Choosing as the main parameter of diagnostics the serviceability in terms of failures of these elements in terms of conditional probabilities form a matrix of transient probabilities T [4].

$$T = \begin{pmatrix} 0,09 & 0,005 & 0,048 & 0,167 & 0,152 & 0,438 & 0,1 \\ 0,09 & 0,008 & 0,051 & 0,15 & 0,18 & 0,431 & 0,09 \\ 0,08 & 0,006 & 0,068 & 0,169 & 0,151 & 0,446 & 0,08 \\ 0,08 & 0,007 & 0,054 & 0,152 & 0,163 & 0,474 & 0,07 \\ 0,07 & 0,005 & 0,062 & 0,141 & 0,172 & 0,44 & 0,11 \\ 0,09 & 0,007 & 0,056 & 0,15 & 0,166 & 0,421 & 0,11 \\ 0,08 & 0,006 & 0,064 & 0,159 & 0,161 & 0,43 & 0,1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

The unit for calculating probabilistic diagnostic elements provides for calculating conditional probabilities at each step of the system. Transformational probability conditions in the transition process at the next stage of the matrix can occur as the set of rows of the transition matrix to the matrix itself.

The next unit of the intelligent monitoring system (Fig. 1) is the comparison and ranking of interval estimates. Ranking performed using the prior information of Table 2 and the transition probability matrix showed that $P(1) > P(2) > P(3) > P(4) > P(5) > P(6) > P(7)$ that is, the probability of missing defects by the intelligent monitoring system decreases every single step [4]. This indicates the effectiveness of the proposed intelligent monitoring system for ship's power equipment elements.

To visualize the proposed conceptual model of intelligent diagnostics and monitoring of MPP elements using Markov circuits, a simulation model was created in the form of a oriented digraph (Fig. 6). When constructing the digraph, their specific part is closed as components of the corresponding parameters, i.e. elements of turbochargers (Table 2). Other relationships were as arcs given that the total input and output probabilities must be.

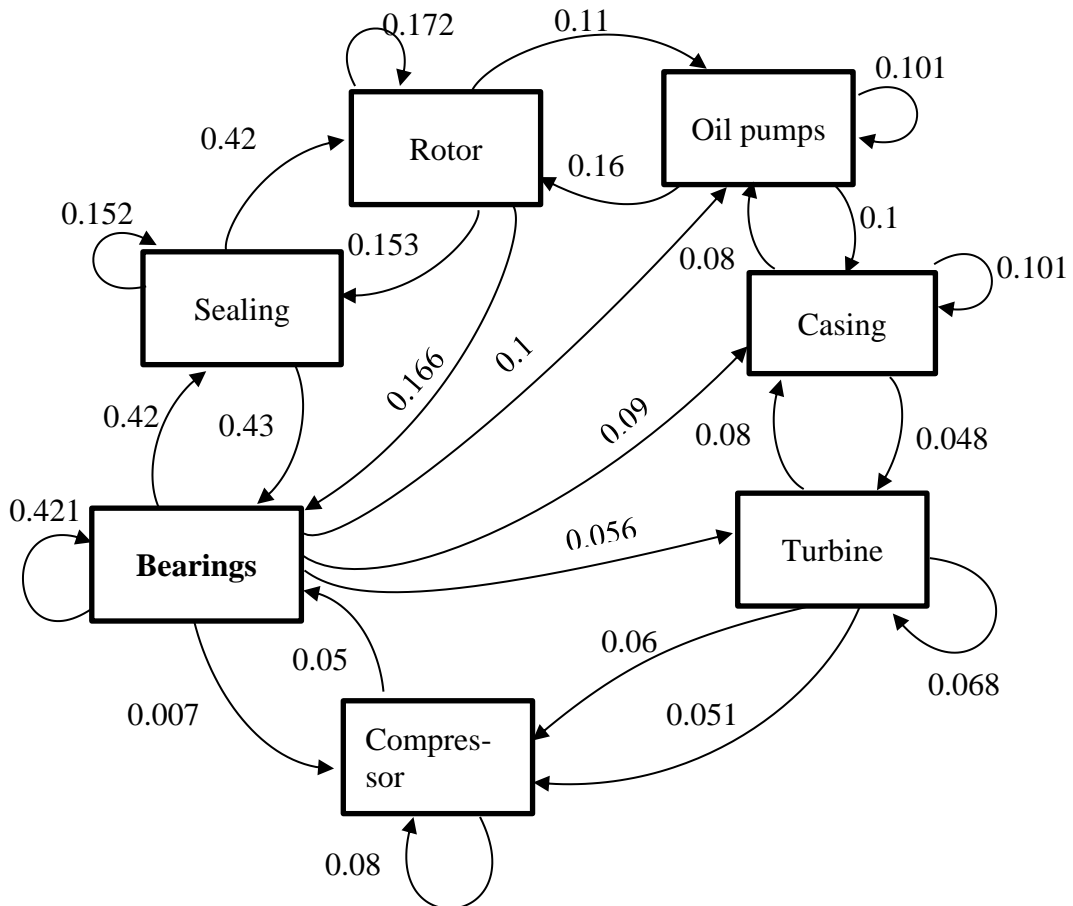


Fig. 6 – Diagram of diagnostics and monitoring of elements of turbochargers

The digraph is presented, characterizes the composition and structure of failure statistics, on the basis of which the most dangerous structural elements that pose the greatest threat during operation are identified. Such elements are most confirmed by failures in the operation of turbochargers are bearings and seals. This is presented in the form of the corresponding unit of the intelligent element monitoring

system in the ship's power equipment (Fig. 1).

A separate structural unit of the intelligent monitoring system (Fig. 1) is simulation and event generation. Simulation and generation of events in the process of uncertainty of extreme loads allows you to configure the system for any information situation. The process of converting analog operating process data must be digitally displayed. The use of digital technologies to assess the limit state of elements of ship power plants will dramatically increase the accuracy of equipment state assessments.

A separate block in the presented intelligent monitoring scheme (Fig. 1) is the search for sensitive diagnostic parameters. Any rotating equipment vibrates during its operation. For each mechanism, there is a certain set of vibrations, which allows you to diagnose the mechanisms as a whole and its individual parts. Periodic vibration diagnostics consists in regular measurement of vibration by installing sensors, after which measurements are made at certain frequencies. However, it is not possible to estimate the state of the mechanism between measurements. Non-destructive monitoring of dynamic equipment of ship power plants, based on analysis of spectral characteristics of vibration signals, established trends and thresholds, requires, in addition to measuring vibration parameters, the mandatory treatment of a large number of characteristic features. Such features in the time domain include mean, standard deviation, asymmetry, excess, full swing, rms, cross factor, form factor, impulse factor, limiting factor, energy. In the frequency domain, such statistical characteristics of vibration signals as the average spectral value, standard spectral deviation, spectral asymmetry, spectral excess are determined. The listed spectral characteristics do not produce direct changes in vibration, but are realized by calculations on special programs. These information parameters, based on using the methods of the main components when reducing dimensions and combining with signs of spectral characteristics and noise suppression.

The next unit of intelligent system for monitoring operational properties of ships power equipment elements is multi-criteria optimization of diagnostic parameters. The complex structure of vibration signals and the diversity of their stochastic characteristics leads to the need to prioritize their use. Optimization parameters are based on a change in the main diagnostic feature as it approaches the degradation state. The efficiency matrix includes statistical characteristics of vibration signals, criteria for statistical solutions of Laplace, Wald, Hurwitz, adaptive and multiplicative convolution and practical implementations of vibration diagnostics.

The platform for visual development of data analysis scenarios and the construction of interactive interactions involves the use of structured and unstructured information, integration of multi-criteria vibration characteristics into new diagnostic parameters. The main task of multi-criteria approach to selection of optimal diagnostic characteristics of monitoring is equivalence with.

Of great practical interest is the following block – the production of calculations on probabilistic models. Figure 7 [23] illustrates the prediction of the remaining bearing service life based on a priori parameters and recent measurements. The model is presented as a spreading strip around the forecast point. It is able to detect the degradation trend in real time and update its a priori parameters when a new observation becomes available. This allows the residual resource to be estimated based on pre-set thresholds. At the same time, integration of artificial intelligence and machine learning technologies is achieved. Training is carried out using a set of experimental sampling.

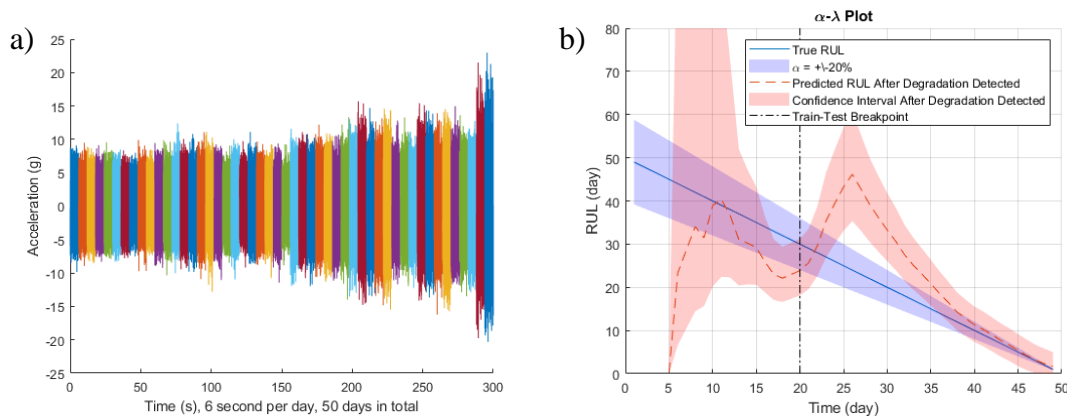


Fig. 7 – Exponential degradation model: a) form of vibration signal, b) prediction of residual resource

The content of the information support unit and the tools of the intelligent monitoring system of the ship's power equipment elements is as follows. Information support tools for intelligent monitoring of operational properties of ship's power equipment elements consists in the development of expert systems, knowledge base, data entry and transformation rules, software certified according to information security requirements in the field of diagnostics and control systems. The intellectual monitoring toolkit involves the use of such a widespread concept of information technology as the Internet of Things. Internet of Things is a connection of various physical and technical diagnostic elements, sensors, software and networks for data exchange and recording devices.

The intelligent monitoring toolkit is designed to provide a complex of information technology interactions from users to applications and databases. This allows you to understand the causes of defects during operation, reducing the risks that can arise due to normal operation failures, online platforms and applications. In addition, diagnostics is provided by optimizing the characteristics of multicomponent vibration signals, reducing the level of errors by introducing new diagnostic parameters and predicting the development of malfunctions when assessing the residual resource.

The presented information support of the intelligent system for monitoring operational parameters also follows that the main direction of improvement of technical diagnostics is connected not only with the determination of deviations from normative values, but with the definition of diagnostic signals sensitive to local defects.

Conclusions

The intelligent monitoring system of ship's power equipment elements monitors and analyzes real-time streams of experimental and statistical data based on intelligent algorithms of processing and methods of probabilistic dynamics using Markov circuits, calculations on probabilistic models, multi-criteria optimization of diagnostic parameters, simulation and scenario generation. Intelligent monitoring can be performed automatically without the need for human involvement. It highlights key features of the facility, and identifies new opportunities and development segments of damage accumulation during operation. The intellectual component of the diagnostic system consists in the use of mathematical algorithms and software products that minimize subjectivism in making conclusions about the extension of the equipment resource and prognostic models about the achievement of the residual resource.

The greatest danger in the operation of transport facilities is defects that occurred during operation. At the same time, it is necessary not only to detect a defect, but to carefully measure its parameters and process the characteristics of diagnostic signals using special algorithms and programs. Intelligent monitoring system of ship's power equipment elements makes it possible to know their conditions at every moment of time and determine in advance the possible problems of further operation. The advantages of the considered methodology are the possibility of detecting hidden defects, obtaining information on the state of equipment located in difficult-to-reach places, monitoring and obtaining information about the defect at the stage of its origin, reducing the risk of emergency situations due to timely detection of defects.

Risk analysis of failures at hazardous facilities consists of systematic use of all available information and probabilistic modeling based on the spectrum of diagnostic signals, by combining their main discrete features and establishing new diagnostic parameters to identify hazards and undesirable events. Combining subjective expert and objective elements of technical diagnostics of operational parameters with methods of processing available information by methods of mathematical modeling and probabilistic dynamics, a reliable method of monitoring the equipment working during its operation can be obtained.

Areas of research on the effects and mechanisms of generation and distribution of diagnostic signals at different stages of material loading were further developed, on the basis of which the information parameters of the technical operation of ship vehicles were determined, which must be taken into account to improve the quality of diagnostics in conditions of risk and uncertainty.

References:

1. R.A. Varbanets, «Systemi kompiuternoї dyahnostyky sudovikh dyzelei» [«Computer diagnostic systems for marine diesel engines»], *Sudokhodstvo – Shipping*, no. 6, pp. 24-27, 2004. (Rus.)
2. P.S. Suvorov, *Upravlenye rezhymamy raboti glavnykh sudovikh dyzelei* [Control of operating modes of main marine diesel engines]. Odessa, Ukraine: LATSTAR Publ., 2000. (Rus.)

3. A.R. Myska, A.O. Drankova, and N.Y. Mukha, «Ynformatsyonnii podkhod k monytorynhu tekhnicheskoho sostoiannya sudovikh dyzel-heneratornikh ustanovok» [«Information approach to monitoring the technical condition of marine diesel generator sets»], *Avyatsyonno-kosmycheskaia tekhnika y tekhnolohiya – Aerospace engineering and technology*, № 8(75), pp. 136-139, 2010. (Rus.)
4. O. Sharko, and A. Yanenko, «Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains», *Naukoiemni tekhnolohii*, № 3(59), pp. 251-261, 2023. doi: **10.18372/2310-5461.59.17946**.
5. *Neruinivnii kontrol i tekhnichna diahnostyka* [Non-destructive control and technical diagnostics], Z.T. Nazarchuk Eds, Lviv, Ukraine: FMI im. H.V. Karpenka NANU Publ., 2001. (Ukr.)
6. Y. Wang, H. Yang, S. Zhao, Y. Fan, and R. Dong, «Vibration characterization of rolling bearings with compound fault features under multiple interference factors», *PLoS ONE*, vol. 19(2), pp. 1-19, 2024. doi: **10.1371/journal.pone.0297935**.
7. O.V. Sharko, and A.V. Yanenko, «Diahnostyka ta vymiriuvalni kontrol elementiv sudnovoho enerhetychnoho obladnannia v umovakh nevyznachenosti kharakteru navantazhen» [«Diagnostics and measuring control of elements of ship power equipment in conditions of uncertainty of the nature of loads»], in Proc. of III Int. sci.-pract. conf. «Dnipro readings-2022», Kyiv, 2022, pp. 129-130. (Ukr.)
8. O.V. Sharko, and A.V. Yanenko, «Suchasni tekhnolohii diahnostuvannia i vyznachennia zalyshkovoho resursu elementiv SEU v protsesi ekspluatatsii» [«Modern technologies for diagnosing and determining the residual resource of SEU elements in the process of operation»], in Proc. of 14-th Int. sci.-pract. conf. «Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance», Kherson, 2023, pp. 75-77. (Ukr.)
9. M. Sharko, N. Gusarina, and N. Petrushenko, «Information-entropy model of making management decisions in the economic development of the enterprises», *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1020, pp. 304-314, 2019. doi: **10.1007/978-3-030-26474-1_22**.
10. Q. Zhou, C. Yi, L. Yan, C. Huang, and J. Lin, «A blind deconvolution approach based on spectral harmonics-to-noise ratio for rotating machinery condition monitoring», *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 20, iss. 2, pp. 1092-1107, 2023. doi: **10.1109/TASE.2022.3179457**.
11. Y. Ma, J. Si, Q. Yan, and J. Wang, «Research on fault feature extraction and early warning of rolling bearing vibration signal of generator set», *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol. 9, iss. 1, pp. 1-14, 2024. doi: **10.2478/amns.2023.2.00338**.
12. Y. Jin, G. Xin, and J. Antoni, «Towards automated, integrated and unsupervised diagnosis of rolling element bearings», *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 203, art. no. 110691, 2023. doi: **10.1016/j.ymssp.2023.110691**.
13. M. Zhu, H. Zhu, X. Wang, J.W. Ju, and W. Wu, «Quantitative analysis of seasonal uncertainty of metro tunnel's long-term longitudinal settlement via hierarchy Bayesian network», *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*, pp. 279-291, 2019. doi: **10.1007/978-3-030-32029-4_24**.
14. Y.-D. Sha et al., «Feature extraction and characterization of rolling bearing vibration signal based on multi parameter information fusion and screening», *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*, vol. 44(7), art. no. 2205050, 2023.
15. N. Li, X. Wang, T. Yang, and Q. Han, «Research on micro-turbine operating state characterization based on bearing vibration signals analysis», *International Journal of Acoustics and Vibrations*, vol. 28(4), pp. 435-450, 2023. doi: **10.20855/ijav.2023.28.41997**.
16. H. Wang, G. Ni, J. Chen, and J. Qu, «Research on rolling bearing state health monitoring and life prediction based on PCA and Internet of things with multi-sensor», *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, vol. 157, art. no. 107657, 2020. doi: **10.1016/j.measurement.2020.107657**.
17. M. Momenzadeh, M. Sehhati, and H. Rabbani, A novel feature selection method for microarray data classification based on hidden Markov model», *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 95, art. no. 103213, 2019. doi: **10.1016/j.jbi.2019.103213**.
18. M. Ficco, «Detecting IoT malware by Markov chain behavioral models», in Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Cloud Engineering IC2E 2019, Prague, Czech Republic, 2019, pp. 229-234. doi: **10.1109/IC2E.2019.00037**.

19. Z. Hu, R.C. Smith, N. Burch, M. Hays, and W.S. Oates, «Homogenized energy model and Markov chain Monte Carlo simulations for macro fiber composites operating in broadband regimes», in Proceedings of Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems ASME 2012, Stone Mountain, Georgia, USA, 2012, vol. 1, pp. 321-327. doi: 10.1115/SMASIS2012-7942.
20. D. Huang, G. Yu, J. Zhang, J. Tang, and J. Su, «An accurate prediction algorithm of RUL for bearings: time-frequency analysis based on MRCNN», *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 1-13, 2022. doi: 10.1155/2022/2222802.
21. L. Lin et al., «Remaining useful life prediction method of coated spherical plain bearing based on VMD-EEMD-LSTM», *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*, vol. 59(9), pp. 125-136, 2023. doi: 10.3901/JME.2023.09.125.
22. O.V. Sharko, A.V. Yanenko, and P.V. Movchan, «Systema tekhnichnoi diahnostryky vyznachennia potochnoho stanu transportnykh prystroiv» [«Technical diagnostics system for determining the current state of transport devices»], in Proc. of XV Int. sci.-pract. conf. «Modern energy installations on transport, technologies and equipment for their maintenance», Kherson, 2024, pp. 39-41. (Ukr.)
23. A. Sharko, O. Sharko, D. Stepanchikov, and A. Yanenko, «Monitoring state of marine plain bearings based on exponential degradation model», *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 3664, pp. 48-58, 2024.

Перелік використаних джерел:

1. Варбанец Р. А. Системы компьютерной диагностики судовых дизелей. *Судоходство*. 2004. № 6. С. 24-27.
2. Суворов П. С. Управление режимами работы главных судовых дизелей. Одесса : ЛАТСТАР, 2000. 238 с.
3. Миська А. Р., Дранкова А. О., Муха Н. И. Информационный подход к мониторингу технического состояния судовых дизель-генераторных установок. *Авиационно-космическая техника и технология: Научно-технический журнал*. 2010. № 8 (75). С. 136-139.
4. Sharko O., Yanenko A. Modeling of intelligent software for the diagnosis and monitoring of ship power plant components using Markov chains. *Naukoiemni tekhnolohii*. 2023. № 3(59). Pp. 251-261. DOI: <https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946>.
5. Неруйнівний контроль і технічна діагностика / за ред. З. Т. Назарчука. Львів : ФМІ ім. Г.В. Карпенка НАНУ, 2001. 1134 с.
6. Vibration characterization of rolling bearings with compound fault features under multiple interference factors / Y. Wang et al. *PLoS ONE*. 2024. Vol. 19(2). Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297935>.
7. Шарко О. В., Яненко А. В. Діагностика та вимірювальний контроль елементів суднового енергетичного обладнання в умовах невизначеності характеру навантажень. *Дніпровські читання-2022* : матеріали III Міжн. наук-практ. конф., м. Київ, 8 грудня 2022 р. С. 129-130.
8. Шарко О. В., Яненко А. В. Сучасні технології діагностування і визначення залишкового ресурсу елементів СЕУ в процесі експлуатації. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування* : матеріали 14-й Міжн. наук.-практ. конф., м. Херсон, 16-18 березня 2023 р. С. 75-77.
9. Sharko M., Gusarina N., Petrushenko N. Information-entropy model of making management decisions in the economic development of the enterprises. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 1020. Pp. 304-314. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_22.
10. A blind deconvolution approach based on spectral harmonics-to-noise ratio for rotating machinery condition monitoring / Q. Zhou et al. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2023. Vol. 20. Iss. 2. Pp. 1092-1107. DOI: <https://doi.org/10.1109/TASE.2022.3179457>.
11. Research on fault feature extraction and early warning of rolling bearing vibration signal of generator set / Ma Y., Si J., Yan Q., Wang J. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024. Vol. 9. Iss. 1. Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.2478/amns.2023.2.00338>.
12. Jin Y., Xin G., Antoni J. Towards automated, integrated and unsupervised diagnosis of rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2023. Vol. 203. Art. no. 110691. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110691>.
13. Quantitative analysis of seasonal uncertainty of metro tunnel's long-term longitudinal settlement via hierarchy Bayesian network / M. Zhu et al. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*.

2019. Pp. 279-291. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-32029-4_24.
14. Feature extraction and characterization of rolling bearing vibration signal based on multi parameter information fusion and screening / Y.-D. Sha et al. *Tuijin Jishu/Journal of Propulsion Technology*. 2023. Vol. 44(7). Art. no. 2205050.
 15. Research on micro-turbine operating state characterization based on bearing vibration signals analysis / Li N., Wang X., Yang T., Han Q. *International Journal of Acoustics and Vibrations*. 2023. Vol. 28 (4). Pp. 435-450. DOI: <https://doi.org/10.20855/ijav.2023.28.41997>.
 16. Research on rolling bearing state health monitoring and life prediction based on PCA and Internet of things with multi-sensor / Wang H., Ni G., Chen J., Qu J. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*. 2020. Vol. 157. Art. no. 107657. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107657>.
 17. Momenzadeh M., Sehhati M., Rabbani H. A novel feature selection method for microarray data classification based on hidden Markov model. *Journal of Biomedical Informatics*. 2019. Vol. 95. Art. no. 103213. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2019.103213>.
 18. Ficco M. Detecting IoT malware by Markov chain behavioral models. *Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Cloud Engineering IC2E 2019*, Prague, Czech Republic, 24-27 June, 2019. Pp. 229-234. DOI: <https://doi.org/10.1109/IC2E.2019.00037>.
 19. Homogenized energy model and Markov chain Monte Carlo simulations for macro fiber composites operating in broadband regimes / Z. Hu et al. *Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems ASME 2012*, Stone Mountain, Georgia, USA, 19-21 September, 2012. Vol. 1. Pp. 321-327. DOI: <https://doi.org/10.1115/SMASIS2012-7942>.
 20. An accurate prediction algorithm of RUL for bearings: time-frequency analysis based on MRCNN / D. Huang et al. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/2222802>.
 21. Remaining useful life prediction method of coated spherical plain bearing based on VMD-EEMD-LSTM / L. Lin et al. *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal of Mechanical Engineering*. 2023. Vol. 59(9). Pp. 125-136. DOI: <https://doi.org/10.3901/JME.2023.09.125>.
 22. Шарко О. В., Яненко А. В., Мовчан П. В. Система технічної діагностики визначення поточного стану транспортних пристроїв. *Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування СЕУТТО-2024* : матеріали XV Міжн. наук.-практ. конф., м. Херсон, 13-15 березня 2024 р. С. 39-41.
 23. Monitoring state of marine plain bearings based on exponential degradation model / Sharko A., Sharko O., Stepanchikov D., Yanenko A. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3664. Pp. 48-58.

Стаття надійшла 12.04.2024

Стаття прийнята 05.05.2024

УДК 502.1:504

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310714

© Волошин В.С.*

РИЗИКИ ПОДІЙ ТА СЦЕНАРІЙ ПАДІНГТОНСЬКОЇ КАТАСТРОФИ 1999 РОКУ

Аварія під Лондоном у жовтні 1999 року шокувала не лише Велику Британію. Зіткнення двох поїздів показало очевидну неадекватність існуючих моделей управління поїздами на Великій Західній головній лінії залізниць Великобританії. Фахівці найрізноманітніших галузей знань неодноразово повертаються до цієї проблеми,

* д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-9922-5618

намагаючись знайти ключові шляхи мінімізації ризиків у цій дуже складній транспортній галузі. У даній роботі зроблена спроба створення моделі нейронної мережі NS, що дає можливість прогнозувати можливі наслідки різноманітних технологічно запрограмованих дій і безпечну диспетчеризацію. В основі п'ятисинапсної моделі, що запропоновано, згруповані всі відомі ризикоутворюючі події, які так чи інакше сприяли виникненню аварії. Як функцію активації нейронів синапсів обрано біфуркаційну залежність подвоєного облікового періоду за рахунок кількості та невизначеності змісту облікових показників, що впливають на кінцевий результат. Це дозволило врахувати невизначеності, які супроводжують активність будь-яких міжсинапсних каналів від кожної вхідної події до кінцевого протоколу, який приймає лише бінарне представлення очікуваного ризику. Завдяки цій моделі, виявляються як наочні, так і приховані джерела потенційних ризиків для будь-якої системи подій, еквівалентних Паддінгтонській системі, з урахуванням деяких її недоліків. Показано, що запобігання таких аварій за допомогою моделей нейронних мереж має зводитися до автоматичного відстеження відображень потенційних ризикоутворюючих подій, вбудованих у навчену NS, і оповіщення принаймні одного або двох з таких, що відстежуються. Слід зазначити, що така модель NS може бути корисною не тільки для умов Великої Західної Головної Лінії залізниць Великобританії, але і для інших систем, на які поширюються ті ж правила експлуатації, що і в нашому прикладі.

Ключові слова: ризик, прогнозування ризику, Паддінгтонська аварія, ризикоутворюючі події, нейронна мережа, невизначеність ризику.

V.S. Voloshyn. Event risks and scenarios for the 1999 Paddington accident. The accident near London in October 1999 didn't just shocks the UK. The collision of the two trains showed the obvious inadequacy of the existing models of train control on the Great Western main line of the UK railways. Specialists from a wide variety of fields of knowledge repeatedly return to this problem, trying to find key ways to minimize risks in this very difficult transportation industry. In this paper, an attempt is made to create a model NS neural network, which makes it possible to predict the possible consequences of a variety of technologically programmed actions, and safe dispatching. The five-synapse model is based on all known risk-forming events that contributed to the occurrence of an accident in one way or another. As a function of synapse neuron activation, the bifurcation dependence of the doubled accounting period was chosen due to the number and uncertainty of the content of the accounting indicators that affect the final result. This made it possible to take into account the uncertainties that accompany the occurrence of any intersynapse channels from each input event to the resulting protocol, which assumes only a binary mapping of the expected risk. Thanks to this model, potential and hidden sources of potential risks for any system of events equivalent to the Paddington system are identified, taking into account some of its drawbacks. It is shown that the prevention of such accidents using neural network models should be reduced to automatically tracking images of potential risk-forming events embedded in the trained NS and alerting at least one or two of the monitored ones. It should be noted that such an NS model can be useful not only for the conditions of the Great Western Main Line of the UK railways, but for other systems that are subject to the same operating rules as in our example.

Key words: risk, risk prediction, Paddington accident, risk-generating events, neural network, risk uncertainty.

Постановка проблеми. У 1999 році на виїзді з вокзалу Паддінгтон (Лондон) сталася аварія через зіткнення двох поїздів – швидкісної компанії InterCity компанії First Great Western, що прямує з Челтнема до Лондона, і приміського дизель-поїзда компанії Thames Trains, що виїжджає з Лондона. Із загальної кількості 554 пасажирів 227 госпіталізували та 31 людина загинула. Слідча комісія змогла виявити лише ті очевидні причини, які були наявними під час розслідування, без урахування всіх прихованих механізмів та подій, які вплинули на систему в сукупності та могли б стати основним фактором, через який сталася масштабна аварія. І, хоча розслідування було

закрито, залишалося багато питань щодо процедур запобігання подібним інцидентам на залізницях, які так і не були вирішені.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Причини аварії, за даними Комісії Великої Західної Головної Лінії Британських залізниць, це непрофесійні дії молодого і недосвідченого машиніста одного з поїздів, а також диспетчерських служб станції Паддінгтон [1-3]. У сучасній ризикології ця подія стала однією з найбільш значущих, яка вимагала пильної уваги до роботи мобільних систем на транспорті. Відомі моделі прогнозування таких аварій досі ідентифікуються як неоднозначні зі значним розкидом вихідних даних, наприклад, [4].

Мета роботи – запропонувати модель нейронної мережі NS, яка дозволяє з максимальною достовірністю прогнозувати ризики в залізничних мобільних системах та показати її переваги як способу дослідження потенційних ризиків на залізниці.

Виклад основного матеріалу. Графічна послідовність або мережа ризикоутворюючих подій показана на рис. 1. Тут представлені всі істотні події, що передували аварії, незалежно від їх параметричного змісту. Звернемо увагу на хронологічні показники моделі. Очевидно, що аварія сталася в результаті ланцюжка взаємопов'язаних подій, і ризик зіткнення двох поїздів зріс з мінімального нульового за проміжок з часу $t_1 = 8^{07}$ до максимально одиничного в момент часу $t_2 = 8^{11}$ ранку через низку допущених технічних і людських помилок. Перелік і послідовність таких подій наведені в таблиці 1. Важливим тут є час від проходження першим поїздом стрілочного перевалу на четвертій колії до переходу другого поїзда на цю колію після світлофора SN109. Це так звана точка неповернення, після якої ніякі події не можуть вже зняти реальний ризик зіткнення двох поїздів. Цей мінімальний інтервал (час неповернення) становить $\delta\tau = t_3 - t_2 = 8^{12} - 8^{11} = 1$ хв. У цьому проміжку ризик аварійної події вже дорівнював 1. Несчасний випадок був неминучим.

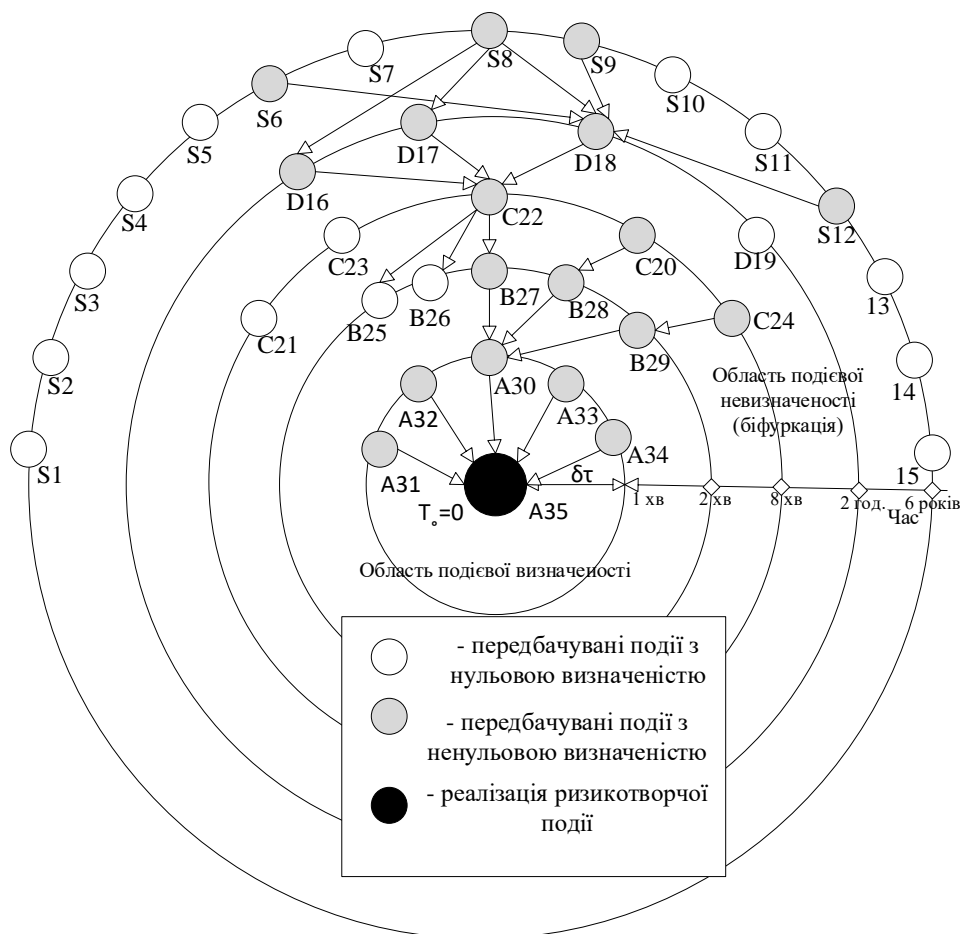


Рис. 1 – Графічна інтерпретація подій, що призвели до Паддінгтонської аварії

Таблиця 1

Таблиця відповідності подій у моделі аварії біля Паддінгтона

Обозначення	Мітка NS	Суть заходу
S1	x_1	Оголошено приватизацію залізниць.
S2	x_2	Право на управління залізничною інфраструктурою від приватного монополіста «Rail Train».
S3	x_3	Необхідність проведення планових ремонтів залізниць.
S4	x_4	Відмова від ремонтів залізниці в Паддінгтоні компанією “Rail Train”.
S5	x_5	Установка нових світлофорів з автоматичним оповіщенням водіїв.
S6	x_6	Відсутність системних перевірок світлофорів.
S7	x_7	Професійні дії досвідченого машиніста (8 років досвіду).
S8	x_8	Професійні дії менш досвідченого машиніста (тиждень досвіду).
S9	x_9	Системна погана видимість світлофорів SN109 на виїзді з Паддінгтона.
S10	x_{10}	Вимушений рух на червоне світло при наближенні до світлофора SN109.
S11	x_{11}	Системні зупинки поїздів в районі SN109 за командою поїзної автоматики.
S12	x_{12}	Звичка машиністів до вимикання поїзної сигналізації на світлофорі SN109.
...13	...	Загалом у період з 1995 по 1999 рік на світлофорі SN109 у Паддінгтоні було 8 зупинок поїздів.
...14	...	1995 – Проїзд через SN109 у Паддінгтоні на червоне світло. Поїзд зупинили за 100 м від світлофора.
...15	...	1997. Червоне світло в Саутоллі, аварія IC: 139 поранених, 7 загиблих. 130 км/год.
D16	x_{13}	Вимушена заміна кваліфікованого машиніста перед поїздкою.
D17	x_{14}	Відсутність досвіду в аварійних ситуаціях у машиніста другого поїзда.
D18	x_{15}	5.10.99 – ранок, сонце заважає видимість світлофору SN109 на виїзді з Лондона.
D19	x_{16}	6.03 – початок руху першого поїзда до Лондона (Паддінгтон).
C20	x_{17}	7.57 – наближення першого поїзда до вокзалу Паддінгтон по IV колії.
C21	x_{18}	7.54 – підготовка до відправлення поїзда з Паддінгтона.
C22	x_{19}	8.06 – початок руху поїзда з Паддінгтона по III колії.
C23	x_{20}	8.07 – жовтий сигнал на світлофорі SN109 для другого поїзда.
C24	x_{21}	8.07 – автоматичний сигнал в кабіні машиніста відключений і не активується.
B25	x_{22}	8.09 – обмежена видимість червоного світла для другого потягу на світлофорі SN109 з-за сонця.
B26	x_{23}	8.09 – другий поїзд проїжджає світлофор SN109.
B27	x_{24}	8.11 – автоматична спрямованість другого поїзда на IV колію (в бік першого состава).
B28	x_{25}	8.11 – диспетчер не встигає включити червоний світ перед першим поїздом.
B29	x_{26}	8.11 – проїзд стрілочного перевалу IV колії першим поїздом після світлофора SN120.
A30	x_{27}	8.11 – точка неповернення.
A31	x_{28}	8.12 – зіткнення поїздів.
A32	x_{29}	8.12 – механічні розриви паливних баків.
A33	x_{30}	8.12 – іскріння внаслідок зіткнення та тертя металу об метал.
A34	x_{31}	8.12 – вибухи паливних баків.
A35	x_{32}	8.12 – факт аварії.
...
O36	x_{33}	Відсутність аварії.

Звернемося до проблеми потенційного ризику повторення трагедії Паддінгтона. Вона може звучати так.

«Знайти відображення образів подій, що передували Паддінгтонській трагедії, які утворюють безперервний ряд з реальними причинно-наслідковими зв'язками, і можуть призвести, а можуть і не привести до означеної катастрофи».

Тобто ми свідомо орієнтуємо вирішення проблеми лише на два результати: станеться аварія (ризик $Y_1 = 1$) або аварія буде виключена (ризик $Y_0 = 0$). Ми приходимо до бінарного відображення власного суб'єктивного очікування з переліку ризикоутворюючих подій, пов'язаних у часі з певною енергією зовнішньої дії на межі між невизначеністю і чітко визначеними станами системи, які або можуть, або не можуть привести до реалізації ризикової події.

Для управління ризиком в даному випадку використовується п'ятисинапсна модель нейронної мережі NS (рис. 2). Кількість нейронів у кожному з п'яти шарів синапсу вибирається виходячи з логіки руху сигналу. Обмежуючим фактором тут виступає навіть не кількість вхідних сигналів в мережі, а їх невизначеність, а також мінливість при роботі такої мережі. Наприклад, перший шар синапсу має справу з 42 зовнішніми сигналами. З означеними 8 нейронами першого прихованого шару показано, вирішальна система повинна мати можливість вибирати з 294 варіантів подій. Потім до другого синапсу їх число збільшується до 13 818 варіантів подій і так далі. При цьому кожен наступний синапс повинен мати раціональне поєднання нейронів меншої кількості, ніж в попередньому прихованому шарі, щоб рішення завдання не було зайвим.

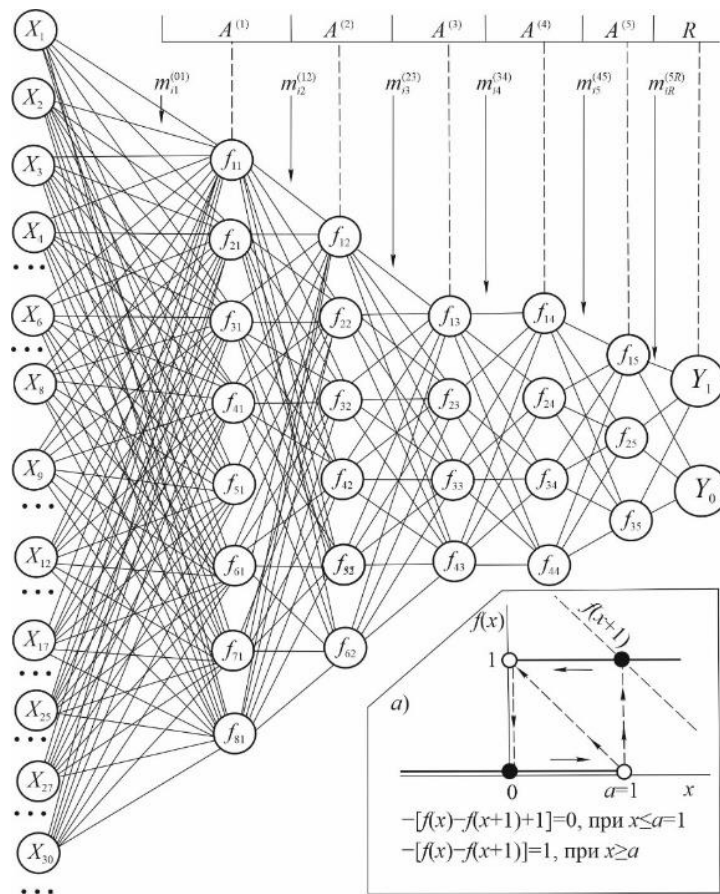


Рис. 2 – П'ятисинапсна нейромережева модель NS для прогнозування та запобігання потенційним ризикам, пов'язаним з Паддінгтонською аварією

Перший прихований шар синапсів в моделі NS, що складається з 8 нейронів, представлений як відповідальний за поведінку і подієвість, пов'язану з інфраструктурою системи (стаціонарні елементи – шляхи, стрілки, світлофори, диспетчерська служба). Перевага сигналу залежить від комбінації вагових коефіцієнтів m_{i1}^{01} від кожного вхідного сигналу до кожного нейрона

«навченого» першого шару. Другий прихований шар синапсів Вона включає в себе нейрони, налаштовані на образи подій рухомих частин системи (поїздів, машиністів, їх підготовки, системи автоматичного оповіщення в кабінах поїздів, мобільну видимість світлофорів). Система переваг в цьому шарі визначається коефіцієнтами, що позначаються в системі навчання як m_{i2}^{12} . Третій і четвертий шари синапсів представлені можливостями порівняння сигналів першого і другого шарів з метою узгодження їх для образності і комбінації найбільш активних з них в залежності від поєднання коефіцієнтів переваги сигнальних зображень m_{i1}^{01} та m_{i2}^{12} з коефіцієнтом m_{i3}^{23} , а також комбінації коефіцієнтів m_{i1}^{01} , m_{i2}^{12} і m_{i3}^{23} з коефіцієнтом m_{i4}^{34} за принципом

$$\max m_{i1}^{01} \cap \max m_{i2}^{12} \rightarrow m_{i3}^{23} \tag{1}$$

та

$$\max m_{i1}^{01} \cap \max m_{i2}^{12} \cap \max m_{i3}^{23} \rightarrow m_{i4}^{34}. \tag{2}$$

І, нарешті, п'ятий, останній прихований шар синапсів буде налаштований на синхронізацію активних сигналів двох попередніх нейронних шарів з метою отримання відношення сигналів двох груп нейронів (I і II шарів) до вихідних параметрів моделі Y_1 або Y_0 , як підсумок роботи всієї частини прихованих шарів моделі нейронної мережі за умовою

$$\max m_{i3}^{23} \cap \max m_{i4}^{34} \rightarrow m_{i5}^{45} \text{ та} \tag{3}$$

$$\max m_{i3}^{23} \cap \max m_{i4}^{34} \cap \max m_{i5}^{45} \rightarrow m_{iR}^{5R}. \tag{4}$$

Другою умовою вибору для прихованих шарів активації є тип самої функції активації для нейронів кожного шару. В якості функції активації $f(x)$ нейронів синапсу виберемо біфуркаційну залежність подвоєного облікового періоду в зв'язку з кількістю і невизначеністю змісту облікових показників, що впливають на кінцевий результат (рис. 2, а).

При створенні такої моделі ми будемо використовувати можливості відкритої бібліотеки програм з надбудовою *Keras*, а також ресурс бібліотеки *MLOps* на платформі *TensorFlow* [5-7]. При цьому інструментарій машинного навчання *Comet* на мовній платформі *Python* сумісний з існуючими *ML*-бібліотеками, що дозволяє працювати з кодованими параметрами і метриками в напрямку прогнозування вихідних сигналів. Крім того, інструмент *Comet* включає необхідні набори функцій інтеграції для внутрішньої синапсичної бази даних і спрощує їх узгодження з іншим програмним забезпеченням *Machine Learning*.

Вихідні дані для системи тренування NS (*back propogation*) наступні:

- поріг активації моделі приймається для негативних рішень $h_{Y_0} = 0,055$, для позитивних рішень $-h_{Y_1} = 1,000$;
- параметр очікуваного результату у всіх випадках $D = 12$;
- крок збіжності за алгоритмом «back propagation» $\lambda = 0,0001$;
- задана помилка пошуку в мережі $\varepsilon_{зад} = 0.0025$.

При цьому вагові коефіцієнти, як носії «пам'яті» нейронної мережі, зазнають суттєвих змін (табл. 2).

Таблиця 2

Параметри стійкості періоду навчання для нейронної моделі Паддінгтонської аварії

Номер і потужність синапсу	Число ітерацій n	Фактична пошукова похибка, $\varepsilon_{факт}$	Сумарна похибка вагових коефіцієнтів для кожної з n ітерацій, %								
			1	2	3	4	5	6	...	25	
1	8	25	0,00337	128,31	105,12	92,60	77,46	34,55	42,99	...	5,857
2	6	25	0,00295	69,18	68,54	71,05	32,86	33,22	27,48	...	4,142
3	4	25	0,00311	54,11	36,12	37,43	33,79	25,25	22,62	...	2,911
4	4	25	0,00261	41,09	42,48	44,51	11,12	11,77	5,55	...	0,110
5	3	25	0,00245	29,21	26,47	14,92	9,51	3,44	2,59	...	0,050

Результати моделювання NS заданої конфігурації для ідентифікації можливих аварій в системі залізничних перевезень на Великій Західній головній лінії залізниць Великобританії, в об'язі зазначених вхідних сигналів, представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати роботи NS в умовах заданих вхідних сигналів бінарного змісту (світлий колір вказує на вихідні функції системи, які не призводять до реалізації ризику, темний колір вказує на вихідні функції системи, які однозначно призводять до реалізації ризику)

x_i	$m_i^{(A)}$	$m_i^{(A)'}$	$f_i^{A(1)}$	$f_i^{A(2)}$	$f_i^{A(3)}$	$f_i^{A(4)}$	$f_i^{A(5)}$	$Y_1; Y_0$
x_1	0	0,316	1,0902721	3,0454421	2,7798888	2,5455654	2,5405554	0; 0
x_2	1	0,516	4,3298578	2,7778752	4,1545567	4,2194489	4,1329321	0; 0
x_3	1	1,932	0,0001906	0,0001199	0,0001843	0,0001934	0,0001651	0; 1
x_4	1	1,873	0,5545567	0,9815545	1,1329185	0,9654705	0,9589579	1; 0
x_5	0	0,045	2,1186398	2,2988688	1,9823245	2,1184412	2,1524658	1; 1
x_6	1	1,695	12,3478122	10,8269352	9,0825580	10,1119111	9,7757794	1; 0
x_7	0	0,451	0,3845009	0,2569285	0,2321542	0,2778789	0,2545682	1; 1
x_8	1	1,777	0,0355483	0,0717111	0,0344444	0,0997683	0,0023617	0; 1
x_9	1	1,033	0,1734185	0,3274457	0,2254411	0,9184457	1,0124458	1; 0
x_{10}	1	0,774	35,2108235	22,7774602	19,7773759	17,1128290	15,3535550	0; 0
x_{11}	0	0,581	18,2548938	24,5545109	2,8759781	5,5564781	8,9997078	1; 1
x_{12}	1	1,163	0,2846008	0,3837915	0,4795554	0,7274222	1,0054123	1; 0
x_{13}	0	0,984	-	-	-	-	-	0; 0
x_{14}	1	0,269	-	-	-	-	-	0; 0
x_{15}	1	1,759	-	-	-	-	-	0; 0
x_{16}	0	0,519	2,9455554	5,9476654	7,8112223	3,4565847	3,9898334	0; 0
x_{17}	1	1,823	0,1459093	0,1296777	0,0451612	0,9175258	1,0032774	1; 0
x_{18}	1	0,771	33,7777936	5,5489453	1,2356778	5,0098692	4,0091001	1; 1
x_{19}	0	0,031	25,0916666	31,4071045	13,7587555	12,9801421	12,2009689	0; 0
x_{20}	0	0,256	38,1104435	35,0931680	29,2128235	37,7278456	35,0091258	1; 1
x_{21}	0	0,011	24,1738907	25,0092721	13,1122456	47,2809492	29,1111693	0; 0
x_{22}	0	0,033	13,0167777	7,1765270	5,9167729	3,0008846	4,0155370	0; 0
x_{23}	0	0,718	1,2777416	0,8912121	0,5561141	1,5783436	1,5504704	1; 1
x_{24}	1	1,199	7,0810027	5,3914321	31,1545521	13,7778178	15,2893332	1; 1
x_{25}	1	1,558	2,7353359	2,1835583	1,8169480	1,2555500	0,0012889	0; 1
x_{26}	0	1,481	1,5482121	1,4802179	1,0930033	0,5569614	0,2255145	0; 0
x_{27}	1	1,092	7,1649267	3,1054471	5,7538122	1,4022045	0,0021009	0; 1
x_{28}	1	1,111	0,6899888	0,3501487	0,7772275	1,0087729	1,0882588	1; 0
x_{29}	0	1,589	7,5755116	9,2846554	5,9888567	6,1235556	6,0009912	1; 1
x_{30}	1	1,997	0,2548802	0,0917295	0,0146465	0,0922112	0,05511165	1; 1
x_{31}	1	1,310	0,9821495	0,64152169	0,2100123	0,0650721	0,0794431	1; 1
x_{32}	1	0,823	1,9619555	0,8829444	1,3494005	1,4309285	1,3502947	1; 1
x_{33}	1	1,448	4,6559554	3,9483687	4,0197592	5,4648789	4,2605704	1; 1
x_{34}	1	1,581	1,7754498	0,9501111	2,8804400	1,5609090	1,0542009	1; 0
x_{37}	1	0,786	4,3859026	6,9888290	3,2155555	2,1235514	2,2263451	1; 1
x_{38}	1	1,138	8,849314	9,1274563	8,92754326	7,3331007	7,3749816	1; 1
x_{39}	1	1,327	1,5758281	2,1095378	1,7395587	1,9845389	1,1221381	1; 1
x_{40}	1	1,126	0,4519482	0,45932276	0,49675254	0,44891321	0,42071603	1; 1
x_{41}	1	1,064	0,4581111	0,2100154	0,3841110	0,6547345	0,9810098	1; 0
x_{42}	1	0,555	7,2109008	6,5409119	6,2889629	6,92671123	6,5455000	0; 0

Перш за все, звернемо увагу на події, які закінчуються сумою вихідних сигналів $Y_1, Y_0 = [0, 1]$, тобто однозначним підтвердженням умов, коли аварія стає неможливою. Це

стосується в першу чергу контролю вхідних сигналів x_3 та x_8 , а саме – актуальності своєчасного ремонту всієї залізничної інфраструктури, а також допуску до експлуатації поїздів тільки висококваліфікованих машиністів. За цими параметрами функція початкової біфуркації зведена до мінімуму $\min f_3^{A^{(5)}} = 0,0001 \approx 0$ і $\min f_8^{A^{(5)}} = 0,0023 \approx 0$, відповідно. Те ж саме відноситься до вхідних сигналів x_{25} та x_{27} – своєчасне відновлення видимості ключового світлофора SN109 в сонячну погоду і своєчасне повернення стрілочного переводу з 4-ї на 3-ю колію для другого поїзда. Про це свідчить досягнення мінімального значення параметра функції активації тільки до п'ятого синапсу ($\min f_{25}^{A^{(5)}} = 0,00128$) і ($\min f_{27}^{A^{(5)}} = 0,0021$) відповідно.

Події x_4 та x_6 також залишають простір для уникнення аварійної ситуації, але їх функція сумарної активації в останньому синапсі 0,9589 і 9,7757 відповідно перевищує поріг активації моделі і тому не може бути зарахована як значуща. Для урахування таких подій в моделі потрібно доповнення іншими неврахованими раніше подіями. Але при цьому модель повинна бути перетренованою, що є одним з її недоліків.

Безумовно, нас цікавлять вхідні сигнали в моделях, які однозначно призводять до реалізації ризиків при заданій структурі вхідних сигналів. Вони представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Потенційні ризикові події при заданих вхідних сигналах (x_i)
для моделі нейронної мережі Паддінгтонської аварії (при умовах $\max f_i^{A^{(5)}} \rightarrow 1$)

x_i	Y_1, Y_0	$\max f_i^{A^{(5)}}$	Зміст патерна
x_9	1, 0	1,0124	Системна недостатність видимості світлофорів SN109 на виїзді з Паддінгтона
x_{12}	1, 0	1,1054	Звичка машиністів до вмикання поїзної сигналізації на SN109
x_{17}	1, 0	1,2032	Відсутність досвіду роботи в аварійних ситуаціях у машиніста другого поїзда
x_{28}	1, 0	1,1882	Затримка диспетчером включення червоного світла перед першим потягом
x_{34}	1, 0	1,1542	Наявність повних паливних баків без додаткового захисту від детонації
x_{41}	1, 0	0,82109	Страйки обслуговуючого персоналу та заміна його менш кваліфікованими

Модель показала, що попереднє виключення хоча б однієї будь-якої з можливих помилок в межах траєкторії S8-D16(D17(D18))-C22-B27-A30-A35 не призведе до реалізації образу ризикоутворюючої події (табл. 3). У цьому випадку модель представляє як превентивний захід уникнення події S3, що цілком очевидно, або уникнення події S8, яка пов'язана з попередньою роботою з підготовки машиністів і не завжди поєднується з можливими ризиками конкретного походження. Але такі результати можуть бути підтвержені і візуально (рис. 1), що лише підкреслює правильність роботи NS.

А ось на траєкторії S12-D18-C22-B27-A30-A35 вже потрібно буде усунути дві можливі помилки, щоб мінімізувати ризик, що є більш складним завданням для звичайної профілактики, а без моделювання він не завжди може проявитися, як потенційний ризик. А якщо взяти до уваги комбінації подій S3 і S5, які ми спочатку вважали припущеними з нульовою впевненістю, але в нашій моделі NS вони стають ризикоутворюючими (табл. 3), то результати, отримані моделлю при візуальному огляді цієї траєкторії, взагалі не можуть бути виявлені як передбачені, без моделювання.

Найважливіші помилки в системі, що призводять до реалізації ризику, були пов'язані з подіями в області подієвої невизначеності (біфуркації, рис. 1), а саме B27, B28, B29 і ті, що передують їм – C20, C22, C24. Врахування таких ланцюгів дає можливість забезпечити попередження ризику або на ранніх значних часових інтервалах, або в моменти, що передують виникненню подієвої невизначеності, яка в цьому випадку називається «точкою неповернення».

Представляє інтерес така послідовність подій, як S6(S9(S12))-D18-C22-[біфуркація], що позначена моделлю NS і відсутня на схемі (рис. 1). Вона пов'язана з роботою світлофорів і звично

пасивною реакцією на їх сигнали з боку машиніста в яскравий сонячний день. Ця залежність однозначно призводить до подієвої невизначеності (послідовність біфуркації сигналів в прихованих синапсах системи), яка полягає у втраті диспетчером контролю над послідовністю подій і відсутність будь-яких превентивних дій. Причиною цього є непередбаченість диспетчерського персоналу, яка взагалі не була врахована Комісією, і їх головна помилка, виключення якої могло б завдати ризику матеріалізуватися зі 100% впевненістю. Це результат, який дає модель NS, всупереч виявлених нами причинно-наслідковим подій (рис. 1). Логічне трактування цього ланцюжка подій повністю вписується у відомий сценарій того, що сталося.

Функціональну визначеність іншого виду супроводжують вхідні сигнали x_{20} та x_{24} з аномально малими ваговими коефіцієнтами відносно початкових. Їх зміст при проходженні сигналу через всі п'ять синапсів є незмінно впливовим для системи, але явно невизначеним: факт реалізації образу ризикоутворюючої події існує, але при цьому підтверджується і його відсутність (1, 1). Таке пояснення не є логічним, і NS відкидає його зі значеннями вже навчених вагових коефіцієнтів для цих сигналів. Для інших подібних результатів модель показує приблизно однакові вагові коефіцієнти, що вказує на їх рівну участь у NS.

Висновок

Попередження подібних аварій за допомогою нейронних мереж має зводитися до автоматичного відстеження зображень потенційних ризикоутворюючих подій, закладених при навчанні у NS, та попередження принаймні одного-двох з таких, що відстежуються. Слід зазначити, що така модель NS може бути корисною не тільки для умов Великої Західної головної лінії залізниць Великобританії, але і для інших систем, на які поширюються ті ж правила експлуатації, що і в нашому прикладі. Звичайно, з відповідною перепідготовкою.

Перелік використаних джерел:

1. Ladbroke Grove rail crash. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Ladbroke_Grove_rail_crash (дата звернення: 05.07.2023).
2. Paddington rail disaster: «Her last words to me were goodbye, Daddy». URL: <https://www.telegraph.co.uk/news/uknews/road-and-rail-transport/11124741/Paddington-rail-disaster-Her-last-words-to-me-were-goodbye-Daddy.html> (дата звернення: 10.08.2023).
3. Ladbroke Grove rail disaster. URL: <http://www.london-fire.gov.uk/museum/history-and-stories/historical-fire-and-incidents/Ladbroke-grove-rail-disaster/> (дата звернення: 17.07.2023).
4. Капский Д. В. Теоретические основы прогнозирования аварийности на конфликтных объектах. *Дороги и мосты*. 2006. Вип. 8. С. 83-87.
5. TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems / M. Abadi et al. 2016. 19 p. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467>.
6. Cohen M., Grossberg S. Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1983. Vol. SMC-13. Iss. 5. Pp. 815-826. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1983.6313075>.
7. Data Governance: The definitive guide, and tools to operationalize data trustworthiness / T. Eryurek et al. Beijing-Boston-Tokyo : O'Reilly, 2021. 428 p.

References:

1. Ladbroke Grove rail crash. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Ladbroke_Grove_rail_crash. Accessed on: July 05, 2023.
2. Paddington rail disaster: «Her last words to me were goodbye, Daddy». [Online]. Available: <https://www.telegraph.co.uk/news/uknews/road-and-rail-transport/11124741/Paddington-rail-disaster-Her-last-words-to-me-were-goodbye-Daddy.html>. Accessed on: August 10, 2023.
3. Ladbroke Grove rail disaster. [Online]. Available: <http://www.london-fire.gov.uk/museum/history-and-stories/historical-fire-and-incidents/Ladbroke-grove-rail-disaster/>. Accessed on: July 17, 2023.
4. D.V. Kapskiy, «Teoreticheskiye osnovi prohozyrovaniya avarynosti na konfliktnykh ob'ektakh» [«Theoretical foundations for predicting accidents at conflict sites»], *Dorohy y mosty – Roads and bridges*, vol. 8, pp. 83-87, 2006. (Rus.)
5. M. Abadi et al. *TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems*. 2016. doi: [10.48550/arXiv.1603.04467](https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467).

6. M. Cohen, and S. Grossberg, «Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural networks», *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-13, iss. 5, pp. 815-826, 1983. doi: **10.1109/TSMC.1983.6313075**.
7. T. Eryurek, U. Gilad, V. Lakshmanan, A. Kubunguchy-Grant, and J. Ashdown, *Data Governance: The Definitive Guide, and Tools to Operationalize Data Trustworthiness*. Beijing-Boston-Tokyo: O'Reilly Publ., 2021.

Стаття надійшла 25.12.2023

Стаття прийнята 20.01.2024

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 приставлена бібліографія латиницею **References**, оформлена з використанням стилю цитування IEEE Citation Style.

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; ліве, праве – 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 надрядковими номерами; в нижній частині першої сторінки у вигляді зноски курсивом, розмір шрифту 10 – науковий ступінь, вчене 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, вчене 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 (https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/requirements). Архів видань див.: https://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 27.06.2024 р.

Папір тип № 2. Умов. друк. ар. 26,73. Тираж 100.

Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу. Ціна договірна