

**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 47

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2023

**MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE**

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

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

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

**COLLECTION OF SCIENTIFIC
WORKS**

**Published twice a year,
since 1995**

Issue 47

Section: Technical sciences

Dnipro, 2023

УДК 06.055.2

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2023. Вип. 47. 387 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023>.

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

Головний редактор

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

Відповідальний секретар

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

Редакційна колегія

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

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

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

Телефон редакції: (098) 480-24-03.

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

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

Рекомендовано до друку Вченою Радою ДВНЗ «ПДТУ», протокол № 5 від 28.12.2023 р.

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

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

ЗМІСТ

CONTENTS

**КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**COMPUTER SCIENCE AND
INFORMATION TECHNOLOGY**

**Балалаєва О.Ю., Марченко І.Ф.,
Коротенко Г.М., Бешта Д.О.,
Пікуз А.К.**

Дослідження ефективності роботи серіалізаторів даних мови програмування С# за допомогою розробленого програмного продукту для тестування

8

**O. Balalaieva, I. Marchenko,
G. Korotenko, D. Beshta,
A. Pikuz**

Performance research of C# programming language data serializers using the developed software product for testing

Тузенко О.О., Володін С.І.

Програмне забезпечення для поліпшення якості зображення при збільшенні його формату після зйомки

24

O.A. Tuzenko, S.I. Volodin

The software for improvement of image quality after enlargement

Гончаренко Т.Д., Проніна О.І.

Порівняння алгоритмів оцінки відстані між словами для пошуку схожих речень

32

T.D. Goncharenko, O.I. Pronina

Comparison of algorithms for estimating the distance between words for finding similar sentences

Тузенко О.О., Володін С.І.

Розробка вебдодатку для магазину декоративних рослин за допомогою стеку технологій Laravel + React

39

O.A. Tuzenko, S.I. Volodin

Development of a web application for houseplants e-commerce shop based on technology stack Laravel + React

**Краснопьоров О.В., Кривенко О.В.,
Левицька Т.О.**

Дослідження методологій пошуку текстової інформації із використанням можливостей платформи Elastic

49

**A.V. Krasnoperov, O.V. Kryvenko,
T.O. Levytska**

Research of text information search methods using the capabilities of the Elastic platform

Тузенко О.О., Володін С.І.

Розробка вебдодатку для електронної комерції

58

O.A. Tuzenko, S.I. Volodin

E-commerce application development

**Кажан Д.В., Левицька Т.О.,
Кривенко О.В.**

Визначення типу вибухонебезпечного предмету за допомогою дерева рішень

66

**D.V. Kazhan, T.O. Levytska,
O.V. Kryvenko**

Determining the type of explosive item using a decision tree

Тузенко О.О., Володін С.І.

Вебдодаток для допомоги тимчасово переміщеним особам у Німеччині

73

O.A. Tuzenko, S.I. Volodin

The web application for supporting temporarily relocated persons in Germany

Проніна О.І., Айнагоз А.В.

Система пошуку однакових геометрій при побудові 3-D моделей

82

O. Pronina, A. Aynahoz

A system for finding identical geometries when building 3-D models

Тузенко О.О., Сідун Н.М.

Автоматизована інформаційна система SMM-лідогенерації в месенджері Telegram

88

O.A. Tuzenko, N.N. Sidun

Automated system of SMM lead generation in Telegram messenger

- | | | |
|--|-----|--|
| <p>Сергієнко А.В., Башкісер В.Р., Суцєвський Д.В., Панферова Я.В.
Прогнозування фінансових ринків за допомогою алгоритму випадкового лісу</p> | 100 | <p>A.V. Serhienko, V.R. Bashkiser, D.V. Sushchevsky, Ya.V. Panferova
<i>Forecasting financial markets using the random forest algorithm</i></p> |
| <p>Тузенко О.О., Сідун Н.М., Волобуєв Є.С.
Проектування програмного забезпечення для моніторингу стану атмосфери</p> | 108 | <p>O.A. Tuzenko, N.N. Sidun, Y.S. Volobuiev
<i>Designing of the software for atmospheric environment condition monitoring</i></p> |
| <p>Балалаєва О.Ю., Чичкар'єв Є.А., Зінченко О.В., Сергієнко А.В., Ковальов О.О.
Дослідження та оцінка ефективності методологій розпізнавання рукописних символів з використанням згорткових нейронних мереж</p> | 118 | <p>O. Balalaieva, Ye. Chychkarov, O. Zinchenko, A. Serhienko, O. Kovalov
<i>Research and evaluation of the efficiency of handwritten character recognition methods using convulsional neural networks</i></p> |
| <p>Сергієнко А.В., Єфімов П.С., Обиденний Є.О., Бешта Л.В.
Використання хмарних технологій для автоматичної розсилки повідомлень в Telegram</p> | 135 | <p>A.V. Serhienko, P.S. Yefimov, E.O. Obydennyi, L.V. Beshta
<i>Using of a cloud technologies for automatic sending of notifications in Telegram</i></p> |

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

APPLIED MECHANICS

- | | | |
|---|-----|---|
| <p>Волошин В.С.
Стіна. Унікальні функціональні властивості</p> | 143 | <p>V.S. Voloshin
<i>Wall. Unique functional properties</i></p> |
|---|-----|---|

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

SECTORIAL ENGINEERING

- | | | |
|--|-----|---|
| <p>Суглобов В.В., Лаєрик В.П., Шишкін В.В.
Силовий розрахунок кліщового захоплювача і нова конструкція кернів коловозного крану</p> | 151 | <p>V.V. Suglobov, V.P. Lavryk, V.V. Shishkin
<i>Force calculation and new design of the grip unit pliers metallurgical crane</i></p> |
| <p>Іщенко А.О., Карпенко Т.М., Капустін С.В.
Визначення динамічних складових реакцій в підшипниках дискового валу роторних пил (повідомлення 1)</p> | 164 | <p>A.O. Ishchenko, T.M. Karpenko, S.V. Kapustin
<i>Determination of dynamic component reactions in support bearings of rotor saws for cutting hot rolled (message 1)</i></p> |
| <p>Rassokhin D.O., Nosovska O.V., Kokodey D.V.
Restoration of wear-out equipment using complex method of 3-D scanning and printing</p> | 170 | <p>D.O. Rassokhin, O.V. Nosovska, D.V. Kokodey
<i>Restoration of wear-out equipment using complex method of 3-D scanning and printing</i></p> |
-

МЕТАЛУРГІЯ

METALLURGY

Юшкевич П.О.

Аналіз утворення реакційної зони взаємодії у розплаві конвертеру та систематизація рівнянь з визначення глибини її проникнення

181

P.O. Yushkevych

Analysis of the formation of the reactionary zone of interaction into the melt in converter aggregate and systematization of equations to determine the depth of its penetration

**Asseel Mohammed Kadhim,
Тарасюк Л.І., Козловцев С.В.,
Синельников В.О.**

Вплив нагріву газу на розрахункові надзвукові параметри струменя газопорошку при продувці шлаку в конвертері. Повідомлення 1

191

**Asseel Mohammed Kadhim,
L.I. Tarasiuk, S.V. Kozloutsev,
V.O. Sinelnikov**

The influence of gas heating on the calculated supersonic parameters of gas-powder flow at slag blower in the converter. Message 1

**Asseel Mohammed Kadhim,
Тарасюк Л.І., Козловцев С.В.,
Синельников В.О.**

Вплив нагріву газу на розрахункові надзвукові параметри струменя газопорошку при продувці шлаку в конвертері. Повідомлення 2

198

**Asseel Mohammed Kadhim,
L.I. Tarasiuk, S.V. Kozloutsev,
V.O. Sinelnikov**

The influence of gas heating on the calculated supersonic parameters of gas-powder flow at slag blower in the converter. Message 2

Григоренко В.У., Овсяников В.В.

Розвиток методу визначення параметрів деформування і залишкових напружень металу у виробництві прямошовних труб великих діаметрів з застосуванням експандування

207

V.U. Hryhorenko, V.V. Ovsianikov

Development of the method for determining the deformation parameters and residual stresses of metal in the manufacture of straight-seamed pipes of large diameter using expansion

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

**Чорна В.О., Кудряшов О.О.,
Біленко С.С.**

Оцінка потенціалу сонячної енергетики для живлення об'єктів комунального господарства міст

214

**V.O. Chorna, O.O. Kudryashov,
S.S. Bilenko**

Assessment of the potential of solar energy to power municipal utilities

Лисяк В.Г.

Моделювання динамічних режимів узагальненої помпової станції з асинхронним електроприводом відцентрових помп

223

V.H. Lysiak

Modeling of dynamic modes of a generalized pumping station with an asynchronous electric drive of centrifugal pumps

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-
ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**AUTOMATION AND COMPUTER-
INTEGRATED TECHNOLOGIES**

**Хлопенко М.Я., Поливода В.В.,
Шарко О.В., Онишко Д.М.**

Автоматизація процесів уникнення слемінгу судна

233

**M. Khlopenko, V. Polyvoda,
O. Sharcko, D. Onyshko**

Automation of vessel slamming avoidance processes

Черниш Г.О., Савенко О.С.

Система стабілізації кута нахилу 241
самобалансуючого робота

H.O. Chernysh, O.S. Savenko

The angle stabilization system of the self-
balancing robot

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

CIVIL SECURITY

**Кухар В.В., Кас'яненко С.Ф.,
Бурко В.А.**

Удосконалення засобів індивідуального захисту від падіння з висоти методами фокальних об'єктів та контрольних запитань 249

**V.V. Kukhar, S.F. Kasianenko,
V.A. Burko**

Improvement of individual protection equipment against falls from a height using the methods of focal objects and control questions

Кухар В.В., Слюта В.В.

Вдосконалення процесу розслідування нещасних випадків на виробництві методом фокальних об'єктів 259

V.V. Kukhar, V.V. Sliuta

Improving the process of investigating industrial accidents using the focal object method

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

RIVER AND SEA TRANSPORT

**Khudyakov I.V., Gritsuk I.V.,
Pohorletskyi D.S., Bulgakov M.P.,
Chernenko V.V., Litvinov M.E.**

Peculiarities of ship power plant diagnostics using the ERS-500 TechSim TRANSAS MIP LTD simulator complex in the process of ship engineers' training 273

**I.V. Khudyakov, I.V. Gritsuk,
D.S. Pohorletskyi, M.P. Bulgakov,
V.V. Chernenko, M.E. Litvinov**

Peculiarities of ship power plant diagnostics using the ERS-500 TechSim TRANSAS MIP LTD simulator complex in the process of ship engineers' training

Гусак І.Л.

Дослідження факторів ризику плавання судна в акваторії морського порту 280

I.L. Husak

Research of risk factors for tanker navigation in the seaport area

**Bigun S.V., Simanenkova A.L.,
Ivanov A.A., Gytnyk D.V.,
Polyvoda V.V.**

Analysis of the current state of ship monitoring systems and ways to their improving 287

**S.V. Bigun, A.L. Simanenkova,
A.A. Ivanov, D.V. Gytnyk,
V.V. Polyvoda**

Analysis of the current state of ship monitoring systems and ways to their improving

Головань А.І.

Формування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден за рахунок цифрових стратегій 297

A.I. Golovan

Formation of optimal parameters of the cargo ship maintenance system through digital strategies

Дудченко С.

Удосконалення математичної моделі району плавання для оптимального маршруту переходу судна 305

S. Dudchenko

Improvement of the mathematical model of the navigation area for the optimal ship passage route

**Грицук І.В., Головань А.І.,
Поліщук О.В., Літвінов М.Є.,
Головащенко О.В.**

Особливості алгоритмів моніторингу показників експлуатації засобів транспорту 312

**I.V. Gritsuk, A.I. Golovan,
O.V. Polishchuk, M.Ye. Litvinov,
O.V. Holovashchenko**

Peculiarities of algorithms for monitoring vehicle performance

**Петровський А.В.,
Ісайчев А.Г., Злобін Ю.О.**

Засади розрахування та налагодження навігаційних параметрів безпечних глибин при плануванні маршруту

324

**A.V. Petrovskiy,
A.G. Isaychev, Y.O. Zlobin**

On the issue of adjustment and calculation of navigation depth parameters during route creating

Калініченко Є.В., Постніков Є.Є.

Метод визначення траєкторії сейсмічного обладнання при стаціонарному характері морського буксирування

336

Y.V. Kalinichenko, Y.Y. Postnikov

Method of determining the trajectory of seismic equipment in the stationary character of sea towing

Мельник О.В., Сорока В.В.

Вібродіагностика головної енергетичної установки суден: вдосконалення та інтеграція методів

349

O.V. Melnik, V.V. Soroka

Vibration diagnostics of the main power plant of vessels: improvement and integration of methods

Шапиро Г.В.

Дослідження стійкості роботи нейромережі в системі ідентифікації надводної обстановки

360

H. Shapiro

Investigation of the stability of the neuronetwork in the surface identification system

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

ROAD TRANSPORT

**Фалендиш А.П., Помазков М.В.,
Ганжеєв Д.І.**

Розвиток методів впливу на психоемоційний стан учасників дорожнього руху як транспортну надсистему

371

**A.P. Falendysh, M.V. Pomazkov,
D.I. Ganzheev**

Development of methods of influence on the psycho-emotional state of traffic participants as a transport supersystem

**Симоненко Р.В., Шиманський С.І.,
Грицук І.В., Погорлецький Д.С.**

Біогаз як добавка до стисненого природного газу для двигунів транспортних засобів

379

**R.V. Symonenko, S.I. Shymanskyi,
I.V. Gritsuk, D.S. Pohorletskyi**

Biogas as an additive to compressed natural gas for vehicle engines

ДО УВАГИ АВТОРІВ

387 INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

122 КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 004.75

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.299923

© Балаласва О.Ю.¹, Марченко І.Ф.², Коротенко Г.М.³, Бешта Д.О.⁴,
Пікуз А.К.⁵

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СЕРІАЛІЗАТОРІВ ДАНИХ МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ C# ЗА ДОПОМОГОЮ РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ПРОДУКТУ ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ

У статті розглянуто питання використання серіалізаторів даних для реалізації проєктів, пов'язаних з обробкою великих обсягів даних, а також із підтримкою високошвидкісної передачі даних у розподілених системах. Показано, що в даному контексті вибір найбільш ефективного механізму серіалізації має критичне значення для забезпечення продуктивності та масштабованості додатків. Метою даної роботи є дослідження ефективності роботи серіалізаторів даних мови програмування C# за допомогою розробки програмного продукту для тестування серіалізаторів з використанням різних за обсягом і типом даних об'єктів. Проведено огляд наукових досліджень застосування різних форматів серіалізації даних: XML, JSON, BSON, MessagePack, Smile, Protocol Buffers, Flat Buffers, Apache Thrift. Зроблено висновок, що найбільш популярними на сьогодні є формати XML та JSON, виконано їх порівняльний аналіз. Обґрунтовано доцільність використання JSON-формату серіалізації, що обумовлено його безпечністю у порівнянні з бінарним форматом, меншим розміром у порівнянні з XML-форматом, а також підтримкою більшістю засобів розробки програмних продуктів. Обрано платформу .NET, яка надає стандартні інструменти для JSON-серіалізації мови програмування C#, а саме: System.Runtime.Serialize.Json та System.Text.Json, які постачаються за замовчанням. Проаналізовано найбільш популярні програмні рішення для серіалізації об'єктів C#, показано доцільність тестування таких серіалізаторів, як Jil, Json.NET, Utf8Json, SpanJson та стандартних серіалізаторів з метою виявлення переваг та недоліків їхнього використання для реалізації конкретних задач та проєктів. Для створення програми-тестувальника обрано бібліотеку мови програмування C# BenchmarkDotNet. Зазначено, що даний фреймворк платформи .NET дозволяє перетворювати методи на тести та створювати тестування ефективності завдяки потужному статистичному механізму. Наведено діаграму класів та діаграму компонентів розробленого програмного забезпечення. Проведено дослідження 5 серіалізаторів даних, які включали виконання 7 експериментів з серіалізації об'єктів з різними типами даних. Проаналізовано витрати часу та оперативної пам'яті при серіалізації малого та великого об'єктів; об'єктів, що містять одновимірні, двовимірні та тривимірні масиви натуральних чисел, об'єкта зі складним ланцюгом спадкування класів, а також об'єкта, що містить словник. Результати

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1461-4399, balalaevaeu@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0002-4566-3866, irsa665@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3774-5260, korotenko.g.m@nmu.one

⁴ канд. техн. наук, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-2848-2737, beshta.d.o@nmu.one

⁵ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, lokrastr@gmail.com

експериментальних досліджень показали залежність ефективності серіалізаторів від типу та обсягу даних, які потрібно серіалізувати. Зроблено висновок, що не існує універсального серіалізатора, який буде показувати найкращі результати в усіх випадках. Надано рекомендації щодо використання різних серіалізаторів з урахуванням вимог конкретного проєкту.

Ключові слова: серіалізація даних, серіалізатор, мова програмування C#, формат JSON, платформа .NET.

O. Balalaieva, I. Marchenko, G. Korotenko, D. Beshta, A. Pikuz. Performance research of C# programming language data serializers using the developed software product for testing. The article deals with the issue of using data serializers for the implementation of projects related to the processing of large volumes of data, as well as the support of high-speed data transmission in distributed systems. It is shown that in this context, the choice of the most effective serialization mechanism is critical for ensuring the performance and scalability of applications. The purpose of this work is to study the effectiveness of data serializers of the C# programming language by developing a software product for testing serializers using objects of different size and type. A review of scientific research on the use of various data serialization formats: XML, JSON, BSON, MessagePack, Smile, Protocol Buffers, Flat Buffers, Apache Thrift was conducted. It was concluded that XML and JSON formats are the most popular today, and their comparative analysis was performed. The expediency of using the JSON serialization format is substantiated, which is due to its safety compared to the binary format, its smaller size compared to the XML format, as well as the support of most software development tools. The .NET framework is chosen, which provides standard tools for JSON serialization of the C# programming language, namely: System.Runtime.Serialize.Json and System.Text.Json, which are supplied by default. The most popular software solutions for serializing C# objects are analyzed, the feasibility of testing such serializers as Jil, Json.NET, Utf8Json, SpanJson and standard serializers is shown in order to identify the advantages and disadvantages of their use for the implementation of specific tasks and projects. The C# BenchmarkDotNet programming language library was chosen to create the tester program. It is noted that this framework of the .NET platform allows you to convert methods into tests and create performance testing thanks to a powerful statistical mechanism. A class diagram and a component diagram of the developed software are given. A study of 5 data serializers was conducted, which included the execution of 7 experiments on serialization of objects with different types of data. The consumption of time and working memory during serialization of small and large objects was analyzed; objects containing one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional arrays of natural numbers, an object with a complex chain of class inheritance, as well as an object containing a dictionary. The results of experimental studies showed the dependence of the effectiveness of serializers on the type and volume of data to be serialized. It is concluded that there is no one-size-fits-all serializer that will perform best in all cases. Recommendations for the use of various serializers are provided, taking into account the requirements of a specific project.

Key words: data serialization, serializer, C# programming language, JSON format, .NET platform.

Постановка проблеми. При розробці програмних продуктів у сучасному світі інформаційних технологій центральну роль грають дані. Серіалізація є необхідним, надійним і зручним у застосуванні механізмом для зберігання, передачі та обміну даними між додатками, є невід'ємною частиною розробки додатків та може істотно впливати на їх продуктивність.

Серіалізація – це процес переведення будь-якої структури даних в послідовність бітів. Зворотню до операції серіалізації є операція десеріалізації (структуризації) – відновлення початкового стану структури даних з бітової послідовності. Ця послідовність може бути як бінарним представленням цих даних, так і текстовим [1]. Використання цієї технології дозволяє зручно зберігати данні великого обсягу у бажаному з доступних форматів. Максимальний термін існування будь-якого об'єкта при звичайному виконанні програми обмежений терміном виконання

цієї програми – від запуску до завершення її роботи. Сериалізація дає можливості для збереження стану екземпляра об'єкта поза циклом виконання програми, у межах якої цей екземпляр об'єкта створюється. Результатом роботи процедури серіалізації є форма, яку можна зберігати або передати між різними програмами, що виконуються як на одному пристрої, так і між програмними продуктами, що працюють на різних пристроях. При цьому реалізується ідея кросплатформності – немає значення, на якій операційній системі працює програмний продукт, серіалізація перетворює потрібний об'єкт або дерево об'єктів на потік байтів, який може бути відновлений на будь-якій операційній системі. Сериалізація необхідна для перетворення об'єкта на текстовий формат.

При роботі з великими обсягами даних або з високонавантаженими системами вибір механізму серіалізації є критично важливим, причому ефективність її застосування буде залежати від багатьох факторів, таких як швидкість серіалізації та десериалізації, обсяг серіалізованих даних та споживання ресурсів тощо. Вибір того чи іншого серіалізатора залежить не тільки від технологій, на яких він базується, але й від даних, які безпосередньо потрібно серіалізувати у конкретному проєкті, а також наявних можливостей технічної бази. Саме тому використання програми-тестувальника дозволить визначити ефективний серіалізатор для кожного конкретного випадку використання даних.

Метою даної роботи є дослідження ефективності роботи серіалізаторів даних мови програмування C# за допомогою розробки програмного продукту для тестування серіалізаторів з використанням різних за обсягом і типом даних об'єктів..

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вирішити проблему вибору протоколу серіалізації для розробки довільного програмного забезпечення можна лише після аналізу основних переваг та недоліків існуючих протоколів та визначення рекомендованих сфер їх застосування, що дозволить обґрунтовано підійти до вибору протоколу при реалізації конкретного проєкту.

Автори [1] порівнюють роботу таких найбільш популярних протоколів серіалізації даних, як JSON і XML, з Protobuf, при цьому в якості основних недоліків перших двох зазначають наявність лише низькорівневих інструментів для роботи з ними, завеликі обсяги серіалізованих даних та відсутність гарантії цілісності та захищеності даних. У роботі також виокремлено й переваги усіх трьох серіалізаторів. Наприклад, XML дозволяє забезпечити максимальну сумісність з існуючими системами, а JSON та Protobuf задовольняють вимоги при серіалізації складних типів об'єктів в автоматизованих системах з підвищеними вимогами до продуктивності, хоча зазначається, що Protobuf має перевагу з точки зору безпеки передачі даних.

У статті [2] проведено порівняльний аналіз показників роботи більш широкого переліку текстових (JSON, XML) та бінарних форматів серіалізації даних (з серіалізацією схеми даних – BSON, Smile, MessagePack, без серіалізації схеми даних – ThriftBin, Compact, Protobuf, Flatbuf), при цьому увагу зосереджено на доцільності використання додаткової компресії при серіалізації/десериалізації даних. Авторами зроблено висновок, що такі бінарні формати серіалізації даних, як BSON та MessagePack, потребують більше часу на серіалізацію/десериалізацію, ніж такий текстовий формат, як JSON. Авторами також зазначається, що при застосуванні компресії розмір повідомлень, серіалізованих у вищенаведених форматах, майже не відрізняються.

У роботі [3] проведено аналіз тих же серіалізаторів, при цьому зроблено висновок, що хоча й для кодування малих повідомлень найбільш ефективним форматом є Protocol Buffers, але це супроводжується суттєвим збільшенням розміру скомпільованої програми. Авторами зазначається, що застосування бінарних протоколів зі строгою схемою є більш складним у порівнянні з текстовими форматами, такими як XML та JSON, однак останні неефективні для серіалізації структурованих даних, тож в якості компромісу пропонуються бінарні дані з нестрогою схемою.

Авторами [4] розглянуто окремі методи серіалізації: Protobuf, Kryo, Protostuff (підтримує формати JSON, XML, YAML, KVP) та Jackson (пропонує три варіанти обробки JSON). Аналіз отриманих залежностей часу серіалізації/десериалізації від кількості об'єктів показав, що за цим критерієм найбільш ефективним є метод Protobuf.

Окремими авторами [5] запропоновано використання власного формату серіалізації та механізму десериалізації даних, наприклад, для врахування специфіки сутностей у реляційній моделі та підвищення продуктивності роботи програмного забезпечення, що потребувало великої роботи з побудови концепції експериментального формату.

Дослідження закордонних авторів присвячені в основному порівнянню XML, JSON з іншими текстовими серіалізаторами.

Автори [6] виділяють серіалізатори XML та JSON як найвідоміші формати текстових даних, порівнюючи їх з відносно новими форматами двійкової серіалізації Protocol Buffers та Thrift.

У роботах, присвячених сфері Інтернету речей (IoT), проведено, наприклад, порівняльне дослідження форматів JSON та EXI [7], рекомендованих технічними специфікаціями ETSI M2M, а також нового формату саме для цих середовищ – PSON [8], який дозволяє спростити завдання серіалізації/десеріалізації та мінімізувати кількість повідомлень.

У роботі [9] проведено дослідження 12 бібліотек серіалізації об'єктів у форматах XML, JSON та у бінарних форматах, а в якості ефективності роботи оцінювали розмір серіалізованих файлів та час обробки. Проведений аналіз дозволив зробити висновки, що застосування кожної окремої бібліотеки доцільно в тому контексті, в якому вона була розроблена, що потребує індивідуального підходу в рамках конкретних проєктів.

Приклад такого дослідження наведено у статті [10], авторами якої розроблено ізольоване від решти операційної системи середовище для тестування, яке є відкритим та автоматизованим. Досліджувалися формати серіалізації XML, JSON, MessagePack, Avro, буфери протоколів, а також власний формат серіалізації і власні серіалізації. Процеси серіалізації та десеріалізації протестовано на PHP, Java та JavaScript з використанням 49 різних офіційних і сторонніх бібліотек, що дозволило виявити велику різницю в часі обробки між бібліотеками.

У даній роботі прийнято рішення провести дослідження серіалізаторів мови програмування C#, що не знайшло відображення у розглянутих вище дослідженнях.

На основі проведеного аналізу публікацій було виокремлено наступні популярні формати серіалізації даних: XML, JSON, BSON, MessagePack, Smile, Protocol Buffers, Flat Buffers, Apache Thrift, характеристику яких наведено нижче.

XML (Extensible Markup Language) – формат, який описує клас об'єктів даних, що називаються XML-документами, і частково описує поведінку комп'ютерних програм, які їх обробляють.

JSON (JavaScript Object Notation) – текстовий незалежний формат, який використовує конвенції мов програмування сімейства C. JSON побудований на двох структурах: колекції пар «назва/значення» та упорядковані списки значень, що реалізуються як масив, вектор, список або послідовність.

BSON (Binary JSON) – як і JSON, BSON підтримує багаторівневі структури документів та масивів. BSON можна порівнювати з бінарними форматами обміну, наприклад, Protocol Buffers. На відміну від останнього, він більш гнучкий. Однак BSON має накладні витрати, адже схема даних передається разом із самими даними.

Smile – бінарний формат даних, еквівалент стандартного формату даних JSON. Дані кодуються по секціях. Кожна секція складається з набору токенів, які формують відповідні ключі та значення.

MessagePack – механізм серіалізації/десеріалізації об'єктів та формат обміну даними, подібний до BSON та Smile. В MessagePack є своя система типів та присутні оптимізації для складних об'єктів та бінарних/текстових даних довільної довжини.

Protocol Buffers – нейтральний та платформи-незалежний спосіб серіалізації та передачі структурованих даних, розроблений Google. Кожне повідомлення в Protocol Buffers є невеликим логічним записом інформації, що містить серію пар «ім'я-значення».

Flat Buffers – формат та метод серіалізації даних, подібний до Protocol Buffers, але спеціально розроблений для систем із дійсно високим навантаженням. Його особливість полягає в оптимізованому використанні системних ресурсів – як часу на серіалізацію/десеріалізацію, так і на розмір використовуваної пам'яті. Flat Buffers надає доступ до даних без процесу серіалізації/десеріалізації.

Apache Thrift – механізм серіалізації з нижчими накладними витратами на відміну від таких альтернатив, як SOAP, за рахунок використання двійкового формату.

Серед наведеного переліку вирішено зосередити увагу на двох найпопулярніших форматах серіалізації даних – XML та JSON (бінарна серіалізація не розглядалася через виявлені вразливості десеріалізації для мови C#), при цьому слід зауважити, що кожний з них має декілька реалізацій із різними перевагами та недоліками. Цим обумовлена проблема із вибором конкретного протоколу, що буде використовуватись при написанні програмного забезпечення.

Порівняльний аналіз форматів XML та JSON дозволив виявити наступні спільні властивості: зрозумілість як для комп'ютера, так і для людини (наявна можливість редагування); широке застосування й підтримка у багатьох мовах програмування; формати є текстовими за відображенням структури даних і мають ієрархічну структуру даних, у якій кожне поле має своє ім'я та значення.

Перевагою XML у порівнянні JSON є підтримка додаткових типів даних, таких як логічні масиви, дати, зображення та простори імен.

Натомість можна виділити цілий ряд переваг JSON у порівнянні з XML, які полягають в наступному: JSON є більш простим та гнучким форматом серіалізації, має менший розмір файлів, використовує менше пам'яті й забезпечує більш швидку передачу даних. JSON – це засіб простого та компактного зберігання даних, його легше читати та редагувати. XML може зберігатись тільки у вигляді текстових файлів, у той час як JSON окрім текстового файлу може використовуватись разом з JavaScript. JSON відмінно підходить для обміну інформацією між програмними додатками. JSON більш поширений, тому не виникає проблем з кросплатформною сумісністю. Суттєвим аргументом на користь JSON є більший рівень безпеки, ніж у XML.

Отже, проаналізувавши наведені відмінності XML та JSON форматів, у даній роботі було вирішено дослідити саме JSON-серіалізацію, що обумовлено її актуальністю, поширеним використанням та необхідним рівнем безпеки.

Аналіз найбільш популярних програмні рішень для серіалізації об'єктів C# показав доцільність подальшого тестування таких серіалізаторів, як Jil, Json.NET (Newtonsoft.Json), Utf8Json та SpanJson з метою виявлення переваг та недоліків їхнього використання для конкретних задач.

Виклад основного матеріалу. У даній статті представлено розроблене авторами програмне забезпечення для тестування серіалізаторів з використанням різних за обсягом і типом даних об'єктів, що використовуються у програмних рішеннях, написаних мовою програмування C#.

Програма-тестувальник дозволяє визначити параметри роботи різних серіалізаторів даних для формату JSON, а також порівняти їх ефективність при серіалізації різних об'єктів. Результати проведених досліджень дозволять обґрунтувати вибір найбільш результативних серіалізаторів для умов окремих практичних проєктів відповідно до різних типів даних. Основним критерієм оцінки роботи серіалізаторів обрано час на серіалізацію та обсяг спожитої оперативної пам'яті.

Діаграма класів програми-тестувальника серіалізаторів (рис. 1) включає наступні класи:

– `SerializationTestSmall` – описує екземпляр об'єкту невеликого розміру, що містить розповсюджені типи даних та методи серіалізації, що застосовуються до цього екземпляру об'єкту;

– `SerializationTestBig` – даний клас описує екземпляр об'єкту великого розміру, що містить окрім розповсюджених типів даних, також складні типи, які самі по собі є класами (клас `BirthDate`, клас `Address`), та складні типи формату відображення часу (`DateTime`);

– `SerializationTestLongInheritance` – завданням цього класу є тестування ефективності серіалізації екземпляру об'єкту, який утворено від класу з великим ланцюгом наслідування (серіалізації такого екземпляру об'єкту вимагає від серіалізаторів створення об'єктного графу, який містить множину взаємозалежних об'єктів);

– `SerializationTestSimpleArray` – даний клас демонструє поведінку серіалізаторів при серіалізації типу даних числовий масив `int[]`;

– `SerializationTestSimpleArray2d` – цей клас показує, на скільки зростає навантаження (уповільнюється робота) на серіалізатори при серіалізації двовимірного числового масиву `int[,]` на відміну від одновимірного, який описано у попередньому класі;

– `SerializationTestSimpleArray3d` – клас описує екземпляр об'єкту трьохвимірного масиву `int[,,,]`, також демонструє різницю швидкодії порівняно з двовимірним та одновимірним масивами;

– `SerializationTestDictionary` – описує екземпляр об'єкту словник, що складається з пар «ключ – значення», типів «рядок – число» (`string, int`).

Кожен з вищеописаних класів створює відповідний екземпляр об'єкту. Безпосередньо класи, що описують об'єкти, потрібні кожному класу для створення екземпляру, описано окремо: `SmallClass`, `BigClass`, `Developer`, `SimpleArrayClass`, `Array2dClass`, `DictionaryClass`.

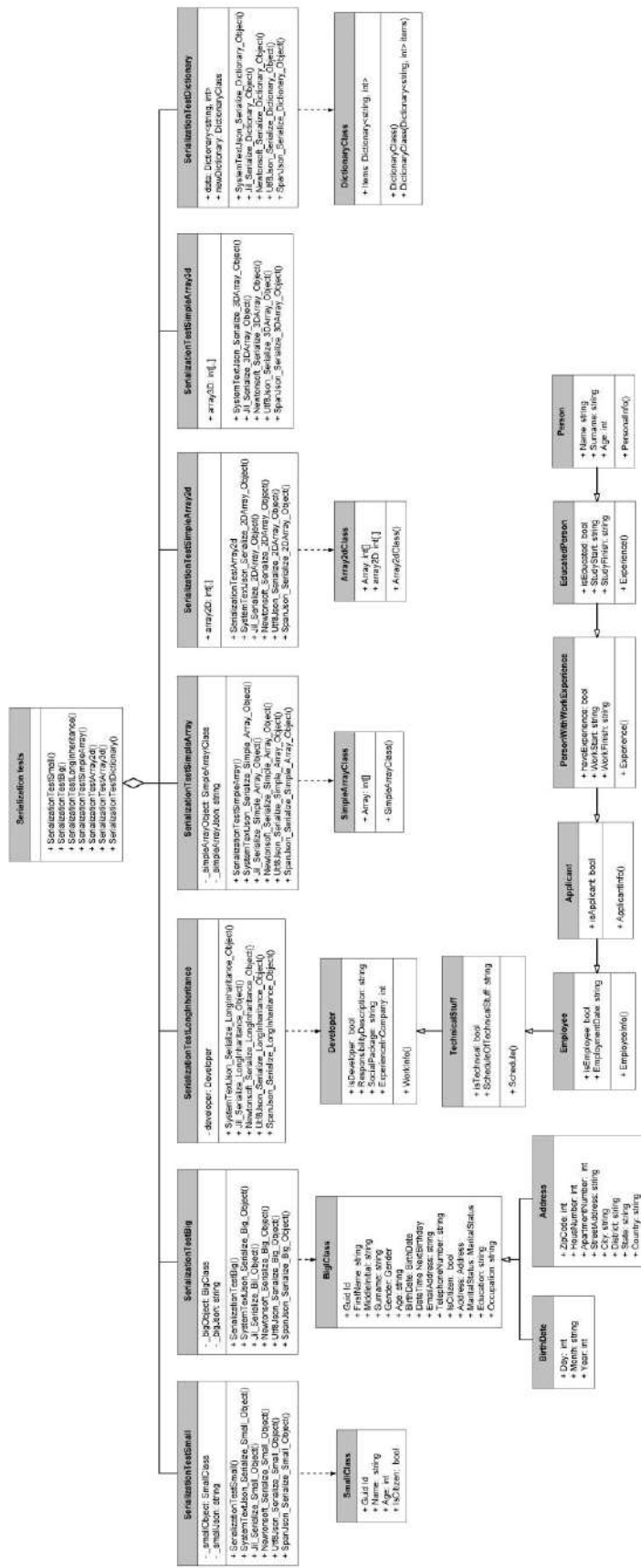


Рис. 1 – Діаграма класів програми-тестувальника серіалізаторів

У рамках даного дослідження для побудови діаграми компонентів програми-тестувальника серіалізаторів (рис. 2) використано підключені програмні пакети, необхідні для коректного проведення експериментів.

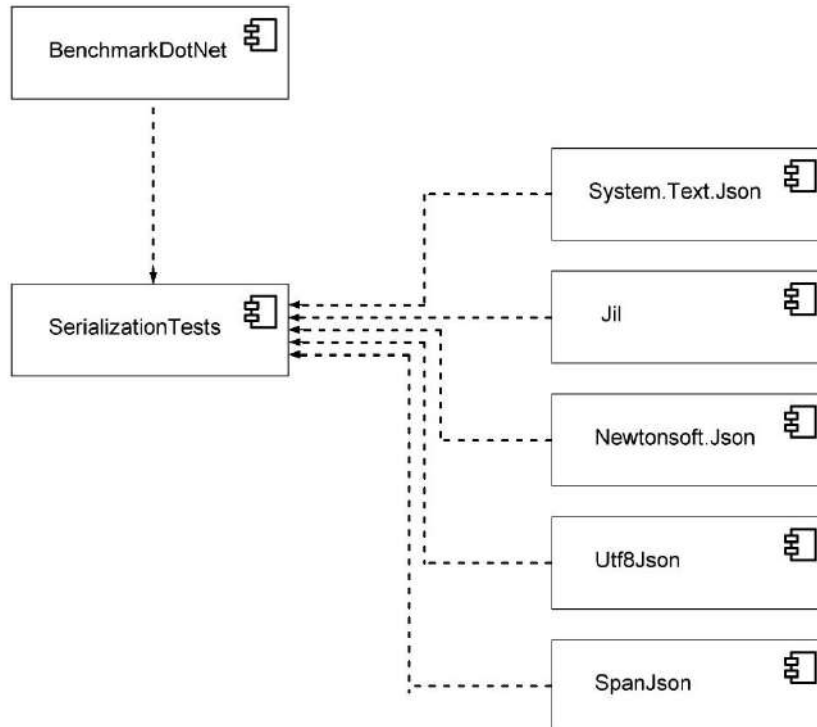


Рис. 2 – Діаграма компонентів програми-тестувальника серіалізаторів

Розробка програмного забезпечення здійснювалася з використанням мови програмування C#, а в якості середовища розробки було обрано Microsoft Visual Studio. Програмні пакети, зображені на діаграмі, підключали за допомогою менеджера пакетів NuGet.

Виконання програми складається з 7 етапів, кожен з яких є окремим експериментом тестування серіалізаторів на вказаному типі даних. Кожний етап представляє собою створення екземпляру класу, який буде використовуватись як вхідні дані для серіалізації. Після створення об'єкту (він же екземпляр класу) його послідовно серіалізують 5 серіалізаторів, які було обрано для участі в експерименті (вони є окремими програмними пакетами і вимагають підключення для застосування в проєкті):

- System.Text.Json;
- Jil;
- Newtonsoft.Json;
- Utf8Json;
- SpanJson.

Фреймворк BenchmarkDotNet здійснює послідовні навантаження на кожний з серіалізаторів та формує звіт результатів порівняння серіалізаторів у зручному вигляді.

Схема взаємодії програмних модулів, показана на рис. 3, зображує послідовність виконання запланованих експериментів, які відрізняються між собою типами даних та обсягом навантаження.

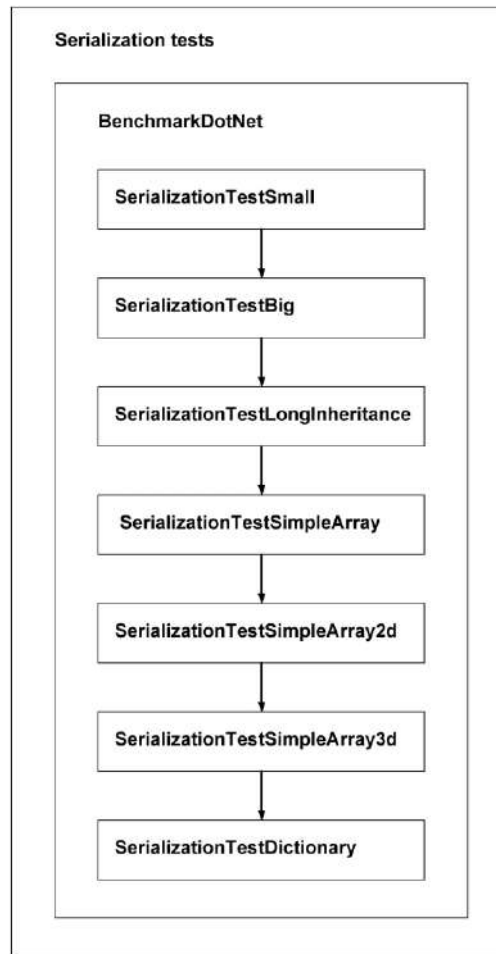


Рис. 3 – Схема взаємодії програмних модулів тестувальника серіалізаторів
 Приклад роботи програми-тестувальника Serialization tests наведено на рис. 4.

```

// *****
// Benchmark: SerializationTests\Small\SystemTextJson.Serialize_Small_Object: DefaultJob
// ** Execute **
// Launch: 1 / 1
// Execute: dotnet BenchmarkDotNet-F18B-476D-84E1-C9F1EED1132D.dll --anonymizePipes 1132 1948 --benchmarkName SerializationTests.SerializationTests.SerializationTestSmall.SystemTextJson.Serialize_Small_Object --job DefaultJob --benchmarkId 8 in C:\Users\llozra\source\repos\SerializationTests\SerializationTests\bin\Release\net6.0\U02004FC-F18B-476D-84E1-C9F1EED1132D\bin\Release\obj\B
// BeforeAnythingElse

// Benchmark Process Environment Information:
// BenchmarkDotNet version: 0.13.2
// Runtime: NET 6.0.25 (6.0.2523.51912), X64 RyuJIT AVX2
// GC: Concurrent Workstation
// HardwareIntrinsics=AVX2,AES,BRI1,BRI2,FPMA,LZCNT,PCLMUL,POPCNT,VectorSize=256
// Job: DefaultJob

OverheadLifting 1: 1 op, 423600.00 ns, 423.6000 us/op
WorkloadLifting 1: 1 op, 1132000.00 ns, 1.1320 ms/op

OverheadLifting 2: 16 op, 829200.00 ns, 51.8250 us/op
WorkloadLifting 2: 16 op, 851000.00 ns, 53.1875 us/op

WorkloadPilot 1: 16 op, 60800.00 ns, 3.8000 us/op
WorkloadPilot 2: 32 op, 137500.00 ns, 4.2969 us/op
WorkloadPilot 3: 64 op, 259000.00 ns, 4.0469 us/op
WorkloadPilot 4: 128 op, 161000.00 ns, 12.5781 us/op
WorkloadPilot 5: 256 op, 499000.00 ns, 1.9531 us/op
WorkloadPilot 6: 512 op, 169900.00 ns, 2.0856 us/op
WorkloadPilot 7: 1024 op, 159400.00 ns, 1.5574 us/op
WorkloadPilot 8: 2048 op, 509120.00 ns, 2.4768 us/op
WorkloadPilot 9: 4096 op, 979400.00 ns, 2.4119 us/op
WorkloadPilot 10: 8192 op, 2293500.00 ns, 2.8007 us/op
WorkloadPilot 11: 16384 op, 3930700.00 ns, 2.3991 us/op
WorkloadPilot 12: 32768 op, 8889400.00 ns, 2.7161 us/op
WorkloadPilot 13: 65536 op, 11820300.00 ns, 1.7674 us/op
WorkloadPilot 14: 131072 op, 22178320.00 ns, 1.6915 us/op
WorkloadPilot 15: 262144 op, 19603200.00 ns, 750.7065 ns/op
WorkloadPilot 16: 524288 op, 336564200.00 ns, 676.2775 ns/op
WorkloadPilot 17: 1048576 op, 670611800.00 ns, 641.9383 ns/op
    
```

Рис. 4 – Запуск виконання тестів серіалізаторів

На рис. 5 наведено інформацію про стан поточних операцій тестування: кількість виконаних операцій, час виконання операцій (в наносекундах) та час виконання однієї операції. Тестування здійснювалося на різних обсягах даних.

```

OverheadJitting 1: 1 op, 423400.00 ns, 423.4000 us/op
WorkloadJitting 1: 1 op, 1132000.00 ns, 1.1320 ms/op

OverheadJitting 2: 16 op, 829200.00 ns, 51.8250 us/op
WorkloadJitting 2: 16 op, 891000.00 ns, 55.6875 us/op

WorkloadPilot 1: 16 op, 64900.00 ns, 4.0563 us/op
WorkloadPilot 2: 32 op, 137500.00 ns, 4.2969 us/op
WorkloadPilot 3: 64 op, 259900.00 ns, 4.0609 us/op
WorkloadPilot 4: 128 op, 1610100.00 ns, 12.5789 us/op
    
```

Рис. 5 – Інформація про стан поточних операцій тестування

Після закінчення кожного з 7 експериментів формується звіт (рис. 6), який містить технічні та програмні характеристики системи, на базі якої було проведено тестування, а також сформовану таблицю з результатами роботи серіалізаторів.

```

// * Summary *
BenchmarkDotNet v0.13.9+228a464e8be6c58ead9408e98f18813f6407fb5a, Windows 11 (10.0.22621.2715/22H2/2022Update/SunValley2)
Intel Pentium Gold 7565 2.00GHz, 1 CPU, 4 logical and 2 physical cores
.NET SDK 8.0.100
[Host] : .NET 6.0.25 (6.0.2523.51912), X64 RyuJIT AVX2
DefaultJob : .NET 6.0.25 (6.0.2523.51912), X64 RyuJIT AVX2

| Method | Mean | Error | StdDev | Rank | Gen0 | Allocated |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| SystemTextJson_Serialize_Small_Object | 640.6 ns | 5.34 ns | 5.00 ns | 4 | 0.3519 | 736 B |
| Jil_Serialize_Small_Object | 385.2 ns | 7.30 ns | 7.50 ns | 3 | 0.4663 | 976 B |
| Newtonsoft_Serialize_Small_Object | 1,151.5 ns | 22.59 ns | 30.91 ns | 5 | 0.8069 | 1856 B |
| Utf8Json_Serialize_Small_Object | 274.6 ns | 5.31 ns | 5.90 ns | 2 | 0.1144 | 240 B |
| SpanJson_Serialize_Small_Object | 295.1 ns | 3.58 ns | 3.35 ns | 1 | 0.1147 | 240 B |

// * Hints *
Outliers
SerializationTestSmall.Jil_Serialize_Small_Object: Default -> 1 outlier was removed, 3 outliers were detected (367.65 ns, 371.79 ns, 482.14 ns)

// * Legends *
Mean : Arithmetic mean of all measurements
Error : Half of 99.9% confidence interval
StdDev : Standard deviation of all measurements
Rank : Relative position of current benchmark mean among all benchmarks (Arabic style)
Gen0 : GC Generation 0 collects per 1000 operations
Allocated : Allocated memory per single operation (managed only, inclusive, 1KB = 1024B)
1 ns : 1 Nanosecond (0.000000001 sec)

// * Diagnostic Output - MemoryDiagnoser *

// ***** BenchmarkRunner: End *****
Run time: 00:01:49 (109.49 sec), executed benchmarks: 5
Global total time: 00:02:08 (128.61 sec), executed benchmarks: 5
    
```

Рис. 6 – Звіт про проведений експеримент з результатами ефективності серіалізаторів

Таблиця звіту проведеного експерименту (див. рис. 6) містить наступну інформацію (опис параметрів наведено у вікні після таблиці):

- Method – перелік серіалізаторів, які брали участь в експерименті із зазначенням, об’єкт якого класу вони серіалізують;
- Mean – середнє арифметичне швидкості серіалізації при роботі з конкретним об’єктом (в наносекундах);
- Error – половина від 99,9% довірчого інтервалу;
- StdDev – середньо квадратичне відхилення при вимірюванні;
- Rank – позиція відносно інших серіалізаторів за результатами всіх проведених вимірювань;
- Gen0 – використана генерація пам’яті;
- Allocated –пам’ять, виділена за одну операцію (в байтах).

Після таблиці також зазначається час, витрачений на проведення експерименту.

Підсумкову таблицю, яка відображає результати всіх проведених експериментів, наведено на рис. 7.

Method	Mean	Error	StdDev	Rank	Gen0	Allocated
Serialize_Small_Object						
SystemTextJson	640.6 ns	5.34 ns	5.00 ns	4	0.3519	736 B
Jil	385.2 ns	7.30 ns	7.50 ns	3	0.4663	976 B
Newtonsoft	1,151.5 ns	22.59 ns	30.91 ns	5	0.8869	1856 B
Utf8Json	274.6 ns	5.31 ns	5.90 ns	2	0.1144	240 B
SpanJson	205.1 ns	3.58 ns	3.35 ns	1	0.1147	240 B
Serialize_Big_Object						
SystemTextJson	135.39 ns	2.201 ns	2.059 ns	4	0.0880	184 B
Jil	73.96 ns	1.461 ns	2.559 ns	3	0.1109	232 B
Newtonsoft	195.98 ns	3.746 ns	7.568 ns	5	0.5584	1168 B
Utf8Json	47.37 ns	0.863 ns	0.720 ns	1	0.0153	32 B
SpanJson	50.78 ns	0.288 ns	0.241 ns	2	0.0153	32 B
Serialize_LongInheritance_Object						
SystemTextJson	1,249.0 ns	22.18 ns	18.52 ns	4	0.5226	1096 B
Jil	558.4 ns	10.95 ns	19.47 ns	1	0.6227	1304 B
Newtonsoft	2,772.0 ns	44.26 ns	41.40 ns	5	1.4381	3008 B
Utf8Json	692.0 ns	13.54 ns	18.54 ns	3	0.4511	944 B
SpanJson	611.7 ns	11.95 ns	17.52 ns	2	0.4511	944 B
Serialize_Simple_Array_Object						
SystemTextJson	639.2 ns	8.21 ns	7.68 ns	4	0.3014	632 B
Jil	420.3 ns	4.32 ns	4.04 ns	3	0.2751	576 B
Newtonsoft	1,786.1 ns	21.92 ns	20.51 ns	5	0.8831	1848 B
Utf8Json	214.4 ns	2.09 ns	1.96 ns	2	0.0648	136 B
SpanJson	163.8 ns	2.91 ns	2.73 ns	1	0.0648	136 B
Serialize_2DArray_Object						
SystemTextJson	NA	NA	NA	?	NA	NA
Jil	77.44 ns	1.518 ns	2.495 ns	1	0.1109	232 B
Newtonsoft	3,130.10 ns	40.901 ns	38.259 ns	4	1.0796	2264 B
Utf8Json	336.13 ns	4.618 ns	4.094 ns	3	0.0687	144 B
SpanJson	273.11 ns	5.305 ns	5.448 ns	2	0.0687	144 B
Serialize_3DArray_Object						
SystemTextJson	NA	NA	NA	?	NA	NA
Jil	76.86 ns	1.506 ns	2.558 ns	1	0.1109	232 B
Newtonsoft	8,667.72 ns	165.211 ns	190.257 ns	3	1.9836	4176 B
Utf8Json	983.45 ns	6.491 ns	6.072 ns	2	0.1907	400 B
SpanJson	NA	NA	NA	?	NA	NA
Serialize_Dictionary_Object						
SystemTextJson	1,438.7 ns	10.08 ns	9.43 ns	3	0.4616	968 B
Jil	1,486.1 ns	21.51 ns	20.12 ns	4	0.6886	1440 B
Newtonsoft	2,875.2 ns	52.70 ns	49.29 ns	5	1.1787	2472 B
Utf8Json	1,188.2 ns	23.13 ns	22.72 ns	2	0.2251	472 B
SpanJson	993.3 ns	19.45 ns	30.29 ns	1	0.2518	528 B

Рис. 7 – Підсумкова таблиця результатів усіх експериментів

Результати роботи програми для тестування серіалізаторів при серіалізації маленького об'єкта наведено на рис. 8. Даний об'єкт складається з 4 полів та не несе великого навантаження

на серіалізатори, а результати використовувалися для розуміння стандартної швидкості серіалізації і споживання ресурсів при порівнянні з серіалізацією інших об'єктів.

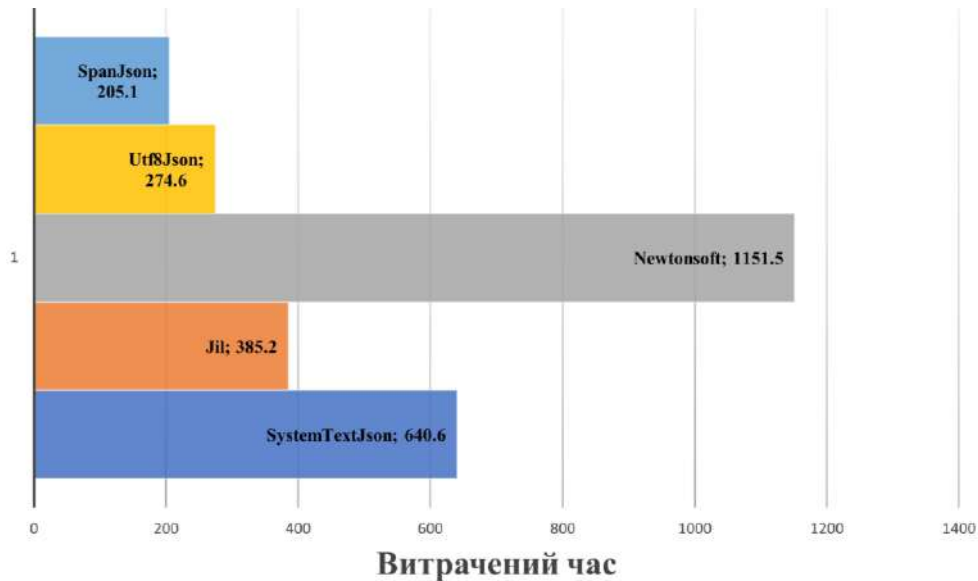


Рис. 8 – Діаграма витрат часу при серіалізації маленького об'єкта

При серіалізації маленького об'єкта стандарт індустрії Newtonsoft.Json, який рекомендується компанією Microsoft та є найбільш широко поширеним серіалізатором, має за всіма параметрами в 2-3 рази гірші показники, ніж інші серіалізатори, що брали участь в експерименті. Newtonsoft.Json отримує 5 місце за результатами ефективності. Серіалізатор System.Text.Json, який за замовчанням присутній в стандартних бібліотеках C#, продемонстрував середні результати за швидкістю та велику похибку вимірювання та споживання ресурсів. BenchmarkDotNet присвоює йому 4 місце. SpanJson показав найкращі результати за всіма параметрами, тому посідає 1 місце у цьому експерименті. Utf8Json та Jil показали високу результативність та знаходяться на 2 і 3 місцях відповідно.

Результати роботи програми при серіалізації великого об'єкта зображено на рис. 9.

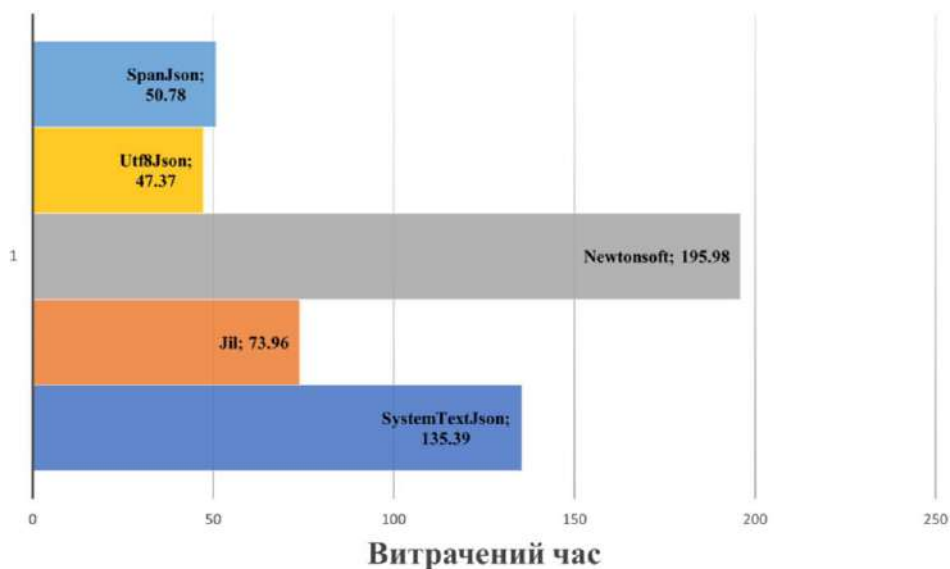


Рис. 9 – Діаграма витрат часу при серіалізації великого об'єкта

Як видно з діаграми, розмір об'єкта вплинув лише на показники Utf8Json – він найкраще за всі інші серіалізатори впорався з завданням. Це дозволяє зробити висновки, що при серіалізації великих об'єктів слід віддавати перевагу використанню серіалізатора Utf8Json. Для інших серіалізаторів показники швидкості та споживання ресурсів зберегли таку саму пропорцію, як і при серіалізації маленького об'єкта, тобто кількість даних в об'єкті не має впливу на змінення швидкості серіалізації.

Слід зауважити, що при проведенні експериментів, результати яких відображено на рис. 8 та рис. 9, кількість маленьких об'єктів, згенерованих фреймворком BenchmarkDotNet, була значно більшою, ніж кількість великих об'єктів, що вплинуло на середні арифметичні значення показників.

Результати роботи програми тестування серіалізаторів при серіалізації об'єкта зі складним ланцюгом спадкування класів зображено на рис. 10. Особливістю цього об'єкта є клас, який його описує: він має складну систему спадкування, отже, для створення об'єкта такого класу потрібно заповнити усі поля класів, від яких було успадковано фінальний клас.

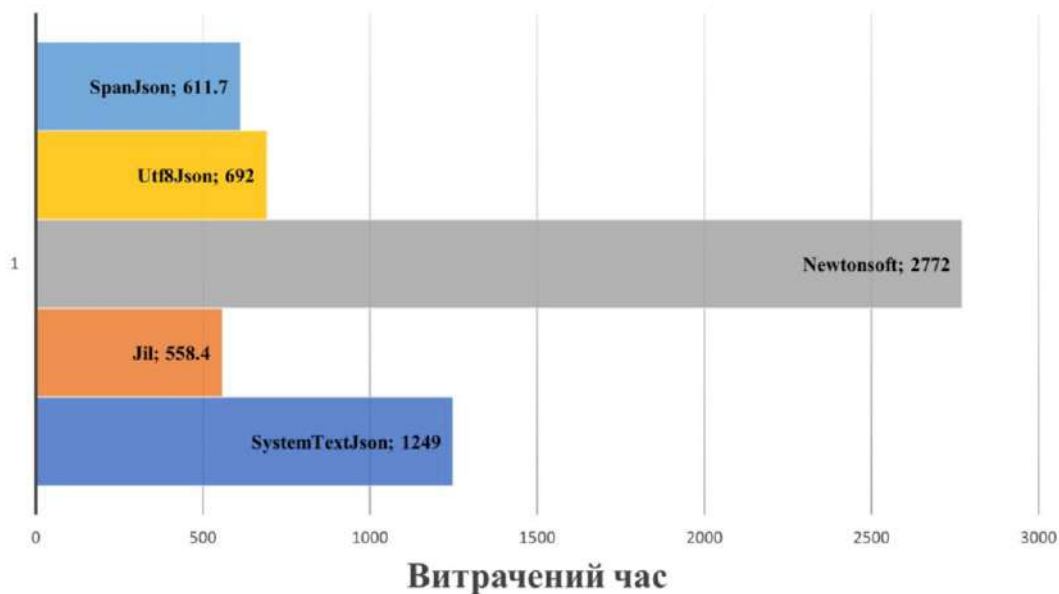


Рис. 10 – Діаграма витрат часу при серіалізації об'єкта зі складним ланцюгом спадкування класів

Аналіз результатів показує, що серіалізацію об'єктів, утворених від класів зі складним ланцюгом спадкування, краще всього виконує Jil серіалізатор, який є лідером за швидкістю, хоча й показує середні показники споживання ресурсу пам'яті. SpanJson та Utf8Json мають практично однакові результати і лише трохи поступаються Jil у цьому експерименті. System.Text.Json витратив значно більше часу, ніж три лідери експерименту. Newtonsoft.Json має найгірші показники та значно відстає від інших серіалізаторів за всіма параметрами.

Отже, якщо проект вимагає серіалізації об'єктів, створених від класів зі складним ланцюгом спадкування, варто звернути увагу на Jil серіалізатор, який значно краще впорався з завданням у даному експерименті.

Результати тестування при серіалізації об'єкта, що містить масив натуральних чисел, наведено на рис. 11.

Пропорції показників при серіалізації об'єкта, що містить масив натуральних чисел, схожі з результатами серіалізації маленького об'єкта. Серіалізатори SpanJson, Utf8Json та Jil знову демонструють найкращі показники ефективності. Також прийнятні результати швидкості та використання пам'яті має стандартний серіалізатор System.Text.Json. Як і в попередніх експериментах, Newtonsoft.Json показує значне відставання від своїх конкурентів, хоча й є одним з найпоширеніших серіалізаторів і часто використовується в практичних проєктах.

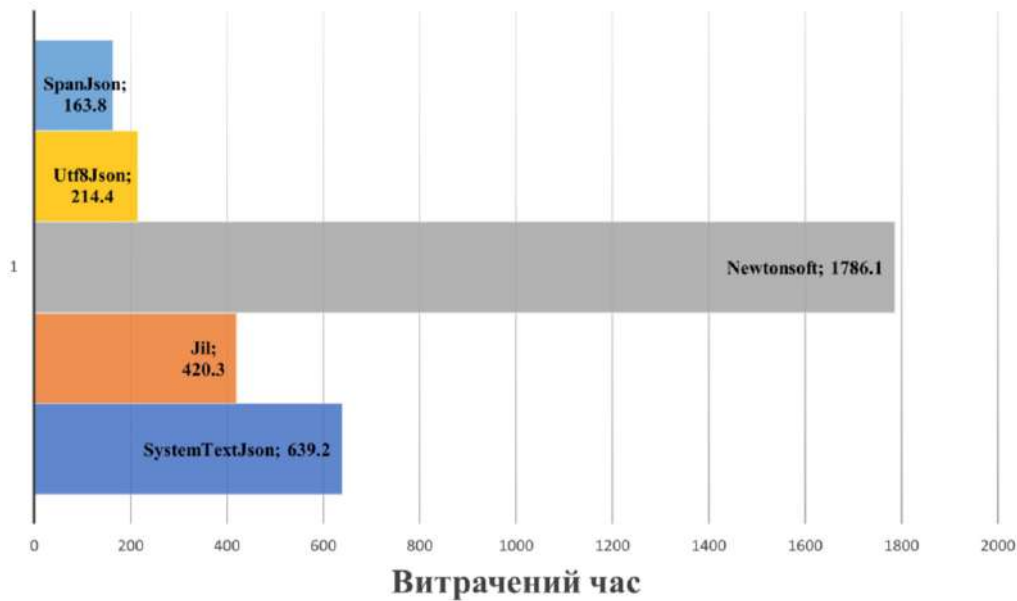


Рис. 11 – Діаграма витрат часу при серіалізації об’єкта, що містить масив натуральних чисел

Результати роботи програми-тестувальника при серіалізації об’єкта, що містить двовимірний масив натуральних чисел, зображено на рис. 12.

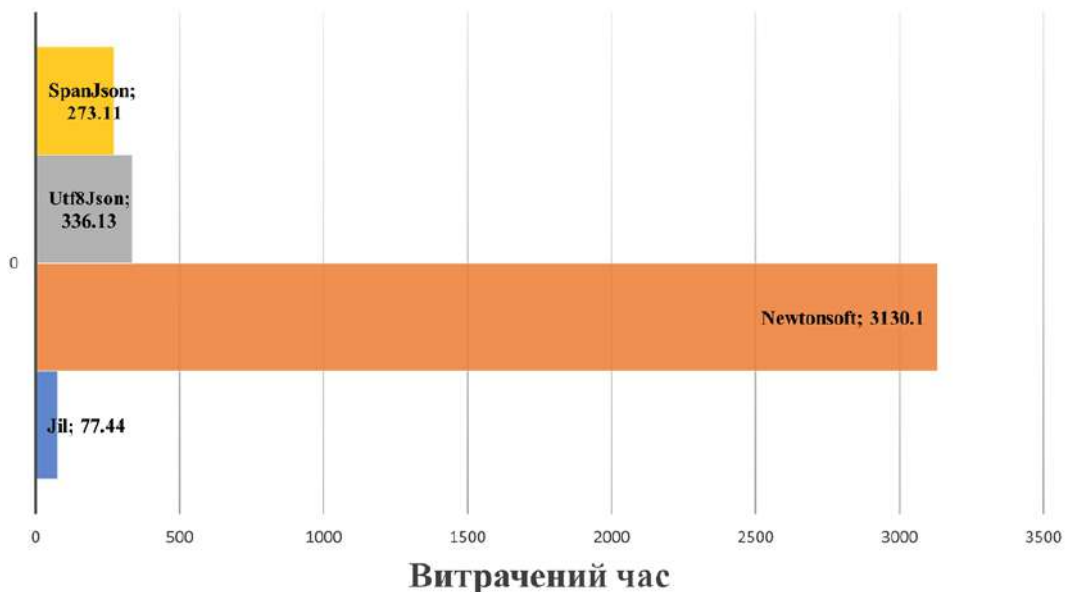


Рис. 12 – Діаграма витрат часу при серіалізації об’єкта, що містить двовимірний масив натуральних чисел

Двовірні масиви менше розповсюджені в практичних проєктах, але представляють інтерес для експериментів. На діаграмі відсутні результати серіалізації System.Text.Json, тому що аналіз помилок, які виникли в результаті експерименту, дозволив зробити висновок, що System.Text.Json не працює з типом даних двовимірний масив та генерує відповідне виключення за результатами експерименту з двовимірними масивами. Найкраще з таким типом навантажень впорався Jil серіалізатор. Серіалізатори SpanJson та Utf8Json також продемонстрували хороші результати швидкості серіалізації та використання пам’яті. Newtonsoft.Json знову показав значне

відставання від своїх конкурентів, але, на відміну від серіалізатора System.Text.Json, він впорався з завданням серіалізації двовимірного масива.

Експеримент з серіалізації об'єкта, що містить тривимірний масив натуральних чисел, демонструє незвичайний результат, що зображено на рис. 13.



Рис. 13 – Діаграма витрат часу при серіалізації об'єкта, що містить тривимірний масив натуральних чисел

Як і у випадку з двовимірним масивом, серіалізатор System.Text.Json згенерував виключення та не брав участь в експерименті. При цьому разом з ним у випадку з тривимірним масивом відповідне виключення згенерував серіалізатор SpanJson.

Використання тривимірних масивів – це рідкісний практичний випадок, проте такий спосіб зберігання даних можливий. Аналіз результатів показав, що Jil серіалізатор знову демонструє найкращі показники, що на порядок вищі за показники тих його конкурентів, які змогли провести серіалізацію тривимірного масива. Utf8Json показав хороші результати швидкості серіалізації. Newtonsoft.Json знову значно відстає, але впорався з цією серіалізацією.

Результати роботи програми для тестування при серіалізації об'єкта, що містить словник, зображені на рис. 14.

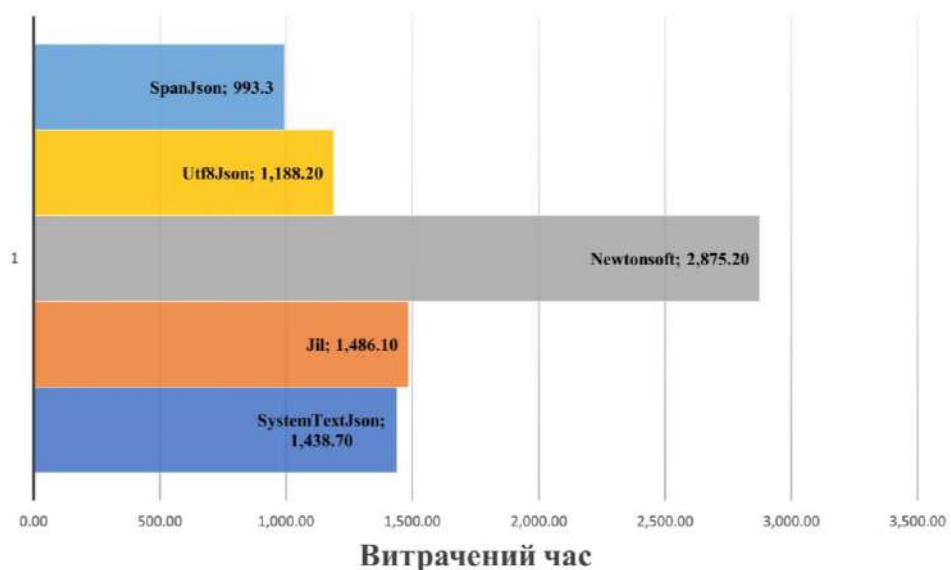


Рис. 14 – Діаграма витрат часу при серіалізації об'єкта, що містить словник

Використання словників для зберігання даних – це поширена практика, тому такий експеримент є необхідним. Аналіз отриманих результатів показав, що з цим завдання краще за конкурентів впорався серіалізатор SpanJson. Utf8Json теж демонструє хороші показники, через що BenchmarkDotNet присвоює йому 2 місце. Стандартний серіалізатор System.Text.Json теж демонструє дуже добрі результати порівняно з його можливостями у попередніх експериментах. Jil серіалізатор навпаки, на відміну від якісних результатів у попередніх експериментах, має низькі показники, через що посідає тільки 4 місце при серіалізації об'єкта, який містить словник.

На основі отриманих результатів роботи програми-тестувальника при реалізації серіалізації різних об'єктів, можна зробити висновок, що не існує універсального серіалізатора, який буде показувати найкращі результати в усіх випадках. Тому при реалізації окремого програмного рішення для виконання серіалізації доцільно використовувати різні технології. Це вимагає у кожному випадку проведення нових експериментальних досліджень для конкретних об'єктів, які будуть безпосередньо використовуватись в проєкті. Також пильну увагу необхідно звертати на особливості та специфіку використання того чи іншого серіалізатора. Крім того, при зміні версій та коду продуктів або появи нових рішень серіалізації потрібно проводити додаткові дослідження для кожного конкретного випадку використання різних об'єктів.

Висновки

Таким чином, розроблено програму для тестування серіалізаторів з використанням різних за обсягом і типом даних об'єктів. Аналіз найбільш популярних програмні рішень для серіалізації об'єктів C# показав доцільність використання JSON формату та проведення тестування таких серіалізаторів, як Jil, Json.NET (Newtonsoft.Json), Utf8Json та SpanJson, з метою виявлення переваг та недоліків їхнього використання для реалізації конкретних задач та проєктів.

Результати експериментальних досліджень, отримані в рамках даної роботи, показали залежність ефективності серіалізаторів від типу та обсягу даних, які потрібно серіалізувати.

Кожна окрема технологія серіалізації ефективно здійснює серіалізацію одних об'єктів та поступається показниками при використанні інших об'єктів. Серіалізатор SpanJson показав найкращі результати при роботі з об'єктами невеликого розміру та об'єктами, що містять одновимірні масиви та словники. Utf8Json краще за конкурентів впорався з серіалізацією об'єктів великого обсягу. Серіалізатор Jil показав найкращий результат при використанні об'єктів зі складними ланцюгами спадкування класів. Стандартний серіалізатор System.Text.Json показав середні результати при виконанні експериментів. Newtonsoft.Json виявився найповільнішим та споживав більше системних ресурсів, хоча й є одним з найпоширеніших в практичних проєктах.

За допомогою проведених експериментів на практичних прикладах було доведено необхідність тестування серіалізаторів для виявлення найкращого для кожного практичного проєкту, який вимагає використання серіалізації.

Перелік використаних джерел:

1. Грудзинський Ю.Є., Марков Р.В. Вибір протоколу серіалізації при розробці програмного забезпечення. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2016. № 12(1184). С. 13-16. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2016.12.15>.
2. Андрущенко Р. Порівняльний аналіз показників ефективності методів серіалізації даних у комп'ютерних мережах. *Технічні науки та технології*. 2019. № 1(15). С. 115-126. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1\(15\)-115-126](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-1(15)-115-126).
3. Андрущенко Р.Б., Зайцев С.В., Солдатов А.Ю. Аналіз методів серіалізації структурованих даних для передачі в протоколах прикладного рівня моделі OSI. *Математичне моделювання в економіці*. 2018. № 3. С. 52-70. URL: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/162043>.
4. Попенко Д.В., Курдеча В.В. Аналіз методів серіалізації об'єктів для побудови платформи великих індустріальних даних. *Перспективи телекомунікацій* : збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції, м. Київ, 13-17 квіт. 2020 р. С. 1-3. URL: <http://confer-enc.its.kpi.ua/proc/article/view/201701>.
5. Літвінова Н., Альперт М., Погульський А. Підвищення ефективності обміну даними сутностей у реляційному представленні та їх обробки. *Технічні науки та технології*. 2021. № 1(23). С. 81-86. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1\(23\)-81-86%20](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2021-1(23)-81-86%20).

6. Sumaray A., Makki S.K. A comparison of data serialization formats for optimal efficiency on a mobile platform. *6th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ICUIMC'12)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 20-22 February 2012. Vol. 48. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1145/2184751.2184810>.
7. Performance analysis of data serialization formats in m2m wireless sensor networks / F. Pacini, F.A. Aderohunmu, A. Azzarà, S. Bocchino, P. Pagano, M. Petracca. *European Conference on Wireless Sensor Networks*, Porto, Portugal, 9-11 February 2018. Pp. 7-8. URL: [https://cister-labs.pt/docs/poster_demo_session_proceedings_of_the_12th_european_conference_on_wireless_sensor_networks_\(ewsn_15\)/1075/view.pdf#page=8](https://cister-labs.pt/docs/poster_demo_session_proceedings_of_the_12th_european_conference_on_wireless_sensor_networks_(ewsn_15)/1075/view.pdf#page=8).
8. PSON: A Serialization Format for IoT Sensor Networks / Luis Á., Casares P., Cuadrado-Gallego J.J., Patricio M.A. *Sensors*. 2021. Vol. 23(13). Pp. 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21134559>.
9. Kazuaki M. Performance evaluation of object serialization libraries in XML, JSON and binary formats. *Second International Conference on Digital Information and Communication Technology and it's Applications (DICTAP)*, Bangkok, Thailand, 16-18 May 2012. Pp. 177-182. DOI: <https://doi.org/10.1109/DICTAP.2012.6215346>.
10. Vanura J., Kriz P. Performance Evaluation of Java, JavaScript and PHP Serialization Libraries for XML, JSON and Binary Formats. *Services Computing – SCC 2018: 15th International Conference*, Seattle, USA, 25-30 June 2018. 2018. Pp. 166-175. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-94376-3_11.

References:

1. Yu.Ie. Grudzynskyy, and R.V. Markov, «Vybir protokolu serializatsii pry rozrobtsi prohramnoho zabezpechennia» [«Protocol selection for serialization software development communication module SCADA-systems»], *Visnyk NTU «KhPI». Seriya: Novi rishennia v suchasnykh tekhnolohiiakh – Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New solutions in modern technologies*, № 12(1184), pp. 13-16, 2016. doi: **10.20998/2413-4295.2016.12.15**. (Ukr.)
2. R. Andrushchenko, «Porivnialnyi analiz pokaznykiv efektyvnosti metodiv serializatsii danykh u kompiuternykh merezhakh» [«Comparative analysis of the performance characteristics of data serialization methods in computer networks»], *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, № 1(15), pp. 115-126, 2019. doi: **10.25140/2411-5363-2019-1(15)-115-126**. (Ukr.)
3. R.B. Andrushchenko, S.V. Zaitsev, and A.Iu. Soldatov, «Analiz metodiv serializatsii strukturovanykh danykh dlia peredachi v protokolakh prykladnoho rivnia modeli OSI» [«Analysis of structured data serialization methods for transmission in application layer protocols of the OSI model»], *Matematychni modeliuvannia v ekonomitsi – Mathematical modeling in economics*, № 3, pp. 52-70, 2018. Available: <http://dspace.nbu.gov.ua/handle/123456789/162043>. (Ukr.)
4. D.V. Popenko, and V.V. Kurdecha, «Analiz metodiv serializatsii obektiv dlia pobudovy platformy velykykh industrialnykh danykh» [«Analysis of object serialization methods for building a big industrial data platform»], in *Perspektyvy telekomunikatsii : zbirnyk materialiv Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii* [Perspectives of telecommunications: a collection of materials of the International Scientific and Technical Conference], Kyiv, 2020, pp. 1-3. Available: <http://confer-enc.its.kpi.ua/proc/article/view/201701>. (Ukr.)
5. N. Litvinova, M. Alpert, and A. Pohulskyi, «Pidvyschennia efektyvnosti obminu danymy sutnostei u reliatsiinomu predstavleni ta yikh obrobky» [«Improving the efficiency of data exchange of entities in relational representation and their processing»], *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii – Technical sciences and technologies*, № 1(23), pp. 81-86, 2021. doi: **10.25140/2411-5363-2021-1(23)-81-86%20**. (Ukr.)
6. A. Sumaray, and S.K. Makki, «A comparison of data serialization formats for optimal efficiency on a mobile platform», in *6th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ICUIMC'12)*, Kuala Lumpur, 2012, vol. 48, pp. 1-6. doi: **10.1145/2184751.2184810**.
7. F. Pacini, F.A. Aderohunmu, A. Azzarà, S. Bocchino, P. Pagano, and M. Petracca, «Performance analysis of data serialization formats in m2m wireless sensor networks», in *European Conference on Wireless Sensor Networks*, Porto, 2018, pp. 7-8. Available: [https://cister-](https://cister-labs.pt/docs/poster_demo_session_proceedings_of_the_12th_european_conference_on_wireless_sensor_networks_(ewsn_15)/1075/view.pdf#page=8)

[labs.pt/docs/poster_demo_session_proceedings_of_the_12th_european_conference_on_wireless_sensor_networks_\(ewsn_15\)/1075/view.pdf#page=8](https://labs.pt/docs/poster_demo_session_proceedings_of_the_12th_european_conference_on_wireless_sensor_networks_(ewsn_15)/1075/view.pdf#page=8).

8. Á. Luis, P. Casares, J.J. Cuadrado-Gallego, and M.A. Patricio, «PSON: A Serialization Format for IoT Sensor Networks», *Sensors*, vol. 23(13), pp. 1-18, 2021. doi: **10.3390/s21134559**.
9. M. Kazuaki, «Performance evaluation of object serialization libraries in XML, JSON and binary formats», in Second International Conference on Digital Information and Communication Technology and its Applications (DICTAP), Bangkok, 2012, pp. 177-182. doi: **10.1109/DICTAP.2012.6215346**.
10. J. Vanura, and P. Kriz, «Performance Evaluation of Java, JavaScript and PHP Serialization Libraries for XML, JSON and Binary Formats», in 15th International Conference Services Computing SCC 2018, Seattle, 2018, pp. 166-175. doi: **10.1007/978-3-319-94376-3_11**.

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

Стаття надійшла 05.07.2023

Стаття прийнята 13.08.2023

УДК 004.932:004.94

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.299972

© Тузенко О.О.¹, Володін С.І.²

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПОЛІПШЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕННЯ ПРИ ЗБІЛЬШЕННІ ЙОГО ФОРМАТУ ПІСЛЯ ЗЙОМКИ

У статті розглянуто цифрові зображення різних типів, а також види комп'ютерної графіки. Виявлено, що в растровій графіці базовим компонентом зображення є точка, в такому випадку у векторній графіці – лінія. Різноманітні векторні формати мають різноманітні кольорні можливості. Основною перевагою є можливість масштабування їх без втрати якості, а також відносно незначний розмір файлів, що їх містять. Це спрощує передачу векторних зображень по електронних каналах зв'язку. Запропоновано конкретний алгоритм поліпшення растрових зображень, а саме з використанням квадратичного кореня значень кольорів й без використання квадратичного кореня значень кольорів. Основним завданням було досягнення результату вдосконалення випадкового кольорового растрового зображення низької роздільної здатності без втрати якості та роздільної здатності. Ключовим моментом методу є порівняння та поєднання вертикальної, горизонтальної та діагональної інтерполяції, що дозволяє досягти кращої точності обчислення глибини кольору. Цей метод ніколи не використовувався в комерційному науковому програмному забезпеченні, хоча існують різні варіанти комбінованих методів інтерполяції, подібних до поточного. У цій статті було досліджено два різні підходи до повторного розрахунку матриці зображення під час уточнення зображення, а саме його збільшення, як квадратичне значення глибини кольору вплине на цільове значення кольору. Результати показують, що такий підхід дозволяє зберегти більше деталей у тінях і контури під час інтерполяції, хоча зображення децю втрачає глибину кольору. Експеримент показує, що цей метод інтерполяції з квадратичним коренем значень кольорів дозволяє збільшувати та покращувати кольорові зображення зі складною структурою тональної кривої та зберігати деталі об'єктів на місці, хоча глибина кольору погіршується, особливо в найглибших відтінках і в чорному. Навпаки, метод

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-4920-9417, tuzenkoaa@gmail.com

² ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, volodinsi57@gmail.com

комбінованої інтерполяції без підведення в квадрат дає значно кращий результат із кольоровою інтерполяцією, але втрачає деталі в темних областях початкового зображення. Запропонований метод може бути використано у різних сферах.

Ключові слова: програмне забезпечення, растрові зображення, алгоритм, формат, колір, експериментальне дослідження, обробка.

O.A. Tuzenko, S.I. Volodin. *The software for improvement of image quality after enlargement.* In the paper digital images of various formats were investigated. The different vector image formats have different color rendering capabilities. The main task was to achieve a result of refinement of the random low resolution color raster image without quality and resolution loss. The biggest advantage of using specific vector or compressed raster formats is the ability of scaling without quality loss and comparatively small file size. This eases vector images transfer through networks. In the article a specific algorithm of raster images refinement was investigated, particularly the method of raster images refinement based on combination of interpolation algorithms with and without square root of the color values. The key point of the method is comparison and combination of vertical, horizontal and diagonal interpolation that allows to achieve better precision on color depth calculation. This exact method was never used in commercial or scientific software though there are different variation of combined interpolation methods similar to current one. In this paper two different approaches to image matrix re-calculation during image refinement were tested, in order to research how root squaring the value of color depth would affect the target color value. The result shows that this approach allows to keep more details in shadows and save contours during interpolation though the images lose somewhat of color depth. The experiment shows that this interpolation method with square rooting color values allows to enlarge and refine color images with complex tone curve structure and keep details of the objects in place, though color depth is worsened especially in deepest shades and blacks. On the opposite the method of combined interpolation without root squaring gives significantly better result with color interpolation but loses details in the dark areas of the initial image. The suggested method can be used in a number of different areas.

Key words: software, raster images, algorithm, format, color, experimental research, processing.

Постановка проблеми. Системи цифрового перетворення інформації призначені для переведення в цифровий вигляд природних або штучних об'єктів, які є носіями інформації в аналоговому вигляді. Дані в цифровому вигляді використовують для збереження, передачі, аналізу та обробки в системах цифрової обробки інформації. В даний час кількість приладів, що здатні вести фото- або відеозйомку, росте в геометричній прогресії, причому технічне забезпечення та умови зйомки не завжди забезпечують прийнятну якість зображення. Хоча наразі більшість методів поліпшення якості пов'язані з використанням нейронних мереж і штучного інтелекту, існують галузі, де обмежені технічні ресурси або необхідність швидкого отримання результатів не дають змоги застосовувати такий підхід. В таких випадках можуть бути застосовані більш прості математичні моделі для поліпшення якості зображення, тому тема роботи є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Останнім часом значно зріс інтерес до електронних, цифрових і оптичних методів обробки зображень з метою підвищення їх якості. Широке висвітлення отримали роботи, пов'язані з космічними та біомедичними дослідженнями [1-3]. Особливо важливе практичне значення мають методи обробки аерокосмічних фотозображень. Ефективність аерокосмічних методів вивчення земної поверхні, поверхні інших планет значною мірою визначається якістю цифрових матеріалів. Підвищення якості таких зображень має велике економічне значення, оскільки знижує вартість виконання робіт [4, 5].

Таким чином, поліпшення якості растрового зображення є одним з ключових питань обробки цих зображень як у наукових дослідженнях, техніці, медицині, так і у креативних індустріях. Для поліпшення зображень використовується комплекс операцій, покликаних поліпшити сприйняття зображення спостерігачем (наприклад, при збільшенні розміру зображення відбувається зміна розмірності матриці і з'являються помилкові контури) або ж перетворення його в інше

зображення, більш зручне для машинної обробки [3]. Особливо важливою є ця процедура перетворення для роботи систем розпізнавання образів, для яких є критичною достовірність отриманого після покращення зображення. Ще одною важливою сферою застосування технологій удосконалення растрових зображень є конвертація аналогових зображень у цифрову форму, зокрема, оцифрування архівних зображень, як наукових даних, так і історичних архівних фото та витворів фотомистецтва. Часто ці зображення технічно обмежені через використання тогочасних матеріалів, таких як низькоконтрастні плівки з низькою «роздільною здатністю» та високим рівнем «зерна». Для переведення таких зображень у цифрову форму потрібно залучити сучасні технології обробки візуальних даних. Процедура перетворення аналогового сигналу, що описує зображення, в цифрову конфігурацію складається з трьох стадій [6]: дискретизації, квантування і кодування. Зір людини здійснює процедуру психофізіологічного сприйняття зображень реальності, що його оточує, яка виконується зоровою системою людини, і дає можливість отримувати уявлення про величину, форму і забарвлення предметів, їх взаємне розташування і відстані між ними. Фотокамера та інші пристрої мають всі шанси зберегти зображення на плівці, папері або в цифровому вигляді [7, 8]. Але будь-яка камера чи інший фіксуючий пристрій, який записує візуальну інформацію, кардинально відрізняється від зорової системи людини, тому має суттєві обмеження у передачі інформації. Камера не має можливості так адаптувати свою оптичну систему, щоб імітувати акомодацию ока люди, навіть адаптивні камери, які швидко налаштовують параметри об'єктива, діють за дещо відмінним від акомодации живого ока принципом. Інша відмінність полягає у роздільній здатності ока і матриці чи плівки у камері, а точніше у тому, як інформація, знята з сітківки чи матриці, обробляється [9]. По-перше, очі бачать оточуючу реальність трьохвимірною та мають змогу оцінити предмет з двох позицій одним поглядом, а камера з будь-якою технологією сприйняття та збереження інформації бачить тільки двовимірну проекцію предмета на носій (плівку чи матрицю), тому деякі деталі губляться або викривлюються. По-друге, зображення, отримане на сітківку та на матрицю, по-різному інтерпретується. Відомо, що роздільна здатність ока велика, але більшість сучасних фотокамер випереджують око людини за цим параметром, проте за рахунок вищої нервової діяльності мозку людини, завдяки інтерпретації мозком отриманого зображення, якість деталей, як і саме сприйняття деталей оточуючого світу, буде суттєво відрізнитись від кадру, отриманого на носій інформації в камері [10].

Останніми роками дослідницькі центри корпорацій, які виготовляють програмні продукти для роботи з різними типами графіки, зокрема Adobe, Sony, BlackMagicDesign, MAGIX, активно публікують різноманітні дослідження, зосереджені зокрема на покращенні зображень, а також збільшенні їх розміру без втрати якості і набуття артефактів та помилок. Окремою, досить новою темою є використання у роботі з растровими зображеннями генеративних нейронних мереж (GAN) як для вдосконалення зображень, знятих фото та відео камерами, так і для генерації зображень за текстовими запитами «з нуля» [5, 11, 12]. Велика кількість досліджень у сфері роботи з зображеннями присвячена векторизації растрових зображень з метою майже необмеженого збільшення роздільної здатності та розміру за рахунок математичного перетворення растрового зображення [13].

Таким чином, розвиток технологій та досліджень в сфері обробки растрової графіки відбувається за трьома основними напрямками: класичні чисельні алгоритми, апроксимуючі алгоритми векторизації та використання генеративних нейронних мереж.

Мета дослідження – розробити програмне забезпечення для поліпшення якості зображення при збільшенні його формату після зйомки та провести з його допомогою дослідження для різних зображень.

Виклад основного матеріалу. В сучасному процесі виготовлення і друкування всі картини і компоненти представлені цифровими зображеннями різних типів. Цифрові зображення, згідно з методом дискретизації оригіналу, поділяються на растрові, векторні і змішаного типу [14]. Основні характеристики растрового зображення – розмір зображення в пікселях і глибина кольору [15, 16]. При аналого-цифровому перетворенні завжди відбувається втрата деякої кількості інформації, оскільки дискретизація завжди проводиться шляхом усереднення та узагальнення потоку вихідної аналогової інформації. Допустимо застосування в якості растрового елемента фігури різної форми (трикутники, квадрати, шестикутники тощо), належної відповідним умовам: всі фігури зобов'язані бути однаковими; повинні цілком покривати площину без накладення і дірок. Файли растрової графіки займають величезне число пам'яті комп'ютера. Максимальний

вплив на кількість пам'яті, займаної растровим зображенням, надають три факти: розмір зображення; бітова глибина кольору; формат файлу, який застосовується з метою зберігання зображення [17]. Багато файлів зображень мають свої схеми стиснення зображення, крім того мають всі шанси містити додаткові дані короткого опису зображення для попереднього перегляду. Звідси основний недолік растрових цифрових зображень – неможливість їх масштабування без втрати якості.

Іншим типом цифрових зображень вважаються векторні зображення. Мінімальними компонентами векторного зображення вважаються вектор і крива Безьє. Вектор в комп'ютерній графіці – це відрізок, що з'єднує дві точки з визначеними координатами. Головним компонентом кривої Безьє вважається вузол, званий також контрольною точкою або контрольною вершиною. Рівень кривизни напрямку лінії визначається координатами вузла і двох керуючих точок. Контур цифрового зображення передбачає собою скупчення даних, що включає місце розташування контрольних і керуючих точок, а крім того властивості кривої в цілому – її товщину, колір, напрям, а в разі якщо замкнута крива, то і колір, і тип заливки. Векторні зображення отримують двома способами: шляхом ручного трасування оригіналу; шляхом автоматичного трасування. Головним закономірним компонентом векторної графіки вважається геометричний об'єкт. В якості предмета беруться елементарні геометричні фігури (прямокутник, окружність, еліпс, лінія), складні форми або форми, побудовані з примітивів, кольорові заливки, в тому числі градієнти. Значущим об'єктом векторної графіки вважається сплайн.

Коли в растровій графіці базовим компонентом зображення є точка, в такому випадку у векторній графіці – лінія. Лінія описується математично як єдиний об'єкт, і внаслідок того розмір інформації для відображення об'єкта засобами векторної графіки значно менший, ніж в растровій графіці [16, 18].

Різноманітні векторні формати мають різноманітні колірні можливості. Прості формати, які мають всі шанси не містити в цілому практично ніякої інформації про колір, застосовують за замовчуванням колір тих пристроїв, на які вони виводяться, інші формати здатні зберігати відомості про повну 32 бітну колірну схему. Яку б колірну схему не використовував векторний формат, на розмір файлу він ніяк не справляє великий вплив, крім тих ситуацій, коли файл містить растрові фігури. У простих векторних об'єктах значення кольору належить до цілого об'єкту в цілому. Колір об'єкта зберігається у вигляді частини його векторного опису.

Основною перевагою є можливість масштабування без втрати якості, а також відносно незначний розмір файлів, що їх містять. Це спрощує передачу векторних зображень по електронних каналах зв'язку. Основний недолік векторних зображень – це те, що вони практично постійно відтворюють оригінал в спрощеному вигляді.

Розглянемо математичну модель роботи з зображеннями.

Взявши за основу зображення, зроблене раніше цифровою відеокамерою з обмеженим розміром матриці, перерахувавши кількість пікселів, інтерполюємо їх для поліпшення якості. Інтерполяція зображень працює в двох вимірах і намагається досягти найкращого наближення в кольорі і яскравості пікселя, базуючись на значеннях оточуючих пікселів.

Інтерполюючи зображення по горизонталі, по вертикалі і використовуючи діагональну інтерполяцію, присвоюємо отримані значення нової матриці. В результаті чого, отримуємо нову (змінену) матрицю з меншим кроком дискретизації і великою кількістю пікселів. Починаємо відлік з верхнього лівого кута, як показано на рис. 1.

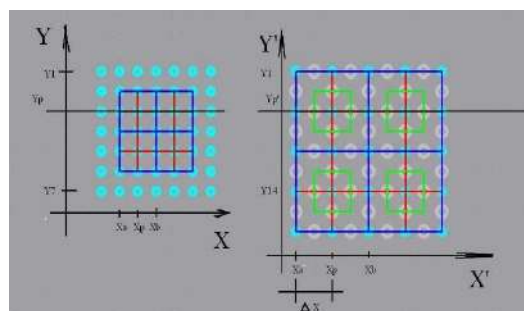


Рис. 1 – Перерахунок кількості пікселів. Крок дискретизації

На рис. 2 можемо бачити процес формування нових значень (точок) пікселя використовуючи вертикальну, горизонтальну і діагональну інтерполяцію, знаючи розташування кожного значення і кількість основних значень матриці певної розмірності, формуємо нову матрицю.

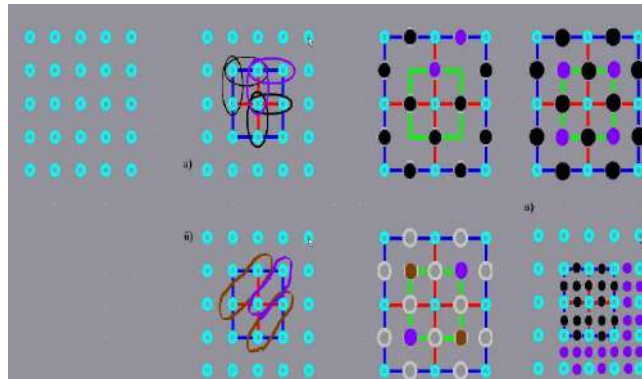


Рис. 2 – Інтерполяція матриці вихідного зображення з метою формування нової матриці покращеного зображення більшого формату: а) інтерполяція по вертикалі і горизонталі; б) діагональна інтерполяція; в) вихідне зображення

Процес горизонтальній інтерполяції показано на рис. 3 та розраховується за формулою (метод 1):

$$B_{i;j+0,5} = \frac{A_{i;j} + A_{i;j+1}}{2} \tag{1}$$

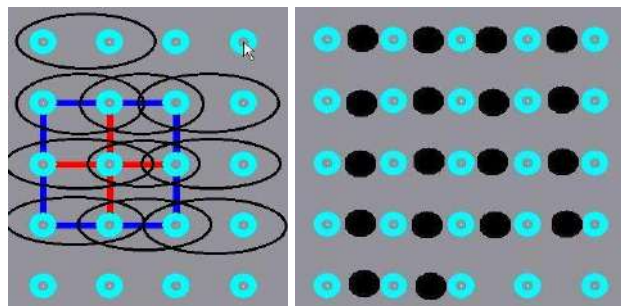


Рис. 3 – Горизонтальна інтерполяція

Процес вертикальної інтерполяції показано на рис. 4 та розраховується за формулою (метод 1):

$$B_{i+0,5;j} = \frac{A_{i;j} + A_{i+1;j}}{2} \tag{2}$$

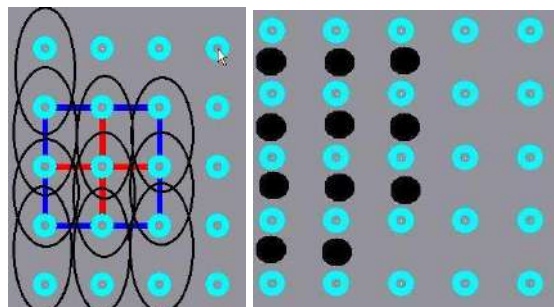


Рис. 4 – Вертикальна інтерполяція

На рис. 5 бачимо зображення після горизонтальної і вертикальної інтерполяції.

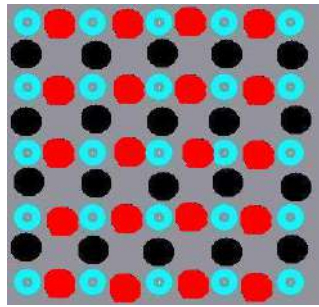


Рис. 5 – Після горизонтальної і вертикальної інтерполяції

На рис. 6 показано діагональну інтерполяцію та її розрахування за формулою (метод 1):

$$B_{i+0,5;j+0,5} = \frac{A_{i;j+1} + A_{i+1;j}}{2}. \quad (3)$$

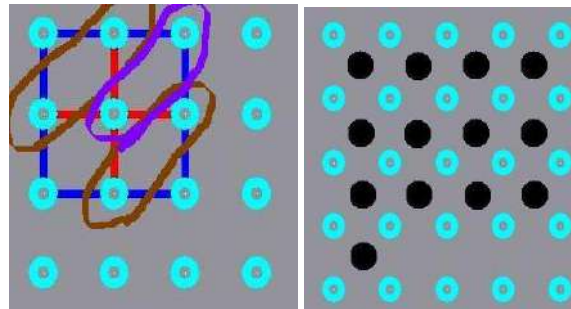


Рис. 6 – Діагональна інтерполяція

Для отримання фізично природного результату, потрібно змінити формули (метод 2):

– для горизонтальної інтерполяції:

$$B_{i;j+0,5} = \frac{\sqrt{(A_{i;j})^2 + (A_{i;j+1})^2}}{2}; \quad (4)$$

– для вертикальної інтерполяції:

$$B_{i+0,5;j} = \frac{\sqrt{(A_{i;j})^2 + (A_{i+1;j})^2}}{2}; \quad (5)$$

– для діагональної інтерполяції:

$$B_{i+0,5;j+0,5} = \frac{\sqrt{(A_{i;j+1})^2 + (A_{i+1;j})^2}}{2}. \quad (6)$$

На основі розробленої математичної моделі було створено програмне забезпечення, яке дозволяє поліпшити якість цифрового зображення шляхом інтерполяції. Програма проста в експлуатації для кожного користувача і зводить кількість його помилок до мінімуму. Вона дозволяє виводити зображення на екран, працювати з ним та зберігати його.

Було проведено дослідження зміни якості зображення після інтерполяції без кореня (метод 1) та дослідження зміни якості зображення після інтерполяції з коренем (метод 2).

Була обрана картинка розміром 500 x 500 пікселів. На рис. 7 приведено результати інтерполяції за методом 1 та методом 2. Випробувана можливість багаторазової інтерполяції. При збільшенні формату зображення після зйомки помітно проявляється мозаїчність за рахунок того, що значення пікселя присвоюються сусіднім пікселям – елементів квадратної матриці (оточуючи

піксель у вихідному зображенні при збільшенні його формату). Цей негативний ефект при збільшенні формату зображення усувається за рахунок застосування методів інтерполяції (вертикальної, горизонтальної та діагональної).



Рис. 7 – Інтерполяція зображення за методом 1 (а) та методом 2 (б)

Таким чином, порівняльний аналіз методів горизонтальної, вертикальної та діагональної інтерполяції елементів матриці вихідного цифрового зображення після зйомки з метою збільшення його формату виявив переваги кожного методу окремо: метод 2 більш впливає на колір зображення і підходить для затемнених зображень, а метод 1 дає більшу чіткість зображення.

Висновки

1. В результаті аналізу літературних і Інтернет-джерел запропоновано новий підхід, якій полягає у використанні інтерполяції зображення по горизонталі, по вертикалі і використовуючи діагональну інтерполяцію.

2. Була побудована програма поліпшення якості зображення заздалегідь скачаного або сфотографованого зображення, використовуючи методи інтерполяції, у якій використовуються два методи дослідження: метод інтерполяції без кореня та метод інтерполяції з коренем. Ці методи можливо використовувати як окремо, так і разом.

3. За допомогою розробленого програмного забезпечення було проведено дослідження різних цифрових зображень. Виявлено, що при зміні масштабу зображення змінюється обсяг займаної пам'яті зображення, що надалі може досягати кілька сотень мегабайт і більше. Все залежить від початкового розміру зображення.

Перелік використаних джерел:

1. Grace K. Kennedy Image Processing with MATLAB. URL: <https://matlabacademy.mathworks.com/details/image-processing-with-matlab/mlip/> (дата звернення: 20.02.2023).
2. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer, 2022. 947 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-34372-9>.
3. Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. 3-d ed. New Jersey : Pearson, 2008. 954 p.
4. Remote Sensing. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. URL: <https://learn.opengeoedu.de/en/fernerkundung/vorlesung/Remote%20Sensing/grundlagen teil2> (дата звернення: 20.05.2023).
5. Chai L., Gharbi M., Shechtman E., Isola P., Zhang R. Any-resolution training for high-resolution image synthesis. *European conference on computer vision (ECCV'22)*, Tel Aviv, Israel, 23-27 October 2022. Pp. 170-188. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.07156>.
6. Heffelfinger D.R. Java EE 7 and GlassFish 4 Application Server. Birmingham : Packt Pub, 2014. 348 p.
7. Масштабування цифрових зображень. URL: <http://ua.wikipedia.org/wiki/Інтерполяція> (дата звернення: 18.10.2022).

8. Burger W., Burge M.J. Principles of Digital Image Processing: Core Algorithms. London : Springer, 2009. 344 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-195-4>.
9. Ferland M. Comparison of the human eye to a camera. Sciencing. URL: <https://medium.com/photography-secrets/whats-the-difference-between-a-camera-and-a-human-eye-a006a795b09f> (дата звернення: 10.05.2023).
10. Oliver K. How Our Eyes See Everything Upside Down. URL: <https://www.mentalfloss.com/article/91177/how-our-eyes-see-everything-upside-down> (дата звернення: 10.11.2022).
11. Controllable shadow generation using pixel height maps / Y. Sheng et al. *European conference on computer vision (ECCV'22)*, Tel Aviv, Israel, 23-27 October 2022. Pp. 240-256. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.05385>.
12. ChunkyGAN: real image inversion via segments / A. Šubrťová, D. Futschik, J. Čech, M. Lukáč, E. Shechtman, D. Šykora. *European conference on computer vision (ECCV'22)*, Tel Aviv, Israel, 23-27 October 2022. Pp. 189-204. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-20050-2_12.
13. Battiato S., Puglisi G., Impoco G. Vectorialisation of raster colour images. *Conferenze Nazionali del Gruppo del Colore*, Bologna, Italy, 13-14 Settembre 2012. Pp. 11-8.
14. Thyssen A. Resize and Scaling. Examples of ImageMagick Usage (Version 6), 2009. URL: <http://www.imagemagick.org/Usage/resize> (дата звернення: 15.11.2022).
15. Thyssen A. Resize and Scaling. Examples of ImageMagick Usage (Version 7), 2009. URL: <http://www.imagemagick.org/Usage/resize> (дата звернення: 15.11.2022).
16. Byrne E. Image Processing Onramp. MATLAB URL: <https://matlabacademy.mathworks.com/details/image-processing-onramp/imageprocessing> (дата звернення: 01.12.2022).
17. Milanfar P. Superresolution imaging. Boca Raton: CRC Press, 2011. 450 p.
18. Романюк О.Н., Обідник М.Д. Один із підходів до підвищення швидкодії зафарбування. *Наукові праці Донецького національного технічного університету*. 2011. Вип. 21(183). С. 116-121.

References:

1. K. Grace Kennedy, Image Processing with MATLAB [Online]. Available: <https://matlabacademy.mathworks.com/details/image-processing-with-matlab/mlip>. Accessed on: February 20, 2023.
2. R. Szeliski, *Computer Vision: Algorithms and Applications*, Springer Publ., 2022. doi: **10.1007/978-3-030-34372-9**.
3. R. Gonzalez, and R. Woods, *Digital Image Processing*, 3d ed. New Jersey, USA: Pearson Publ., 2008.
4. Remote Sensing. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie [Online]. Available: https://learn.opengeoedu.de/en/fernerkundung/vorlesung/Remote%20Sensing/grundlagen_teil2 Accessed on: May 20, 2023.
5. L. Chai, M. Gharbi, E. Shechtman, P. Isola, and R. Zhang, «Any-resolution training for high-resolution image synthesis», in *European conference on computer vision (ECCV'22)*, Tel Aviv, Israel, 2022, pp. 170-188. doi: **10.48550/arXiv.2204.07156**.
6. D.R. Heffelfinger, *Java EE 7 and GlassFish 4 Application Server*. Birmingham, UK: Packt Publ., 2014.
7. Masshtabuvannia tsyfrovyykh zobrazhen (Scaling of digital images) [Online]. Available: <http://ua.wikipedia.org/wiki/Інтерполяція>. Accessed on: October 18, 2022. (Ukr.)
8. W. Burger, and M.J. Burge, *Principles of Digital Image Processing: Core Algorithms*. London, UK: Springer Publ., 2009. doi: **10.1007/978-1-84800-195-4**.
9. M. Ferland, Comparison of the human eye to a camera. Sciencing [Online]. Available: <https://medium.com/photography-secrets/whats-the-difference-between-a-camera-and-a-human-eye-a006a795b09f>. Accessed on: May 10, 2023.
10. K. Oliver, How Our Eyes See Everything Upside Down [Online]. Available: <https://www.mentalfloss.com/article/91177/how-our-eyes-see-everything-upside-down>. Accessed on: October 10, 2022.
11. Y. Sheng et al., «Controllable shadow generation using pixel height maps», in *European conference on computer vision (ECCV'22)*, Tel Aviv, Israel, 2022, pp. 240-256. doi: **10.48550/arXiv.2207.05385**.

12. A. Šubrťová, D. Futschik, J. Čech, M. Lukáč, E. Shechtman, and D. Sýkora, «ChunkyGAN: real image inversion via segments», in European conference on computer vision (ECCV'22), Tel Aviv, Israel, 2022, pp. 189-204. doi: 10.1007/978-3-031-20050-2_12.
13. S. Battiato, G. Puglisi, and G. Impoco, «Vectorialisation of raster colour images», in Conferenze Nazionale del Gruppo del Colore, Bologna, Italy, 2012, pp. 11-8.
14. A. Thyssen, Resize and Scaling. Examples of ImageMagick Usage (Version 6), 2009 [Online]. Available: <http://www.imagemagick.org/Usage/resize>. Accessed on: November 15, 2022.
15. A. Thyssen, Resize and Scaling. Examples of ImageMagick Usage (Version 7), 2009 [Online]. Available: <http://www.imagemagick.org/Usage/resize>. Accessed on: November 15, 2022.
16. Byrne E. Image Processing Onramp. MATLAB URL: <https://matlabacademy.mathworks.com/details/image-processing-onramp/imageprocessing>. Accessed on: December 1, 2022.
17. P. Milanfar, *Superresolution imaging*. Boca Raton, USA: CRC Press, 2011.
18. O.N. Romanyk, and M.D. Obidnyk, «Odyn iz pidkhodiv do pidvyshchennia shvydkodii zafarbuвання» [«One of approaches to increase the speed of coloring»], *Naukovi pratsi Donetskooho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Scientific papers of State higher educational institution «Donetsk national technical university»*, vol. 21(183), pp. 116-121, 2011. (Ukr.)

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

Стаття надійшла 28.06.2023
Стаття прийнята 18.07.2023

УДК 004.896

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.299974

© Гончаренко Т.Д.¹, Проніна О.І.²

ПОРІВНЯННЯ АЛГОРИТМІВ ОЦІНКИ ВІДСТАНІ МІЖ СЛОВАМИ ДЛЯ ПОШУКУ СХОЖИХ РЕЧЕНЬ

У статті розглядається розробка системи пошуку схожих пропозицій на основі оцінки відстані між словами. Алгоритми неточного порівняння дають змогу пошуковим системам враховувати контекст запиту, зважаючи на можливі помилки або варіації написання слів. Це особливо важливо в умовах, коли користувачі можуть використовувати різні форми вираження однієї і тієї ж ідеї. Такі алгоритми стають ключовим елементом у створенні інтелектуальних пошукових систем, здатних розуміти суть запиту та надавати релевантні результати, навіть якщо введення містить помилки. Розроблене програмне забезпечення може бути застосовано в інформаційному пошуку, обробці природної мови, виявленні плагіату, геноміці та багатьох інших. Розглянуті в статті методи й алгоритми можуть знаходити широке застосування у сферах, де необхідний високий рівень точності в інтерпретації та зіставленні текстових даних. В інформаційному пошуку вони допомагають поліпшити якість результатів, пропонуючи користувачеві більш релевантні варіанти відповідей на його запити, навіть якщо вони містять друкарські помилки або граматичні помилки. В обробці природної мови алгоритми можуть використовуватися для аналізу і розуміння людської мови, що є ключовим аспектом у створенні чат-ботів, систем машинного перекладу та інтелектуальних асистентів. При виявленні плагіату ці алгоритми здатні точно визначати схожість текстів, що важливо в академічних і дослідницьких колах. У геноміці ці методи можуть застосовуватися для зіставлення генетичних послідовностей, що має важливе значення в

¹ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-7085-8027, pronina.lelka@gmail.com

дослідженнях з біоінформатики. Таким чином, розроблене програмне забезпечення пропонує багатогранне застосування в різних галузях науки і техніки, де потрібен глибокий аналіз і розуміння текстових даних.

Ключові слова: текстовий аналіз, система пошуку, схожі речення, відстань між словами, порівняння текстових фрагментів, косинусна схожість, відстань Левенштейна, дипломний проект.

T.D. Goncharenko, O.I. Pronina. Comparison of algorithms for estimating the distance between words for finding similar sentences. The article in question delves into the intricacies of a newly developed system designed for the identification of similar sentences. This system operates on the principle of measuring the distance between words, utilizing algorithms that are adept at recognizing inexact matches. Such algorithms are vital as they enable search engines to process queries with a deeper understanding of context. They take into account potential discrepancies or variations in word spellings, a feature that becomes critically important when users employ diverse expressions to convey identical ideas. These algorithms form the backbone of intelligent search engines, equipping them with the ability to grasp the core intent of a query. This ensures the delivery of pertinent results, even when the input is marred by spelling or typographical errors. The software crafted as a result of this development finds its application across a broad spectrum of fields including information retrieval, natural language processing, plagiarism detection, and genomics, to name a few. The methodologies and algorithms highlighted in the article have significant implications in domains that demand a high degree of precision in text interpretation and comparison. In the realm of information search, these algorithms are instrumental in enhancing result quality, offering users more accurate responses to their queries, regardless of the presence of errors in spelling or grammar. In natural language processing, the algorithms play a pivotal role in analyzing and interpreting human language. This capability is fundamental for the development of advanced chatbots, machine translation systems, and intelligent digital assistants. Their application in plagiarism detection is equally noteworthy. Here, the algorithms demonstrate an exceptional ability to ascertain the degree of similarity between texts, a function that holds immense value in academic and research settings. In the field of genomics, these methods are employed for the intricate task of mapping genetic sequences, a vital process in bioinformatics research. In conclusion, the software developed as per the article presents a versatile tool, finding relevance in various scientific and technological arenas. Its ability to conduct a thorough analysis and comprehend textual data is unparalleled, marking a significant advancement in these fields.

Key words: text analysis, search system, similar sentences, distance between words, comparison of text fragments, cosine similarity, Levenshtein distance, diploma project.

Постановка проблеми. Область алгоритмів неточного порівняння рядків – це сфера, яка досліджує та розробляє методи для визначення ступеня схожості між текстовими рядками, з урахуванням можливих помилок, вставок, вилучень чи змін символів. Ця предметна область є ключовою в контексті аналізу текстової інформації в різних галузях, включаючи інформаційний пошук, обробку природної мови, плагіат-виявлення, геноміку та багато інших.

Область алгоритмів неточного порівняння рядків є критично важливою в контексті опрацювання текстової інформації, де неминучі друкарські помилки, варіації написання слів і різні форми вираження схожих ідей. У сучасних пошукових системах, наприклад, актуальність цієї царини проявляється в прагненні забезпечити точність і повноту результатів пошуку під час введення користувачем запитів із можливими орфографічними помилками.

Алгоритми неточного порівняння дають змогу пошуковим системам врахувати контекст запиту, враховуючи можливі помилки або варіації написання слів. Це особливо важливо в умовах, коли користувачі можуть використовувати різні форми вираження однієї й тієї самої ідеї. Такі алгоритми стають ключовою ланкою у створенні інтелектуальних пошукових систем, здатних розуміти зміст запиту і надавати релевантні результати, навіть якщо введення містить помилки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В області алгоритмів вимірювання відстані між реченнями є безліч робіт.

У роботі [1] авторами було досліджено різні метрики відстані між рядками для задачі зіставлення імен. Особлива увага приділялася завданням, пов'язаним із зіставленням імен в онлайн-просторі. Автори провели порівняльний аналіз ефективності різних метрик, включно з косинусною схожістю і метрикою Жаккара, а також запропонували свої рекомендації щодо вибору метрик залежно від конкретних сценаріїв використання.

Робота [2] В.І. Левенштейна, опублікована 1966 року, представила один із фундаментальних алгоритмів у галузі алгоритмів неточного порівняння рядків. Автор запропонував алгоритм редакційної відстані, який вимірює мінімальну кількість операцій (вставок, вилучень, замінів), необхідних для перетворення одного рядка в інший. Цей алгоритм виявився ключовим для багатьох завдань, включно з виправленням помилок і пошуком схожих фрагментів тексту.

У статті [3] G. Navarro представив огляд і порівняння різних методів пошуку наближених збігів рядків. Автор розглянув методи, засновані на деревах і префіксних деревах, а також надав аналіз їх застосовності в різних сценаріях. Робота стала важливим ресурсом для дослідників, які прагнуть зрозуміти й вибрати оптимальний метод пошуку збігів рядків залежно від контексту.

Робота [4] E. Ukkonen запропонувала алгоритми для наближеного пошуку схожих текстових фрагментів. Автор досліджував різні методи вимірювання відстані між рядками і запропонував їх застосування в контексті пошуку схожих текстів. Це дослідження поклало основу для розробки ефективних алгоритмів пошуку збігів у текстових даних.

У статті [5] M. Jaro було представлено метрику Jaro, розроблену спеціально для порівняння імен у задачах зіставлення записів. Автор запропонував формулу розрахунку метрики, що враховує загальні символи і порядок символів в іменах. Цей підхід виявився ефективним у задачах порівняння імен, наприклад, при зіставленні записів у базах даних.

Робота [6] G. Landau і U. Vishkin розглядає ефективні методи пошуку апроксимованих збігів у рядках. Автори запропонували алгоритми, що забезпечують лінійний час виконання, що є важливим аспектом в обробці великих обсягів текстової інформації. Робота стала важливим внеском у розробку ефективних алгоритмів пошуку збігів в умовах великих даних.

У роботі [7] Moffat A. та Zobel J. «Самоіндексування інвертованих файлів для швидкого пошуку тексту» автори заглиблюються у сферу самоіндексування інвертованих файлів як засобу досягнення швидкого пошуку тексту. Основна увага в дослідженні приділяється розробці та використанню методів самоіндексації в інвертованих файлових структурах для підвищення ефективності процесів текстового пошуку.

Робота [8] G. Myers описує алгоритм порівняння рядків з лінійним часом виконання, відомий як алгоритм з найменшими відмінностями (An O(ND) Difference Algorithm). Автор пропонує метод, який оптимально опрацьовує випадки вставок і вилучень у рядках, що є важливим у контексті пошуку збігів з можливими змінами.

У статті [9] A. Monge і C. Elkan представляють алгоритми порівняння текстових даних, сфокусовані на завданнях зіставлення записів та інтеграції інформації. Автори надають аналіз ефективності різних методів зіставлення записів і пропонують рекомендації для вибору відповідного методу залежно від конкретних вимог завдання.

Робота [10] S. Wu і U. Manber описує алгоритм пошуку схожості в тексті, який дозволяє помилки, такі як вставки і видалення, при ефективному виконанні пошуку. Автори представляють метод, який забезпечує ефективність під час пошуку збігів в умовах неточних даних, що є важливим аспектом під час обробки реальних текстових даних.

Мета дослідження. Метою даної роботи є підвищення ефективності порівняння строк за рахунок розробки методів та математичної моделі що лежить в основі.

Виклад основного матеріалу. Далі були розглянуті алгоритми схожих речень на основі оцінки відстані між словами. Спочатку було детально вивчено й описано різні алгоритми для вимірювання відстані між рядками.

Алгоритм Левенштейна, також відомий як редакційна відстань, використовували для вимірювання мінімальної кількості односимвольних операцій (вставка, видалення, заміна), необхідних для перетворення одного рядка в інший. Основа алгоритму полягала в матриці, де рядки відповідали символам першого рядка, а стовпці – символам другого рядка. Кожен осередок

матриці містив число, що представляло мінімальну відстань між підрядками першого і другого рядка, сформованими відповідними рядками і стовпчиками.

Наступний алгоритм Хеммінга описувався як міра відмінності між двома рядками однакової довжини. Він обраховував кількість позицій, на яких відповідні символи відрізнялися. Відстань Хеммінга порівнює два рядки однакової довжини та обчислює кількість позицій, у яких відповідні символи відрізняються. Він, в основному, використовується для двійкових рядків і не застосовується до рядків різної довжини.

Алгоритм Soundex, фонетичний метод індексації слів за їхнім звучанням в англійській мові, використовувався для кодування гомофонів в один і той самий код. У рамках алгоритму першу букву слова зберігали, а решту букв перетворювали на цифри за певними правилами. Послідовні дублікати чисел видаляли, виключаючи першу літеру, і формували кінцевий код, що складається з першої літери слова і трьох цифр, отриманих із літер, що залишилися. Цей метод був особливо корисний у базах даних і системах пошуку для спрощення пошуку за фонетичною схожістю.

Далі Відстань Жаккара – це міра різниці між двома струнами однакової довжини. Він підраховує кількість позицій, на яких відповідні символи відрізняються. Подібність Жаккара оцінює подібність між двома наборами шляхом вимірювання розміру їх перетину відносно їх об'єднання. Хоча спочатку він застосовувався до наборів, він був адаптований для використання в різних областях, включаючи обробку природної мови.

Косинусна подібність – це показник, який використовується для вимірювання схожості двох векторів, особливо в контексті просторів великої розмірності, таких як текстові дані. У випадку слів ми часто представляємо їх як вектори в просторі, де кожен вимір відповідає унікальному терміну або слову. Косинус подібності двох векторів обчислюється на основі косинуса кута між ними.

У контексті неточного порівняння двох слів, це зазвичай передбачає оцінку їхньої подібності чи спорідненості за значенням, а не точних збігів. У обробці природної мови одним із поширених способів представлення слів є використання вбудованих слів, які відображають слова в безперервні векторні простори.

Подібність косинусів особливо корисна в цьому контексті, оскільки вона залежить не від величини векторів, а лише від їх орієнтації. Це робить його ефективним для порівняння напрямку векторів, що представляють слова у багатовимірному просторі, фіксуючи семантичну подібність між словами.

Після розгляду алгоритмів була розроблена система для перевірки ефективності алгоритмів. На початку роботи система здійснює імпорт текстових документів, приховуючи від користувача деталі обробки та форматування тексту. Наступним кроком є токенизація тексту, тобто його розбиття на окремі речення з використанням неявних методів. Цей процес також може включати видалення стоп-слів для підвищення точності аналізу, оскільки вони часто зустрічаються в тексті, але не несуть значущої інформації про зміст.

Далі система переходить до порівняння відповідних речень із двох текстів, застосовуючи обрану метрику схожості, як-от відстань Левенштейна або косинусна схожість. Речення, визнані схожими, виводяться в текстові поля, а також формується статистика, що включає кількість схожих речень і загальну відстань між текстами.

Завершальний етап роботи системи – це виведення результатів і статистики. На цьому етапі створюються текстові віджети, в які записуються речення, визнані алгоритмом схожими. Крім того, алгоритм формує статистичну інформацію, що містить кількість схожих речень, загальну дистанцію між текстами та інші показники, корисні для аналізу. Виведення результатів здійснюється з урахуванням форматування, роблячи інформацію більш читабельною і зрозумілою для користувача.

Таким чином, розроблена система забезпечує комплексний підхід до аналізу текстів, надаючи користувачам точні та інформативні результати порівняння текстів на рівні окремих речень.

Після розроблення програмного забезпечення з реалізацією перерахованих вище алгоритмів було проведено кілька експериментів. Мета цих експериментів – оцінити, наскільки добре кожен алгоритм впорається із завданням визначення схожості та виявлення відмінностей між двома текстами, які загалом схожі, але містять деякі ключові відмінності. Це дасть нам змогу зрозуміти, які алгоритми більш чутливі до змін у тексті та як вони можуть бути використані для

виявлення й аналізу відмінностей у текстових даних. Такий підхід має особливе значення в завданнях, пов'язаних із перевіркою на плагіат, редагуванням текстів, а також в інших додатках, де важливо визначити ступінь зміни текстового змісту.

Результати одного з експериментів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати експерименту

Алгоритм	Відстань	Точність	Час виконання
Левенштейн	20	100%	00.000999 секунд
Хеммінг	5	90%	00.004005 секунд
Жаккар	7.62	50%	00.000999 секунд
Косинусна подібність	7.81	30%	00.082002 секунд
Soundex	800	10%	00.005005 секунд

Під час проведення експериментів було зібрано дані, що відображають результати роботи різних алгоритмів опрацювання тексту, які було представлено у вигляді трьох графіків: відстані, точності та часу виконання (рис. 1-3).

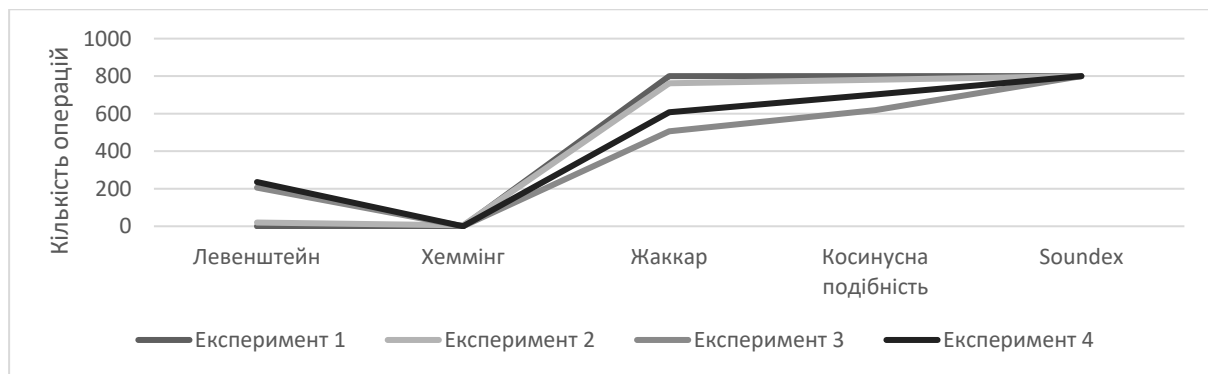


Рис. 1 – Графік результатів відстань

На графіку відстані спостерігалася тенденція, згідно з якою алгоритм Левенштейна показав найменшу відстань, що вказує на його високу чутливість до змін у тексті. Водночас, алгоритм Soundex продемонстрував значно більшу відстань, що свідчить про його обмежену спроможність до аналізу повних текстів у даному контексті. Алгоритми Жаккара та косинусної подібності показали проміжні значення відстані, що відображає їхню помірну чутливість до текстових змін.

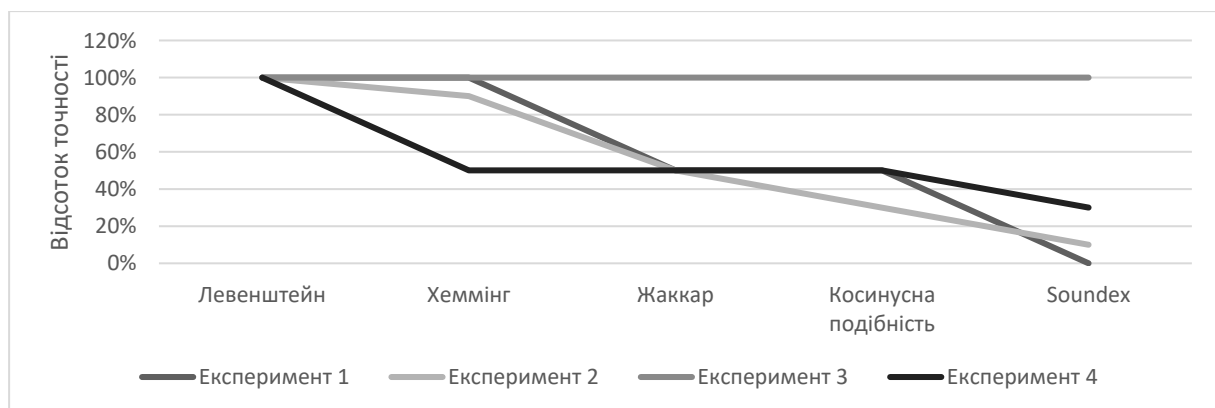


Рис. 2 – Графік результатів точності

На графіку точності було помітно, що алгоритм Левенштейна досяг 100% точності, що підтверджує його ефективність у визначенні ступеня змін між двома текстами. Алгоритм Хеммінга також показав високу точність, хоча його застосування було обмежене порівнянням текстів однакової довжини. На відміну від цього, алгоритми Жаккара, косинусної подібності та Soundex продемонстрували нижчу точність, що вказує на їхні потенційні обмеження в завданнях точного порівняння текстів зі змінами.

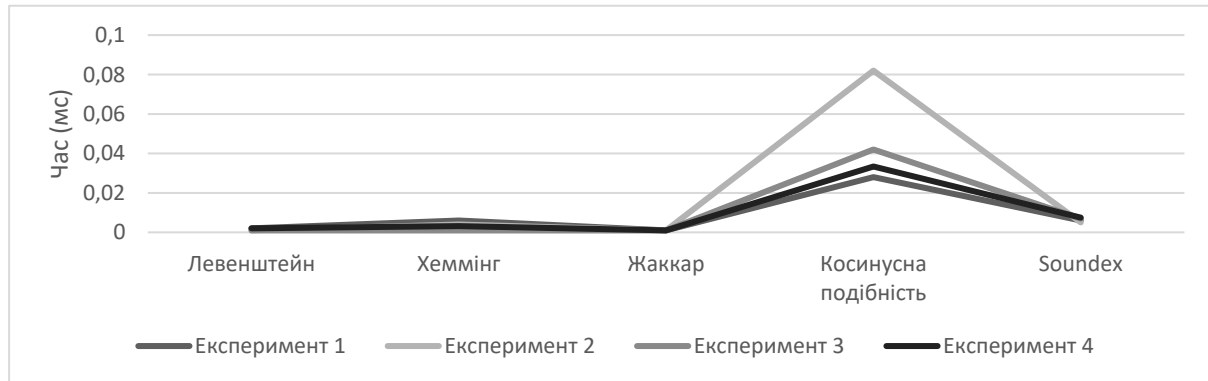


Рис. 3 – Графік результатів часу виконання

Нарешті, на графіку часу виконання алгоритм Левенштейна показав найкращі результати, завершивши завдання за найкоротший термін. Це підкреслює його перевагу у швидкості обробки даних. Алгоритм Хеммінга зайняв трохи більше часу, тоді як косинусна подібність вимагала значно більше часу для виконання того самого завдання. Алгоритм Soundex, незважаючи на свою низьку точність, показав середній час виконання.

У результаті, алгоритм Левенштейна проявив себе як найефективніший у експериментах, демонструючи високу точність і швидкість під час визначення змін у тексті. Ці результати підкреслюють важливість вибору відповідного алгоритму залежно від специфіки завдання і характеру оброблюваних текстових даних. Алгоритм Левенштейна, завдяки своїй гнучкості та ефективності, може бути особливо корисним у додатках, де потрібне швидке і точне порівняння текстів зі змінами.

Висновки

Під час дослідження було продемонстровано, що алгоритми неточного порівняння рядків, як-от алгоритми Левенштейна, Хеммінга, косинусної подібності, Жаккара та Soundex, відіграють ключову роль у розробленні ефективних систем пошуку схожих речень на основі оцінки відстані між словами. Ці алгоритми дають змогу пошуковим системам враховувати контекст запиту, з огляду на можливі помилки або варіації написання слів, що особливо важливо в умовах, коли користувачі можуть використовувати різні форми вираження однієї й тієї самої ідеї.

Алгоритм Левенштейна, що особливо вирізняється своєю здатністю вимірювати мінімальну кількість односимвольних операцій для перетворення одного рядка на інший, демонструє високу точність і ефективність у завданнях порівняння текстів. Алгоритм Хеммінга, хоча й обмежений порівнянням рядків однакової довжини, також показує хороші результати в певних сценаріях. Косинусна подібність, що використовує векторне представлення текстів, ефективна у високорозмірних просторах, особливо в додатках обробки природної мови. Алгоритм Жаккара, що фокусується на подібності між двома наборами, виявляється корисним під час порівняння текстів, представлених у вигляді наборів токенів. Нарешті, Soundex, хоча й обмежений у своєму застосуванні до англійської мови та фонетичного порівняння, пропонує цінні можливості в завданнях, де важлива фонетична схожість слів.

Таким чином, кожен із цих алгоритмів робить свій внесок у розробку систем пошуку схожих пропозицій, водночас їхня ефективність і застосовність залежать від конкретних вимог і характеру оброблюваних текстових даних. У результаті, вибір відповідного алгоритму значною мірою визначається специфікою завдання і вимогами до точності та швидкості обробки даних.

Перелік використаних джерел:

1. Cohen W.W., Ravikumar P. A comparison of string distance metrics for name-matching tasks. *Proceedings of the 2003 International Conference on Information Integration on the Web*, Acapulco, Mexico, 9-10 August 2003. Pp. 73-78.
2. Levenshtein V.I. Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. *Soviet Physics Doklady*. 1966. Vol 10. № 8. Pp. 707-710.
3. Navarro G. A guided tour to approximate string matching. *ACM Computing Surveys*. 2001. Vol. 33. Iss. 1. Pp. 31-88. DOI: <https://doi.org/10.1145/375360.375365>.
4. Ukkonen E. Algorithms for approximate string matching. *Information and control*. 1985. Vol. 64. Iss. 1-3. Pp. 100-118. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(85\)80046-2](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(85)80046-2).
5. Jaro M.A. Advances in Record-Linkage Methodology as Applied to Matching the 1985 Census of Tampa, Florida. *Journal of the American Statistical Association*. 1989. Vol. 84. No. 406. Pp. 414-420. DOI: <https://doi.org/10.2307/2289924>.
6. Landau G.M., Vishkin U. Fast string matching with k differences. *Journal of Computer and System Sciences*. 1988. Vol. 37. Iss. 1. Pp. 63-78. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-0000\(88\)90045-1](https://doi.org/10.1016/0022-0000(88)90045-1).
7. Moffat A., Zobel J. Self-indexing inverted files for fast text retrieval. *ACM Transactions on Information Systems*. 1996. Vol. 14. № 4. Pp. 349-379. DOI: <https://doi.org/10.1145/237496.237497>.
8. Myers G. An O(ND) difference algorithm and its variations. *Algorithmica*. 1986. Vol. 1. Pp. 251-266. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01840446>.
9. Monge A.E., Elkan C. The field matching problem: Algorithms and applications. *KDD'96: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, Portland, USA, 2-4 August 1996. Pp. 267-270.
10. Wu S., Manber U. Fast text searching allowing errors. *Communications of the ACM*. 1992. Vol. 35. Iss. 10. Pp. 83-91. DOI: <https://doi.org/10.1145/135239.135244>.

References:

1. W.W. Cohen, and P. Ravikumar, «A comparison of string distance metrics for name-matching tasks», in Proceedings of the 2003 International Conference on Information Integration on the Web, Acapulco, Mexico, 2003, pp. 73-78.
2. V.I. Levenshtein, «Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals», *Soviet Physics Doklady*, vol. 10, № 8, pp. 707-710, 1966.
3. G. Navarro, «A guided tour to approximate string matching», *ACM Computing Surveys*, vol. 33, iss. 1, pp. 31-88, 2001. doi: 10.1145/375360.375365.
4. E. Ukkonen, «Algorithms for approximate string matching», *Information and control*, vol. 64, iss. 1-3, pp. 100-118, 1985. doi: 10.1016/S0019-9958(85)80046-2.
5. M.A. Jaro, «Advances in Record-Linkage Methodology as Applied to Matching the 1985 Census of Tampa, Florida», *Journal of the American Statistical Association*, vol. 84, no. 406, pp. 414-420, 1989. doi: 10.2307/2289924.
6. G.M. Landau, and U. Vishkin, «Fast string matching with k differences», *Journal of Computer and System Sciences*, vol. 37, iss. 1, pp. 63-78, 1988. doi: 10.1016/0022-0000(88)90045-1.
7. A. Moffat, and J. Zobel, «Self-indexing inverted files for fast text retrieval», *ACM Transactions on Information Systems*, vol. 14, № 4, pp. 349-379, 1996. doi: 10.1145/237496.237497.
8. G. Myers, «An O(ND) difference algorithm and its variations», *Algorithmica*, vol. 1, pp. 251-266, 1986. doi: 10.1007/BF01840446.
9. A.E. Monge, and C. Elkan, «The field matching problem: Algorithms and applications», in KDD'96: Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Portland, USA, 1996, pp. 267-270.
10. S. Wu, and U. Manber, «Fast text searching allowing errors», *Communications of the ACM*, vol. 35, iss. 10, pp. 83-91, 1992. doi: 10.1145/135239.135244.

Рецензент: Т.О. Левицька
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 17.09.2023
Стаття прийнята 20.10.2023

**РОЗРОБКА ВЕБДОДАТКУ ДЛЯ МАГАЗИНУ ДЕКОРАТИВНИХ РОСЛИН
ЗА ДОПОМОГОЮ СТЕКУ ТЕХНОЛОГІЙ LARAVEL+REACT**

У даній статті проаналізований поточний стан сегменту вебдодатків, які можуть бути використані для побудови Інтернет-магазину у сфері торгівлі квітами та кімнатними рослинами. Був проаналізований міжнародний та український досвід проектування додатків для електронної торгівлі у цій сфері, підсвічені особливості електронної торгівлі рослинним товаром, специфіка сегментування асортименту та організації продажів. У статті детально висвітлені варіанти рішення та організації стеку програмування для даного проекту, а також досить ретельно висвітлена структура проекту і певні особливості його функціонування. Параметри, на основі яких приймалось рішення про вибір системи управління базою даних, мова програмування, фреймворки та допоміжні засоби висвітлені окремо. Основним критерієм для вибору методики розробки, середовища та підходів є доцільність, тому що проект є невеликим і досить дешевим, тому його функціонал повинен бути раціонально обмеженим з можливістю подальшого розвитку та масштабування, тому важливою задачею було відшукування балансу між швидкістю розробки та якістю та можливістю подальшої підтримки проекту. За результатами аналізу було обрано стек на основі популярного фреймворку Laravel і супутніх технологій. Одним з ключових питань при розробці Інтернет-магазину або іншої платформи для електронної комерції є організація категорій та фільтрів. Сфера продажу рослин є досить специфічною, тому що параметри рослин значно відрізняються від параметрів товарів, що найчастіше продають через Інтернет, техніки та одягу. Організація фільтрів потребує глибинного підходу, починаючи від вибору відповідної технології баз даних, побудування системи сутностей і адаптації коду як на фронтенді, так і на бекенді, до цієї задачі, тоді як для задач формування замовлення, оплати і оформлення доставки існують досить раціональні рішення, організація категоризації і фільтрації часто потребує індивідуального підходу.

Ключові слова: електронна комерція, інтернет-магазин, вебсервер, система управління базами даних, MySQL, PHP, Javascript, Laravel, React, реляційна модель, цілісність даних, фільтрація товарів, категорії товарів.

O.A. Tuzenko, S.I. Volodin. Development of a web application for houseplants e-commerce shop based on technology stack Laravel + React. In this article a current state of art of the web commerce applications is analyzed, especially the applications which can be used to build a web shop to sell flowers and plants were reviewed. The international and Ukrainian experience of building e-commerce projects in current area was analyzed, some specific features of e-commerce trading of plants goods were highlighted, as well as specific ways to assortment segmenting and sales organization. The web commerce field focused mostly on selling plants and gardening accessories is not too busy in Ukraine. The existing programmatic web solutions are too complex and sometimes are excess for small or middle size project. That's why current project could be efficient. In current paper the solutions for organization of programming stack for the project are analyzed, also the project's structure and some features were reviewed. The params based on which the decision about database management system's choice were made as well as programming language and additional features are separately covered. The main criteria for the development

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-4920-9417, tuzenkoaa@gmail.com

² ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, volodinsi57@gmail.com

method choice and development approaches were effectiveness because the project belongs to a specific field and its features are to be rationally limited with ability to scale and improve it through time, because of this an important task was to find the balance between rapid development and quality and supportability of the project. Based on the analysis results a stack of popular framework Laravel with supporting technologies was selected one of the key solutions in web store development or any other e-commerce platform is filtering as well as categorizing items. Selling plants is a rather specific field because the params are very different from the usual goods params, for example features of electronics or size and quality for clothes sold in Internet. Filtering requires deep approach to it, starting from corresponding and effective database management system's choice, constructing entities system and code adaptation on backend and frontend, when the routine tasks as order placement, payment and delivery could have standard approaches. The categories and filters often require and individual solution.

Key words: e-commerce, web store, web server, database management system, MySQL, PHP, Javascript, Laravel, React, relational database, data integrity, item filtering, item categories.

Постановка проблеми. У зв'язку з широким розповсюдженням мережі Інтернет та розвитком вебтехнологій все більше продавців залучають електронну торгівлю до свого бізнесу. Через Інтернет продається широкий спектр товарів, в тому числі товари, які раніше можна було купити тільки в фізичних магазинах, наприклад, декоративні рослини та аксесуари для їх культивування. Декоративні рослини не тільки прикрашають наше житло, але і очищають повітря у приміщенні, що дуже важливо у вік технічного прогресу. Крім того, вони просто допомагають створити гарну атмосферу та підняти настрій. У сучасних умовах негативного впливу на людину постійних стресів і забрудненості навколишнього середовища декоративні рослини завдяки своєму зовнішньому вигляду і властивостям у приміщеннях житлових будинків, офісів, різних закладів та установ можуть виконувати такі важливі функції, як створення сприятливої для роботи атмосфери спокою та концентрації, зняття у деякій мірі психоемоційного напруження, очищення повітря від шкідливих для здоров'я людини речовин, тому завдання озеленення приміщень не перестає втрачати актуальності. Проте для успішного вирощування та утримання рослин потрібні певні умови та догляд, що відрізняються для кожного виду, тому доцільно здійснювати правильний підбір у магазині кімнатних рослин за допомогою спеціалістів. Наявність електронного магазину дозволяє залучити нову клієнтську аудиторію та надає можливість постійним і потенційним покупцям правильно підбирати рослини за необхідними параметрами, оформити замовлення на купівлю та доставку, дізнатися необхідну інформацію або запланувати консультацію, не виходячи з дому та економлячи власні час і ресурси. Але декоративні рослини як окрема група товарів мають низку особливостей в якості товару, що продається онлайн. Наприклад, рослини потребують специфічних умов зберігання та догляду, бо є живими, до того ж їх важливо правильно спакувати. До того ж деякі рослини є карантинними видами, і донедавна біологічні об'єкти були заборонені до транспортування у більшості поштових і кур'єрських сервісів як в Україні, так і за кордоном. Але найбільш цікавою в розрізі розробки програмного продукту для продажу рослин є те, що вони мають досить специфічний набір параметрів, оскільки є біологічним об'єктом. Так для рослин важливо вказати правильну біологічну класифікацію, щоб покупці могли орієнтуватись, які саме види або сімейства рослин вони прагнуть вирощувати у своїй оселі. Також набір параметрів, які характеризують рослину як товар, є індивідуальним і потребує особливої уваги до категоризації і налаштування фільтрів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Повноцінне функціонування вебдодатку інтернет-магазину неможливо без постійної роботи із необхідними даними, що є динамічними.

За кордоном продажем рослин займаються як великі маркети та платформи на кшталт Amazon [1], Best Buy, The Home Depot, так і спеціалізовані магазини The Sill [2], Bloomscape [3] та найбільші спеціалізовані європейські маркети Gardens For You [4] та PLNTS [5]. Також існує безліч інструкцій, як продавати власні рослини на різноманітних платформах, тому що це є популярним хобі та способом вести малий бізнес у багатьох країнах світу.

Існує багато аналогічних програмних продуктів і в Україні. Особливістю українського ринку є відсутність великих спеціалізованих маркетів та магазинів та обмежений продаж рослин

і супутніх товарів на спеціалізованих універсальних чи господарських платформах та в онлайн-супермаркетах. Ще однією особливістю є деяка стихійність у продажу рослин через популярні платформи для приватних оголошень та малих бізнесів, на популярних сайтах переважають приватні оголошення. Розглянемо деякі спеціалізовані українські сайти середнього рівня – такі популярні українські інтернет-магазини декоративних рослин, як «iFlowers» [6], «Флорен» [7] та «Перша квітова компанія» [8].

Інтернет-магазин «iFlowers» з місцезнаходженням у Києві надає широкий вибір декоративних рослин та аксесуарів для догляду за ними, а також має зручну навігацію за назвою рослини в розділі «Енциклопедія». Переваги: зручна навігація за категоріями товарів і назвами рослин; достатня структурованість контенту; наявність пошуку; наявність базової фільтрації товарів у каталозі; відображення суми замовлення кошику та кількості товарів у ньому, наявність попереднього перегляду. Недоліки: дещо застарілий дизайн; відносно повільна швидкість завантаження окремих елементів інтерфейсу; відсутність функціоналу особистого кабінету користувача; відсутність мобільної адаптації; невелика кількість параметрів системи фільтрації.

Інтернет-магазин студії фітодизайну «Флорен» має зручну навігацію та найкращу структурованість контенту серед розглянутих аналогів, що сприяє кращому сприйняттю користувачем необхідної інформації. Переваги: зручна навігація за категоріями товарів; достатня структурованість контенту; наявність мобільної адаптації; достатня інформативність на сторінці товару; наявність пошуку; наявність базової фільтрації товарів у каталозі; наявність функціоналу підписки на email-розсилку. Недоліки: дещо застарілий дизайн; відсутність функціоналу особистого кабінету користувача; невелика кількість параметрів системи фільтрації; відсутність відображення суми замовлення кошику та кількості товарів у ньому, попереднього перегляду.

Інтернет-магазин підприємства «Перша квітова компанія» з доставкою замовлень за будь-якою адресою в Києві або Київській області відрізняється від попередніх розглянутих аналогів наявністю сучасного дизайну та якісно оформленого графічного контенту в єдиному стилі. Переваги: сучасний дизайн; зручна навігація за категоріями товарів; структурованість контенту; наявність функціоналу особистого кабінету користувача; наявність пошуку; наявність базової фільтрації товарів у каталозі; відображення кількості товарів у кошику. Недоліки: деякі компоненти інтерфейсу «перенавантажені» кількістю елементів; недостатньо зручна у використанні мобільна адаптація; невелика кількість параметрів системи фільтрації.

Отже, при розробці вебдодатку магазину кімнатних рослин необхідно врахувати можливість та переваги й усунути недоліки вже існуючих програмних продуктів, переважно це незручна або погано спеціалізована до товарів фільтрація, недостатньо прозорий шлях користувача до покупки. Оскільки ця ніша поки не сильно зайнята в Україні, є раціональним шукати шляхи покращувати користувацький досвід саме у цій сфері для того, щоб проект міг зайняти позицію на ринку.

Мета дослідження – розробка вебдодатку для магазину з продажу декоративних рослин, що забезпечить клієнтам можливість зручного підбору рослин і необхідних товарів, їх замовлення в онлайн-форматі, а також доступ до актуальної інформації.

Виклад основного матеріалу. Магазин декоративних рослин являє собою підприємство роздрібної торгівлі, що спеціалізується на таких товарах, як декоративні рослини, ґрунт, засоби й інструменти для догляду за рослинами та інші тематичні товари і супутні послуги, пов'язані з вирощуванням та утриманням декоративних рослин. Основою роботи магазину декоративних рослин є торгово-технологічний процес – сукупність пов'язаних, послідовно виконуваних операцій, метою яких є доведення товарів до торгового залу для реалізації їх покупцям при оптимальних витратах часу і високому рівні торговельного обслуговування. Торгово-технологічний процес складається з двох частин: торгового та власне технологічного процесів. Основну роль в організації торгового-технологічного процесу в даному випадку відіграють операції торгового процесу, які полягають у здійсненні продажу товарів та обслуговуванні покупців. Саме їх потрібно автоматизувати. Одним із зручних способів поєднання автоматизації обліку і продажу товарів є універсальний вебдодаток електронної комерції. У даній роботі було розроблено такий вебдодаток інтернет-магазину кімнатних рослин.

Вебдодаток є зручним у використанні як для працівників та керівництва магазину, так і для його клієнтів. Для використання вебдодатку працівниками та керівництвом, крім загальнодоступної частини для клієнтів, була розроблена спеціалізована частина з обмеженим доступом –

панель адміністратора. Вебдодаток має класичну клієнт-серверну архітектуру з базою даних реляційного типу.

Для реалізації концептуального проектування схеми бази даних була побудована ER-модель, графічним представленням якої є діаграма (діаграма «сутність-зв'язок»), що зображена на рис. 1. Елементами опису реляційної моделі даних на концептуальному рівні є сутності, атрибути та зв'язки.

Розглянемо основні програмні засоби для створення вебдодатків.

На ринку програмного забезпечення для реалізації проектів електронної комерції є декілька популярних рішень, які часто використовуються малими та середніми бізнесами.

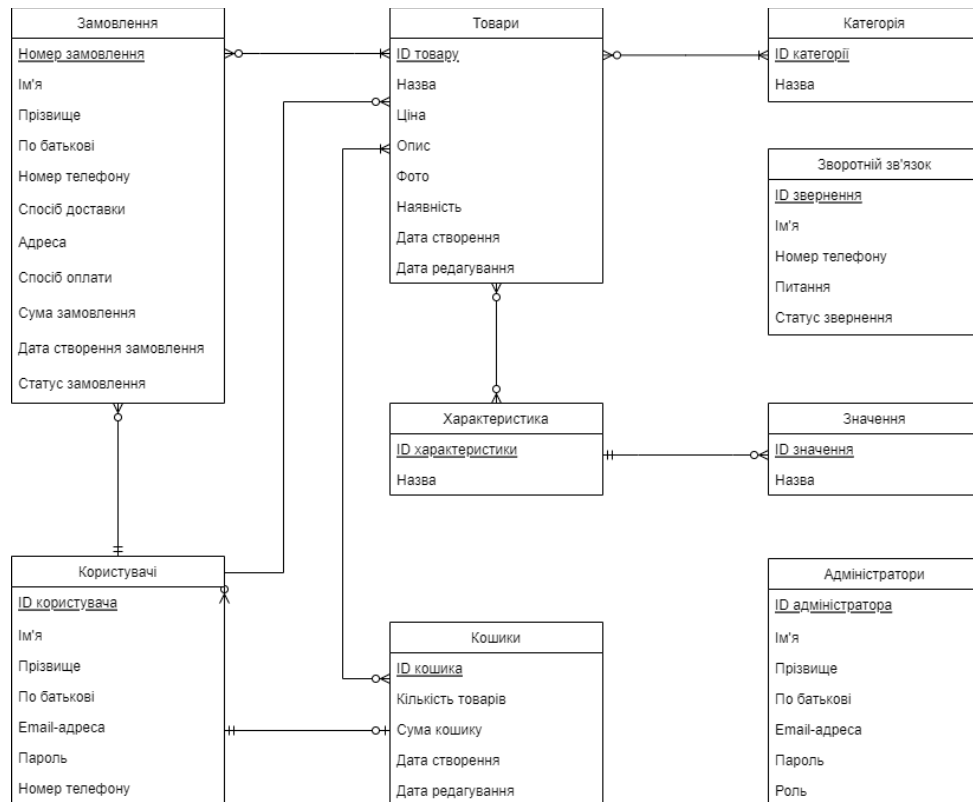


Рис. 1 – Концептуальна модель

Одним з найпопулярніших рішень для малих бізнесів, особливо при продажу роздрібного товару, є Shopify [9]. Він представляє собою продукт, який базується на серверних та хмарних технологіях та надає послуги у форматі Software as a Service (SAAS). Shopify має розвинену інфраструктуру та здатен підключатись до різноманітних каналів даних, таких як соціальні мережі, платформи для продажу накшталт eBay, Amazon, Etsy, імпортувати дані із різноманітних комерційних додатків та баз даних. Але через те, що функціонал таких систем є дещо надлишковим для даної задачі, було вирішено побудувати лімітовану версію програмного забезпечення для електронної комерції.

Для проектування та побудови вебдодатку, який включатиме в себе модулі управління запасами та модуль безпосередньо електронної комерції, є вкрай важливим вибір адекватного стеку розробки. Сучасна веброзробка пропонує кілька популярних, розвинених та стабільних варіантів стеку розробки, де бекенд (серверна частина додатку) базується на одній з мов веброзробки та відповідних «екосистем»: PHP та супутні їй технології веб-серверів та баз даних, асинхронні серверні додатки на базі мови програмування Javascript та її серверних реалізацій.

Оскільки у додатку необхідно зберігати багато динамічних даних, то спочатку було розглянуто системи управління базами даних, такі як MySQL [10], PostgreSQL [11], SQLite [12], MongoDB [13]. Кожна з зазначених баз даних підходила для реалізації завдань, крім SQLite, тому що для неї треба було організувати додаткові заходи з безпеки та організації даних поза

сесіями користувачів. PostgreSQL та MongoDB, які є нереляційними базами даних та дозволяють зберігати будь-які дані будь якого формату у своїх об'єктах, мають перевагу у швидкості, гнучкості використання. Але для проектування структури фільтрів та ефективної системи пошуку і вибору товарів вимагає ще і структурованості та цілісності посилань та ключів всередині бази даних. Це задачі, які традиційні для MySQL, реляційної БД, яка за допомогою зовнішніх та первинних ключів гарантує якісний зв'язок об'єктів і простоту організації їх класифікації та фільтрації. На відміну від нереляційних баз даних, MySQL вимагає від розробника навичок побудування реляційних відносин і володіння мовою MySQL, але натомість вона дозволяє побудувати структуру, в якій відносно легко організувати фільтрацію та пошук. Єдиним суттєвим недоліком MySQL у порівнянні з нереляційними базами даних є значно менша швидкість обробки даних, особливо затримки помітні на великих та надвеликих вибірках даних. Але даний проект не оперує настільки великими об'ємами даних, стандартний електронний магазин є проектом, який може мати малий або середній трафік. Якщо проект у перспективі розвинеється до високонавантаженої платформи, потрібне буде досить складне масштабування, але на даний момент є доцільним використовувати популярне, добре документоване й структуроване рішення, таке як MySQL. При проектуванні бази даних слід враховувати, що її структура має бути придатною до масштабування.

Для побудови бекенд частини, або так званого «серверу», також треба було обрати стек технологій. Сучасний ринок технологій пропонує широкий спектр рішень на основі скриптових і об'єктно-орієнтованих мов. Це і компільовані серверні додатки на основі мов програмування Java, C++, і асинхронні рішення, які базуються на скриптових мовах, здебільшого на Javascript, Java та Python [14]. Одним з найпопулярніших і водночас найдоступніших рішень є Node.js – програмна платформа, що базується на мові Javascript та дозволяє використовувати цю мову не тільки як клієнтську мову у середовищі браузера, а як мову загального призначення, а в нашому випадку як серверну мову для бекенду. Але це рішення, яке дозволяє зробити бекенд асинхронним, є дещо надлишковим, бо дані, які користувач бачить і використовує не оновлюються настільки динамічно, щоб кожна зміна стану серверу повинна була бути відображеною на екрані у користувача. Для проекту середнього рівня нам достатньо мати синхронну реалізацію бекенду, яка буде оновлювати дані за запитом користувача. Найпоширенішою і найстабільнішою реалізацією такого підходу є побудова серверу на базі мови PHP та веб-серверу Apache, nginx або їх комбінації чи похідних від них проектів. Для полегшення рутинних задач часто використовують PHP фреймворки, це дозволяє уникнути помилок, проблем з безпекою та роботою зі сторонніми сервісами, базами даних, а також організацією запитів і серверних відповідей на них.

У сучасній розробці вебдодатків практично неможливо обійтись без таких вебтехнологій, як бібліотеки або фреймворки, які забезпечують виконання поширених рутинних задач, підвищення безпеки, зручність, масштабованість, економію часу та ресурсів. Для проектування бекенду на ринку існують кілька сотень великих та середніх вебпроектів, які розробляють фреймворки, розробка і тестування яких проводиться компанією-провайдером або спільнотою, тому тестування, виправлення помилок, що приводять до вад безпеки або роботи власне фреймворку, відбувається відносно швидко і робить роботу додатку досить стабільною. Серед найпоширеніших такі, як Laravel [15], Symfony [16], Yii [17]. Вибір фреймворку для бекенду складний та багатокритеріальний процес. Нема чіткого списку вимог до того чи іншого проекту, які цей фреймворк допомогли б обрати. Процес базується на об'єктивних параметрах таких, як підтримуваність фреймворку, складність реалізації, необхідні бібліотеки і наявність готових модулів до нього, та суб'єктивних прикметах, які дозволяють команді розробників обирати те, що є зручнішим саме для цієї групи людей. Для даного проекту було обрано Laravel, як фреймворк, для якого є чи не найбільше документації, готових модулів, рішень та рамкових проектів.

Не менш складною є задача вибору засобів реалізації і для фронтендової частини. Варіантів реалізації взаємодії з користувачем є безліч, починаючи від синхронного завантаження майже статичних вебсторінок, які відображують поточний стан серверного додатку, до майже автономного додатку, який працює на стороні браузера і з сервером тільки обмінюється певним набором даних. Вибір технології залежить від задач проекту. Для проектів у сфері електронної комерції популярним є використання комбінованої моделі, тобто розділи сайту завантажуються у браузер користувача у вигляді HTML сторінок із Javascript, а потім код всередині сторінки працює як асинхронний додаток. Для ефективної розробки такої клієнтської частини вебдодатків згідно

дослідженню StackOverflow [18] використовуються такі технології, як React [19], Angular [20], Vue [21]. Кожен з Javascript фреймворків має свої особливості реалізації та взаємодії з сервером. Для задач поточного проекту найбільше підійшов відносно легкий, але потужний React. React (або React.js чи ReactJS) – це JavaScript-бібліотека з відкритим вихідним кодом для створення користувацьких інтерфейсів на основі компонентів. Компонент – це частина інтерфейсу користувача, яка має власну логіку та зовнішній вигляд. Компонент може бути розміром з кнопку або цілу сторінку. React може бути використаний в якості основи при розробці односторінкових або мобільних додатків.

Для розробки вебдодатку було обрано наступний стек розробки:

1. СУБД MySQL.
2. Бекенд реалізовано на основі мови PHP за допомогою фреймворка Laravel.
3. Для реалізації клієнтської частини (фронтенду) використано бібліотеку React.js.

Вебдодаток має наступну структуру і виконує такі функції:

1) Загальнодоступна частина:

1.1) головна сторінка (відображається для усіх користувачів і відвідувачів сайту незалежно від того чи зареєстровані вони у системі):

- розділ «Категорії»: відображення переліку категорій товарів у формі карток категорій;
- розділ «Популярні товари»: відображення переліку декількох популярних товарів у формі карток товарів;
- розділ «Зворотній зв'язок»: заповнення і відправка користувачем форми зворотнього зв'язку з його особистими даними (ім'я, email-адреса, номер телефону) і текстом питання;

1.2) сторінка «Каталог» (доступна для усіх користувачів і відвідувачів):

- відображення переліку відфільтрованих товарів каталогу у формі карток товарів;
- фільтрація товарів за необхідними параметрами;
- перехід на сторінки товарів;

1.3) сторінка «Товар каталогу» (доступна для усіх користувачів і відвідувачів)::

- відображення інформації про товар, його характеристик, опису, графічного зображення;
- додання товару в кошик із зазначенням його кількості;

1.4) сторінка «Кошик» (доступна для усіх користувачів, але для завершення замовлення необхідний обліковий запис):

- наведення переліку товарів у кошику (назва товару, кількість, ціна за одиницю товару, вартість) із загальною вартістю товарів у кошику;
- зміна кількості товару в кошику;
- видалення товару з кошику;
- перехід до оформлення замовлення;

1.5) сторінка «Оформлення замовлення» (доступна тільки зареєстрованим користувачам, які мають обліковий запис):

- заповнення і відправка користувачем форми оформлення замовлення (ПІБ, email-адреса, номер телефону користувача, що оформлює замовлення, адреса доставки, спосіб доставки, спосіб оплати, коментар до замовлення під час оформлення замовлення);

1.6) сторінка «Подяка за замовлення» (відображається після успішного завершення замовлення, також доступна тільки зареєстрованим користувачам):

- відображення повідомлення про успішне оформлення замовлення з необхідною інформацією для користувача чи помилку;
- перехід на сторінку особистого кабінету;

1.7) сторінка «Вхід» (доступна тільки незареєстрованим користувачам):

- автентифікація (вхід) зареєстрованого користувача за email-адресою і паролем;

1.8) сторінка «Реєстрація» (доступна тільки незареєстрованим користувачам):

- реєстрація незареєстрованого користувача із введенням імені, email-адреси, паролю;

1.9) сторінка «Підтвердження email-адреси» (доступна тільки зареєстрованим користувачам і тільки один раз, коли вони саме вперше реєструються):

- відправка електронного листа за вказаною email-адресою для її підтвердження користувачем;

1.10) сторінка «Зміна паролю»:

- скидання користувачем старого і встановлення нового паролю;
- 1.11) сторінка «Особистий кабінет» (доступна тільки зареєстрованим користувачам):
 - вкладка «Особисті дані»: відображення переліку особистих даних облікового запису користувача; редагування особистих даних облікового запису користувача;
 - вкладка «Збережені»: наведення переліку товарів, які користувач відмітив як збережені; перехід на сторінки збережених товарів;
 - вкладка «Замовлення»: наведення переліку всіх замовлень користувача;
- 1.12) сторінка «404» (доступна усім відвідувачам навіть ботам індексації):
 - відображення повідомлення про те, що заданий користувачем адрес сторінки вебдодатку не існує.
- 2) Панель адміністратора:
 - 2.1) головна сторінка:
 - відображення кількості замовлень, нових клієнтів і загальної суми продажів за певний період часу;
 - 2.2) сторінка «Товари»:
 - наведення переліку товарів каталогу;
 - додання нового товару в каталог;
 - редагування існуючого товару каталогу;
 - 2.3) сторінка «Категорії»:
 - наведення переліку категорій товарів;
 - додання нової категорії товарів;
 - редагування існуючої категорії товарів;
 - 2.4) сторінка «Замовлення»:
 - наведення переліку замовлень клієнтів;
 - зміна статусу замовлення;
 - 2.5) сторінка «Зворотній зв'язок»:
 - наведення переліку звернень клієнтів за формою зворотнього зв'язку;
 - зміна статусу звернення;
 - 2.6) сторінка «Клієнти»:
 - наведення переліку клієнтів, які є зареєстрованими користувачами;
 - 2.7) сторінка «Користувачі»:
 - наведення переліку користувачів панелі адміністратора;
 - додання нового користувача або видалення (для користувачів з правами доступу додання або видалення користувачів).
- Вхідні дані вебдодатку:
 - для загальнодоступної частини: email-адреса, пароль користувача під час реєстрації; email-адреса, пароль користувача під час автентифікації (входу); ім'я, email-адреса, номер телефону, текст питання користувача під час відправки форми зворотнього зв'язку; вибір користувачем необхідних параметрів під час використання фільтру каталогу товарів; вибір користувачем товару та його кількості для додання в кошик; текстовий рядок для пошуку; ПІБ, email-адреса, номер телефону користувача, що оформлює замовлення, адреса доставки, спосіб доставки, спосіб оплати, коментар до замовлення під час оформлення замовлення.
 - для панелі адміністратора: email-адреса, пароль користувача під час автентифікації (входу); назва, графічне зображення, опис та інші характеристики і параметри товару під час додання нового товару в каталог або редагування існуючого; назва, графічне зображення, опис категорії товарів під час додання нової категорії або редагування існуючої; статус замовлення під час управління статусами замовлень; статус звернення клієнта за формою зворотнього зв'язку; назва та необхідні параметри ролі під час додання нової ролі розмежування прав доступу або редагування існуючої.
- Користувачами вебдодатку є:
 - працівники основного відділу магазину, що безпосередньо надають послуги (адміністратор, контент-менеджер, спеціалісти з догляду за рослинами, продавці-консультанти);
 - керівництво магазину;

– клієнти магазину.

Головна сторінка вебдодатку зі сторони клієнта наведена на рис. 2, головна сторінка зі сторони адміністратора – на рис. 3.

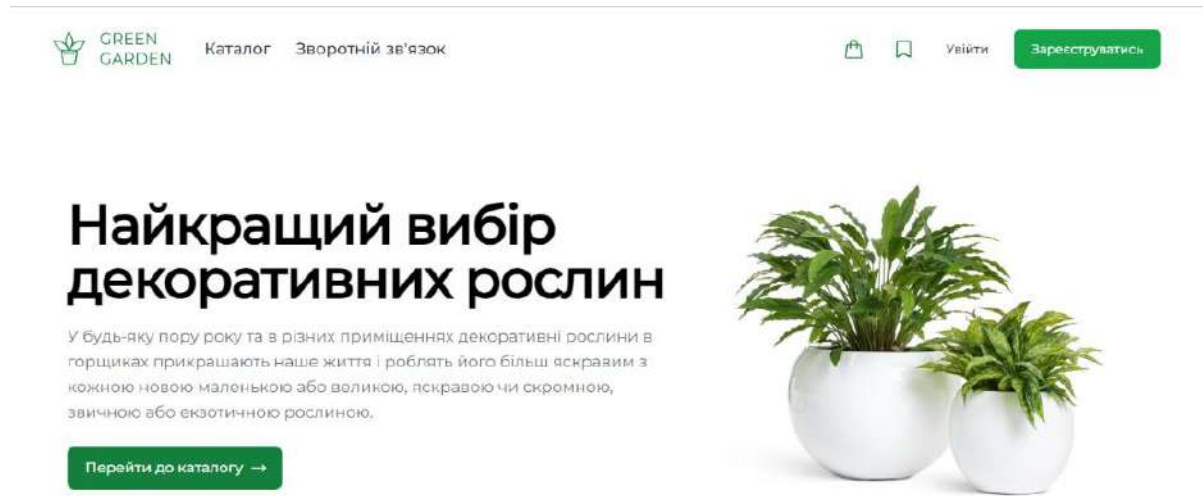


Рис. 2 – Головна сторінка вебдодатку зі сторони клієнта

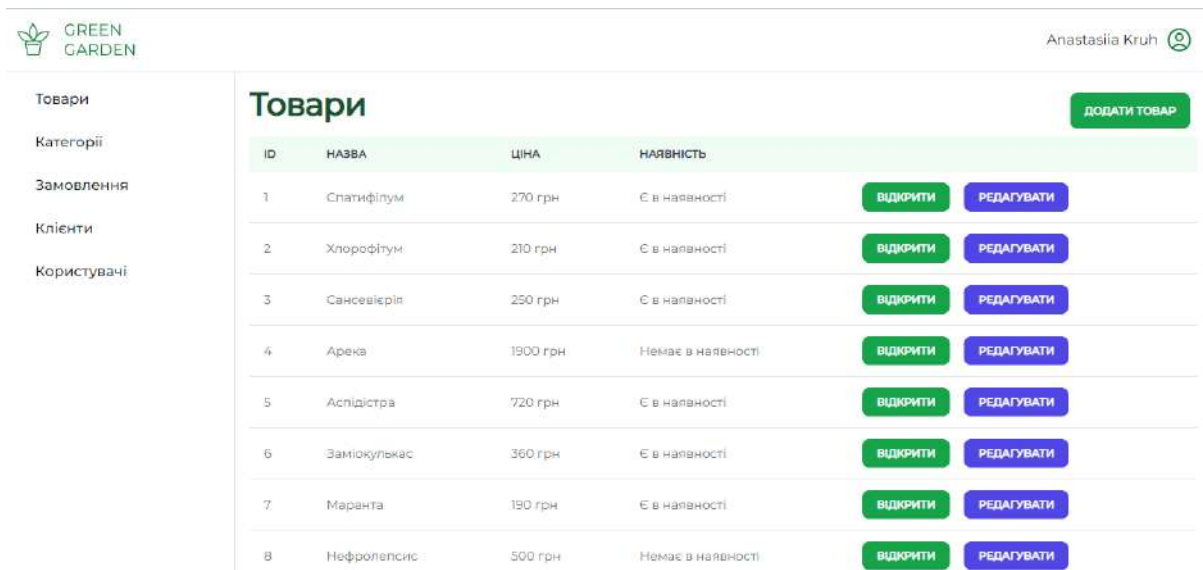


Рис. 3 – Головна сторінка вебдодатку зі сторони адміністратора

Вимоги до надійності роботи вебдодатку:

- захист від помилкових вихідних даних;
- захист від некоректного користувацького введення;
- кросбраузерність (однакове коректне відображення і функціонування веб-додатка у різних браузерах), браузери: Google Chrome, Mozilla Firefox, Opera, Microsoft Edge.

Вимоги до безпеки:

- базовий захист від таких видів загроз інформаційної безпеки, як XSS (міжсайтового скриптингу), SQL-ін'єкцій, CSRF-вразливостей;
- розмежування прав доступу, контроль рівня доступу компонентів для різних користувачів за ролями;
- автентифікація користувачів з використанням багаторазових паролів.

Таким чином, створений вебдодаток дозволяє застосовувати фільтри за категоріями рослин, їх висотою та діаметром горщика, властивостями та розташуванням у приміщенні, рівнем освітлення та вологості, а також знаходить перелік відфільтрованих користувачем за необхідними параметрами товарів каталогу у формі карток, при натисканні на кожну з яких здійснюється перехід на відповідну сторінку товару. На сторінці товару користувач має можливість детально ознайомитися із описом і властивостями товару, а потім додати його в кошик. Додавати товари в кошик можуть тільки зареєстровані користувачі. Користувач із роллю адміністратора має доступ до усіх розділів і може їх редагувати.

Висновки

1. Зроблено огляд основних найсучасніших технологій та методів вирішення проблем при розробці вебдодатків.
2. Проаналізовано аналогічні сучасні програмні засоби. Виявлено їх переваги та недоліки.
3. Створено вебдодаток інтернет-магазину декоративних рослин, який забезпечує додатковий режим роботи магазину декоративних рослин в онлайн-форматі.
4. Виявлено, що використання розробленого вебдодатку для магазину декоративних рослин дозволить зайняти нішу у малому, а в майбутньому і в середньому сегменті вебдодатків для магазинів квітів і кімнатних рослин, тому що ринок України ще не насичений такого типу додатками для електронної комерції.
5. Наведені вимоги до надійності роботи вебдодатку, до безпеки, до ергономіки та технічної естетики вебдодатку.
6. Розроблена система категоризації та фільтрації, що робить зручним вибір рослин по параметрам, особливо якщо параметри є нечіткими, або інформація щодо вимог до рослин є неповною.

Перелік використаних джерел:

1. Amazon Plants: платформа для продажу кімнатних рослин. URL: <https://www.amazon.com/s?k=house+plants+on+amazon> (дата звернення 09.09.2023).
2. The Sill: магазин кімнатних та садових рослин. URL: <https://www.thesill.com/> (дата звернення 09.09.2023).
3. Bloomscape: електронний супермаркет кімнатних рослин. URL: <https://bloomscape.com/> (дата звернення 09.09.2023).
4. Gardens For You: європейський портал з садівництва. URL: <https://www.gardens4you.eu/> (дата звернення 09.09.2023).
5. PLNTS: онлайн магазин та інформаційний портал. URL: <https://plnts.com/> (дата звернення 09.09.2023).
6. iFlowers: український інтернет магазин кімнатних рослин. URL: <https://iflowers.com.ua/> (дата звернення 29.03.2023).
7. Флорен: інтернет портал з садівництва. URL: <https://floren.com.ua/ua/> (дата звернення 29.03.2023).
8. ПЕРША КВІТКОВА КОМПАНІЯ: компанія з продажу та супроводу кімнатних рослин. URL: <https://plants.pervaya.com.ua/ua/> (дата звернення 29.03.2023).
9. What is Shopify and How Does It Work. URL: <https://www.forbes.com/advisor/in/business/software/what-is-shopify> (дата звернення 11.09.2023).
10. Stokes D. MySQL and JSON: A Practical Programming Guide. New York : McGraw Hill, 2018. 128 p.
11. Stones R., Neil M. Databases with PostgesSQL. New York : Apress, 2002. 550 p.
12. Owens M., Allen G. The Definitive Guide to SQLite. New York : Apress, 2010. 750 p.
13. Bradshaw S., Brazil E., Chodorow K. MongoDB: The Definitive Guide. Sevastopol : O'Reilly Media, 2019. 498 p.
14. Introduction to Developing Asynchronous Web Services. URL: <https://docs.oracle.com/middleware/1221/owsm/WSCPT/jrf-async-ws.htm#WSCPT204> (дата звернення 16.09.2023).
15. Pecoraro C. Mastering Laravel. Birmingham : Packt Pub., 2015. 204 p.
16. Zaninotto F. The definitive Guide to Symfony. New York : Apress, 2018. 520 p.

17. The Definitive Guide to Yii 2.0. URL: <https://www.yiiframework.com/doc/guide/2.0/en> (дата звернення 29.03.2023).
18. Stack Overflow Developer Survey 2022. URL: <https://survey.stackoverflow.co/2022> (дата звернення 29.03.2023).
19. Banks A. Learning React: Functional Web Development With React and Redux. Sevastopol : O'Reilly Media, 2017. 335 p.
20. Shyam S. Angular: Up and Running. Sevastopol : O'Reilly Media, 2018. 300 p.
21. Hanchett E., Listwon B. Vue.js in Action. Shelter Island : Manning, 2018. 304 p.

References:

1. Amazon Plants: platforma dlia prodazhu kimnatnykh roslyn (Amazon Plants: a platform for selling indoor plants) [Online]. Available: <https://www.amazon.com/s?k=house+plants+on+amazon>. Accessed on: September 9, 2023.
2. The Sill: mahazyn kimnatnykh ta sadovykh roslyn (The Sill: indoor and garden plant shop) [Online]. Available: <https://www.thesill.com/>. Accessed on: September 9, 2023.
3. Bloomscape: elektronnyi supermarket kimnatnykh roslyn (Bloomscape: electronic supermarket of indoor plants) [Online]. Available: <https://bloomscape.com/>. Accessed on: September 9, 2023.
4. Gardens For You: yevropeyskiy portal z sadivnytstva (Gardens For You: European gardening portal) [Online]. Available: <https://www.gardens4you.eu/>. Accessed on: September 9, 2023.
5. PLNTS: onlain mahazyn ta informatsiyniy portal (PLNTS: online store and information portal) [Online]. Available: <https://plnts.com/>. Accessed on: September 9, 2023.
6. iFlowers: ukrainskiy internet mahazyn kimnatnykh roslyn (iFlowers: Ukrainian online shop for indoor plants) [Online]. Available: <https://iflowers.com.ua/>. Accessed on: March 29, 2023.
7. Floren: internet portal z sadivnytstva (Floren: online gardening portal) [Online]. Available: <https://floren.com.ua/ua/>. Accessed on: March 29, 2023.
8. PERSHA KVITKOVA KOMPANIYA: kompaniya z prodazhu ta suprovodu kimnatnykh roslyn (FIRST FLOWER COMPANY: a company for the sale and support of indoor plants) [Online]. Available: <https://plants.pervaya.com.ua/ua/>. Accessed on: March 29, 2023.
9. What is Shopify and How Does It Work [Online]. Available: <https://www.forbes.com/advisor/in/business/software/what-is-shopify>. Accessed on: September 11, 2023.
10. D. Stokes, *MySQL and JSON: A Practical Programming Guide*. New York, USA: McGraw Hill Publ., 2018.
11. R. Stones, and M. Neil, *Databases with PostgesSQL*. New York, USA: Apress Publ., 2002.
12. M. Owens, and G. Allen, *The Definitive Guide to SQLite*. New York, USA: Apress Publ., 2010.
13. S. Bradshaw, E. Brazil, and K. Chodorow, *MongoDB: The Definitive Guide*. Sevastopol, USA: O'Reilly Media Publ., 2019.
14. Introduction to Developing Asynchronous Web Services [Online]. Available: <https://docs.oracle.com/middleware/1221/owsm/WSCPT/jrf-async-ws.htm#WSCPT204>. Accessed on: September 16, 2023.
15. C. Pecoraro, *Mastering Laravel*. Birmingham, UK: Packt Publ., 2015.
16. F. Zaninotto, *The definitive Guide to Symfony*. New York, USA: Apress Publ., 2018.
17. The Definitive Guide to Yii 2.0 [Online]. Available: <https://www.yiiframework.com/doc/guide/2.0/en>. Accessed on: March 29, 2023.
18. Stack Overflow Developer Survey 2022 [Online]. Available: <https://survey.stackoverflow.co/2022>. Accessed on: March 29, 2023.
19. Banks A. Learning React: Functional Web Development With React and Redux. Sevastopol, USA: O'Reilly Media Publ., 2017. 335 p.
20. S. Shyam, *Angular: Up and Running*. Sevastopol, USA: O'Reilly Media Publ., 2018.
21. E. Hanchett, and B. Listwon, *Vue.js in Action*. Shelter Island, USA: Manning Publ., 2018.

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

Стаття надійшла 18.10.2023
Стаття прийнята 23.11.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДОЛОГІЙ ПОШУКУ ТЕКСТОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МОЖЛИВОСТЕЙ ПЛАТФОРМИ ELASTIC

Ця робота присвячена аналізу та оптимізації процесу пошуку додатків з використанням програмного засобу ElasticSearch. Предметом дослідження є платформа Elastic у контексті пошуку та аналізу даних. Об'єктом – оптимізація процесу пошуку та аналізу даних на базі цієї платформи. Метою даної роботи є дослідження можливостей та особливостей використання ElasticSearch для створення ефективного пошукового механізму додатків у великих аплікаційних магазинах. Визначено основні завдання для досягнення мети роботи. Проведений аналіз наукової літератури щодо методів та технологій пошуку та аналізу даних на основі платформи Elastic. Розглянуті основні складові та можливості платформи Elastic, включаючи ElasticSearch, Kibana та LogStash. Здійснений порівняльний аналіз ефективності пошуку на платформі Elastic та альтернативних рішень. Розроблений та реалізований тестовий сценарій для оцінки швидкодії та точності пошуку за допомогою платформи. Реалізований сервіс, який забезпечує функціонал пошуку для додатків. Розглянуті можливості інтеграції розробленого сервісу з існуючими додатками та системами для оптимального використання його функціоналу. Проведено тестування розробленого сервісу з використанням різних наборів даних для підтвердження його ефективності та точності. Визначені можливості масштабування та оптимізації розробленого сервісу для оптимальної продуктивності при використанні великих обсягів даних. Порівняно результати використання розробленого сервісу з аналогічними рішеннями та надані висновки щодо його конкурентоспроможності. Розроблена інструкція з використання розробленого сервісу та надані рекомендації щодо його ефективного впровадження в практичних сценаріях. Проведений аналіз отриманих результатів та зроблені висновки щодо ефективності та практичної цінності розробленого сервісу для вирішення конкретних завдань обробки та аналізу великих обсягів даних за допомогою платформи Elastic. Проведено емпіричне дослідження, використовуючи реальні набори даних, для оцінки ефективності пошуку на платформі. Вивчені можливості оптимізації та підвищення продуктивності пошуку на платформі шляхом конфігурації та налаштування. Зроблені висновки щодо ефективності пошуку за допомогою платформи Elastic та надані рекомендації щодо її використання в конкретних сценаріях.

Ключові слова: пошук, дані, платформа, бази даних, сервіс, додаток, C#, Elastic, програмне забезпечення, Logstash, Index.

A.V. Krasnoperov, O.V. Kryvenko, T.O. Levytska. Research of text information search methods using the capabilities of the Elastic platform. This work is devoted to the analysis and optimization of the application search process using the ElasticSearch software tool. The subject of research is the Elastic platform in the context of data retrieval and analysis. The object is to optimize the search and data analysis process based on this platform. The purpose of this work is to study the possibilities and features of using ElasticSearch to create an effective application search mechanism in large application stores. The main tasks for achieving the goal of the work are defined. Conducted analysis of scientific literature on methods and technologies of data search and analysis based on the Elastic

¹ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

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

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3359-1313, levitskaya_t_a@pstu.edu

platform. Covers the core components and capabilities of the Elastic platform, including Elasticsearch, Kibana, and Logstash. A comparative analysis of search performance on the Elastic platform and alternative solutions was performed. A test scenario was developed and implemented to evaluate the speed and accuracy of the search using the platform. Implemented service that provides search functionality for applications. The possibilities of integrating the developed service with existing applications and systems for optimal use of its functionality are considered. The developed service was tested using various data sets to confirm its effectiveness and accuracy. The possibilities of scaling and optimization of the developed service for optimal performance when using large volumes of data are determined. The results of using the developed service are compared with similar solutions and conclusions are given regarding its competitiveness. Instructions for using the developed service have been developed and recommendations for its effective implementation in practical scenarios have been provided. The analysis of the obtained results was carried out and conclusions were drawn regarding the effectiveness and practical value of the developed service for solving specific tasks of processing and analyzing large volumes of data using the Elastic platform. Empirical research was conducted using real data sets to evaluate the performance of search on the platform. Explored opportunities to optimize and improve search performance on the platform through configuration and customization. Conclusions are made regarding the effectiveness of search using the Elastic platform and recommendations are provided for its use in specific scenarios.

Key words: search, data, platform, databases, service, application, C#, Elastic, software, Logstash, Index.

Постановка проблеми. Сучасна інформаційна епоха супроводжується неабияким зростанням обсягів даних та інформації, доступ до яких стає все більш необхідним і складним завдяки швидкому розвитку цифрових технологій та інтернету.

Однією з найважливіших задач у сфері обробки та аналізу цих даних є оптимізація пошуку та навігації користувачів у великих обсягах інформації. І саме тут істотну роль відіграє пошуковий двигун, який дозволяє ефективно та швидко знаходити релевантну інформацію серед тисяч і мільйонів записів.

Одним із сучасних та потужних інструментів для реалізації пошуку є система Elasticsearch, яка є частиною платформи Elastic. Elasticsearch використовується в багатьох сферах, включаючи пошук на веб-сайтах, аналіз логів, обробку даних та інші завдання. Ця система здатна працювати з великими обсягами даних та забезпечує високу швидкість пошуку завдяки використанню розподіленої архітектури та індексації даних.

Ця робота присвячена вивченню та оптимізації процесу пошуку додатків з використанням програмного засобу Elasticsearch. Розглядаємо різні аспекти оптимізації, включаючи налаштування індексів, оптимізацію запитів та використання аналітики для покращення результатів пошуку.

Актуальність даного дослідження визначила проблему відсутності релевантного та швидкого функціоналу пошуку в більшості корпоративних програмних продуктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційні реляційні бази даних (наприклад, MySQL, PostgreSQL, Oracle, MS SQL Server) зазвичай не спеціалізуються на повнотекстовому пошуку. Основна їхня задача – забезпечення збереження і ефективного витягування даних відповідно до схеми таблиць.

Хоча деякі традиційні СУБД (наприклад, PostgreSQL) надають базові можливості повнотекстового пошуку через спеціалізовані розширення або модулі, це все ж не є основною сферою їхньої ефективності. У таких випадках рекомендується використовувати спеціалізовані повнотекстові пошукові двигуни, такі як Elasticsearch, Solr, або спеціалізовані бази даних, як ClickHouse, для аналізу та обробки великих обсягів даних [1].

Повнотекстовий пошук SQL Server є дуже потужним. Принаймні у нього є низка корисних можливостей: пошук префіксів, слів поруч одне з одним, різні часи дієслів і навіть пошук за тезаурусом. Однак, більшість розробників використовує його не так ефективно: багато магазинів використовували його для зіставлення певних рядків, думаючи, що це буде швидше, ніж LIKE

«%searchword%». Це працює в невеликому масштабі, але в міру того, як ваші дані зростають, ви зіткнетеся з проблемою продуктивності плану запитів [2].

Розглянемо, які можуть бути альтернативи традиційним пошуковим інструментам на базі традиційних баз даних [3-5]. На основі даних ранжирування популярних движків зберігання та пошуку даних для розгляду програмних рішень проаналізуємо такі продукти повнотекстового пошуку: Solr, Elastic Stack, Sphinx, ClickHouse (Табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння розповсюджених на ринку засобів для пошуку даних поза традиційних реляційних БД

	Solr	Elastic	Sphinx	ClickHouse
Швидкість індексації	2,8 Мб/с	3,9 Мб/с	4,5 Мб/с	Залежить від сценарію
Швидкість пошуку	24 мс	10 мс	7 мс	100K+ RPS/с
Розмір індексу	20%	20%	30%	30%
Підтримка функцій	Full Text Search Autocomplete Faceted Multifield Synonyms Fuzzy Highlighting Geospatial Spellchecking	Full Text Search Autocomplete Faceted Multifield Synonyms Geospatial	Full Text Search Autocomplete Faceted Multifield Synonyms (word-forms) Highlighting (snippets) Geospatial Spellchecking (qsuggest)	Full Text Search Autocomplete Geospatial SQL
Індексація в реальному часі	Так	Так	Так	Ні
Підтримка ОС	Any OS with JVM	Any OS with JVM	BSD, Linux, OsX, Solaris, Windows	Linux
Схема даних	Не обов'язкова	Не обов'язково	Так	Рекомендовано
Візуалізація	Немає	Так	Немає	Немає
Підтримка API	Java API, RESTful API	Java API, RESTful API	Patented protocol	OJAI API
Підтримка скриптів та розширень	Java Plugins	Yes	No	Python Plugins
Мова розробки	Java	Java	C++	C++

Мета дослідження. Метою роботи є визначення та оцінка ефективності пошуку за допомогою платформи Elastic у контексті пошуку релевантної текстової інформації на великих обсягах структурованої та неструктурованої інформації. Для її досягнення були поставлені наступні завдання:

- провести аналіз наукової літератури щодо методів та технологій пошуку та аналізу даних на основі платформи Elastic;
- розглянути основні складові та можливості платформи Elastic, включаючи ElasticSearch, Kibana та LogStash;
- здійснити порівняльний аналіз ефективності пошуку на платформі Elastic та альтернативних рішень;
- розробити та реалізувати тестовий сценарій для оцінки швидкодії та точності пошуку за допомогою платформи Elastic;
- реалізувати сервіс, який забезпечує функціонал пошуку для додатків;

- розглянути можливості інтеграції розробленого сервісу з існуючими додатками та системами для оптимального використання його функціоналу;
- провести тестування розробленого сервісу з використанням різних наборів даних для підтвердження його ефективності та точності;
- визначити можливості масштабування та оптимізації розробленого сервісу для оптимальної продуктивності при використанні великих обсягів даних;
- порівняти результати використання розробленого сервісу з аналогічними рішеннями та надати висновки щодо його конкурентоспроможності;
- розробити інструкцію з використання розробленого сервісу та надати рекомендації щодо його ефективного впровадження в практичних сценаріях;
- провести аналіз отриманих результатів та зробити висновки щодо ефективності та практичної цінності розробленого сервісу для вирішення конкретних завдань обробки та аналізу великих обсягів даних за допомогою платформи Elastic;
- провести емпіричне дослідження, використовуючи реальні набори даних, для оцінки ефективності пошуку на платформі Elastic;
- вивчити можливості оптимізації та підвищення продуктивності пошуку на платформі Elastic шляхом конфігурації та налаштування;
- зробити висновки щодо ефективності пошуку за допомогою платформи Elastic та надати рекомендації щодо її використання в конкретних сценаріях.

Виклад основного матеріалу. Для розробки сервісу, який буде виконувати роль middleware для бізнес додатків, обрана мова програмування C# (C Sharp), яка є хорошим вибором для розробки клієнта для платформи Elastic.

Звичайно, C# не є єдиною мовою, яка може використовуватися для розробки клієнта для платформи Elastic. Інші популярні варіанти включають Java, Python, і Go. Однак C# є хорошим вибором для розробників, які шукають потужну і гнучку мову, яка підтримує широкий спектр завдань.

В роботі орієнтували наше рішення на базу даних MS SQL. MS SQL є однією з найпопулярніших баз даних у світі, і вона використовується в мільйонах підприємств по всьому світу (займає третє місце у рейтингу баз даних (БД) по версії TOPDB [6]). Це означає, що MS SQL має довгу історію стабільної роботи і має репутацію надійної технології.

Зауважимо, що Elastic Logstash підтримує широкий спектр баз даних, включаючи:

- Relational databases: MySQL, PostgreSQL, Oracle, Microsoft SQL Server, IBM DB2
- NoSQL databases: MongoDB, Elasticsearch, Cassandra, HBase, Neo4j
- Cloud databases: Amazon Redshift, Google Cloud BigQuery, Microsoft Azure SQL Database

Logstash може імпортувати дані з цих баз даних і експортувати дані в них. Ось деякі приклади того, як Logstash можна використовувати з базами даних: а) Імпорт даних: Logstash можна використовувати для імпорту даних з баз даних в інші системи, такі як Elasticsearch або Hadoop, б) експорт даних: Logstash можна використовувати для експорту даних з баз даних в інші системи, такі як електронні таблиці або системи відстеження помилок, в) аналіз даних: Logstash можна використовувати для аналізу даних з баз даних для виявлення тенденцій і аномалій.

Моделювання об'єкту дослідження:

1) Діаграма послідовності

Діаграма послідовності допомагає візуалізувати взаємодію між різними компонентами системи або процесу. Опишемо наші процеси (Рис. 1):

Logstash сервіс: Logstash сервіс загрузає дані в індекс згідно заданого розкладу з БД.

Клієнтський додаток: Клієнтський додаток надсилає запити до сервісу пошуку.

Пошуковий запит: Клієнтський додаток формує запит на пошук конкретних даних та передає його за допомогою нашого кастомного сервісу пошуку на порт Elasticsearch ноди.

ElasticSearch сервіс: ElasticSearch обробляє запити та виконує пошук даних в індексах.

Обробка запиту ElasticSearch: ElasticSearch приймає пошуковий запит та аналізує його.

Пошук у індексах: ElasticSearch виконує пошук даних в Індекссах, що включають в себе потрібну інформацію.

Результати пошуку: ElasticSearch повертає результати пошуку клієнтському додатку.

Відображення результатів: Бізнес додаток відображає результати пошуку користувачеві.

Залежно від потреби, можуть відбуватися додаткові ітерації пошуку або інші дії.

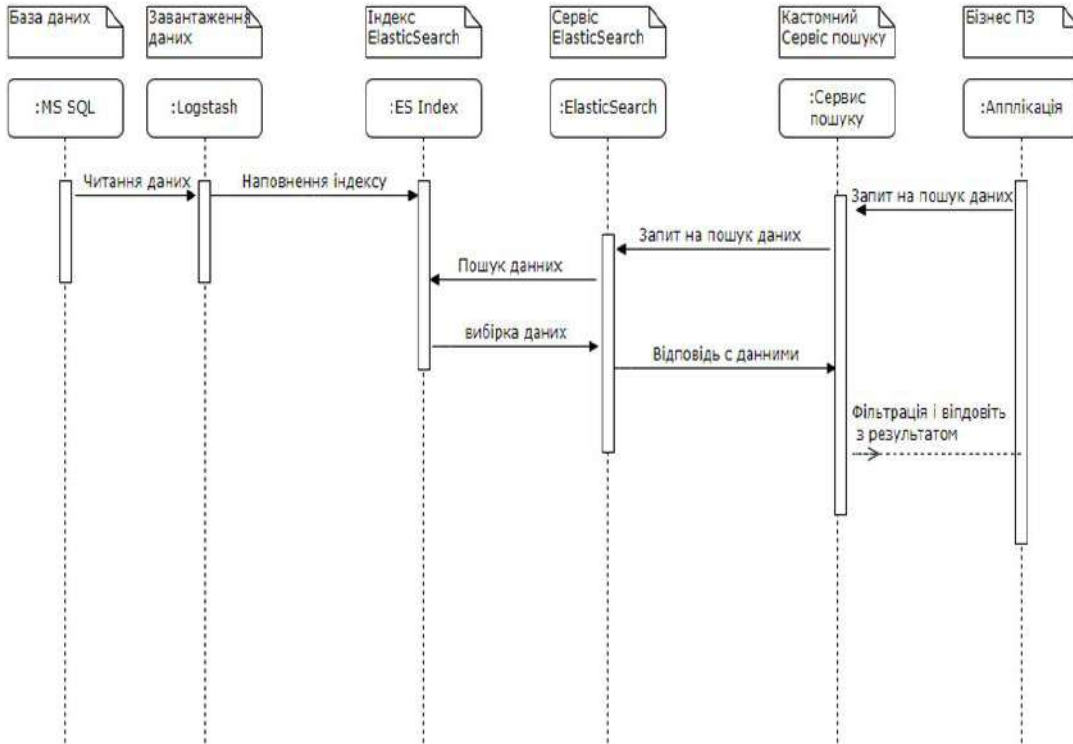


Рис. 1 – Діаграма послідовності запитів пошуку

2) Діаграма варіантів використання
 Варіанти використання (Use Case Diagram) для сервісу пошуку в ElasticSearch індексі (Рис. 2).

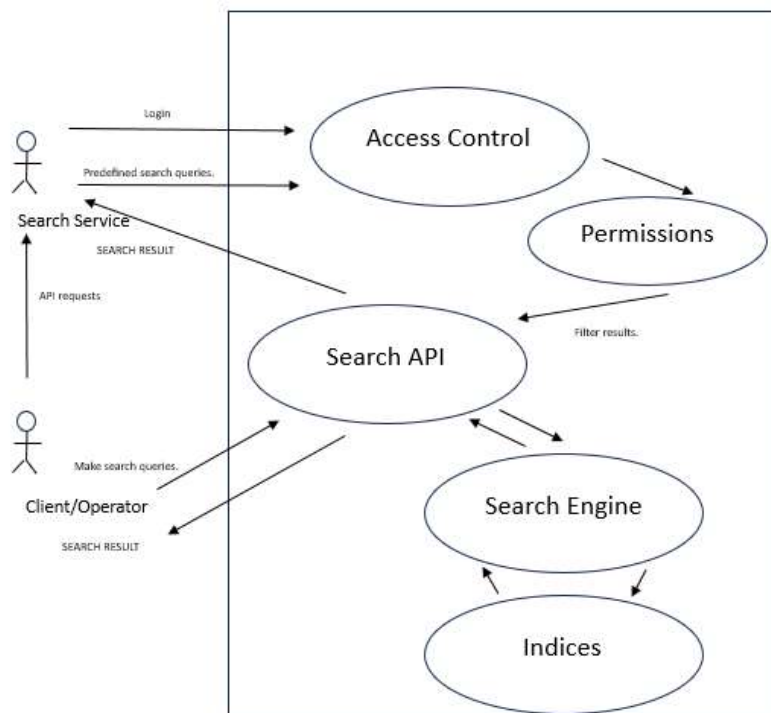


Рис. 2 – Діаграма варіантів використання

3) Інфологічна модель Індексів пошуку

Основні складові інфологічної моделі Elasticsearch включають:

Ноди: це екземпляри серверу ElasticSearch. Потрібен найменш один екземпляр для роботи індексу та не менш трьох нод для комерційної експлуатації.

Шарди: базовий блок побудови та розподілу даних. Це фундаментальна одиниця, на яку розбивається індекс для забезпечення паралельного пошуку та розподіленого зберігання даних.

Документи: Документ – це основний об’єкт, який містить дані. У Elasticsearch документи представлені у форматі JSON. Кожен документ має унікальний ідентифікатор.

Типи: Раніше у Elasticsearch існували типи, але починаючи з версії 7, вони були прибрані. Тепер кожен індекс може містити тільки один тип документу.

Індекси: Індекс – це колекція документів, яка має однакову структуру. Вони використовуються для організації даних та прискорення пошуку.

Поля: Кожен документ має поля, які містять конкретні дані. Поля можуть мати різний тип, такий як текстовий, числовий, дата, географічний тощо.

Аналізатори: Elasticsearch використовує аналізатори для обробки тексту перед зберіганням його у зворотному індексі. Аналізатори включають в себе токенізатори та фільтри, які перетворюють текст у набір токенів для полегшення пошуку.

Мапінг: Мапінг визначає, як поля в документах індексу інтерпретуються та індексуються. Мапінги можуть бути автоматично визначені Elasticsearch або встановлені користувачем.

Аналітика: Elasticsearch надає можливість використовувати агрегації для аналізу та обробки даних у великих масштабах.

Загалом, ці компоненти дозволяють Elasticsearch надати потужні можливості повнотекстового пошуку, агрегацій та аналітики, що робить його популярним інструментом для роботи з великими обсягами даних.

Створимо Індекс для пошуку постів з текстовою інформацією і приведемо інфологічну модель цього індексу (Рис. 3).

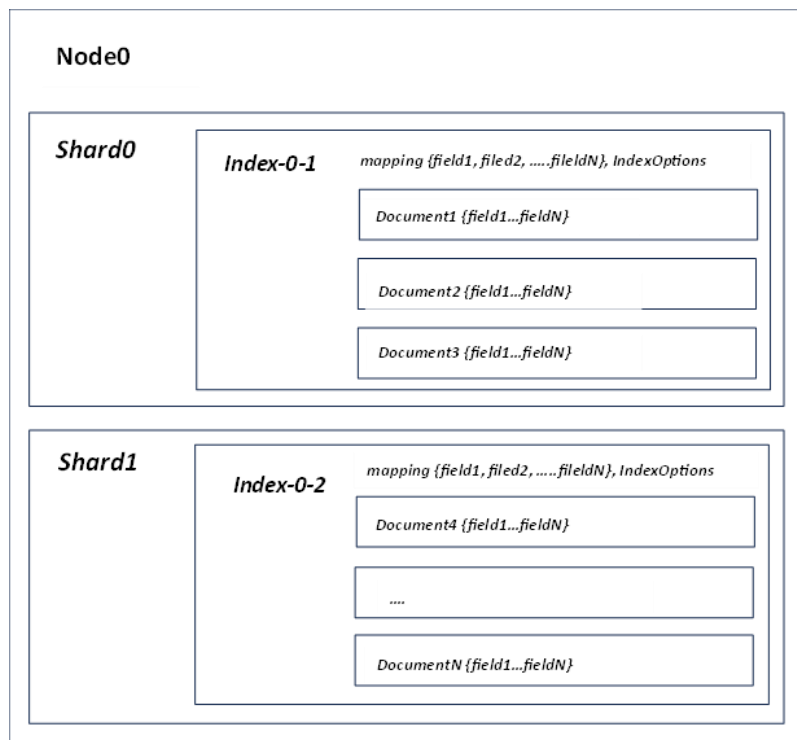


Рис. 3 – Інфологічна модель кластеру ElasticSearch

Експериментальні дослідження:

- 1) Програмне забезпечення експерименту

Стек Elastic платформи

Для розгортання рішення з пошуку даних за допомогою платформи Elastic необхідно розгорнути кластер Elasticsearch, створити індекс та налагодити імпорт даних, які використовували.

Використовували одну з останніх свіжих версій стека Elastic - 8.x. Кластер і стек інструментів розгортали на трьох додатках Elastic стеку:

1) Elasticsearch 8.10.2 – це наш головний двигун стеку і провайдер нашого пошукового сервісу.

2) Logstash 8.10.2 – за допомогою цього інструменту здійснювали імпорт даних із БД і створення індексу.

3) Kibana 8.10.2 – це інструмент візуалізації та інтерфейс користувача за допомогою якого, здійснюється управління адміністративними функціями стека, управління індексами, а також є можливість відлажувати запити до індексів напряму в розділі Dev tools, а також здійснювати інші налаштування індексу та кластеру.

Слід зауважити, що версії додатків Elastic стека повинні бути однакові і бажано до міноної версії. Деякі сервіси (наприклад, Kibana) можуть навіть не стартувати, якщо в налаштуваннях буде вказано Elasticsearch хост, на якому буде версія движка нижче міноної версії Kibana. Також додатково відмітимо, що міноні версії оновлюються дуже часто – майже кожен тиждень, тому важливо слідкувати, щоб компоненти були однакових версій, але обов'язково намагатися завантажити саме останню версію стеку.

Операційні системи

Кластер може бути розгорнутий на Windows та Linux операційних системах. В рамках нашого дослідження використана операційна система Windows 10 Pro. Для нашого експерименту цього буде достатньо. Але в комерційній експлуатації рекомендовано використовувати серверні варіанти ОС Windows, такі як MS Windows 2016/2019 Server та більш свіжі версії. Це також стосується до Linux систем – для розробки ПОС (Proof of Concept) дослідження можна використати Linux Ubuntu Desktop версію, але для комерційного використання краще інстальувати рішення на Linux Server редакції вашого Linux дистрибутиву.

Скриптові оболонки

Для створення індексів та імплементації деяких адміністративних операцій з індексами, використовували скрипти PowerShell (рекомендовано версії не нижче 7.x). Зауважимо, що Elastic є кросплатформним рішенням, тобто можемо використовувати за необхідністю Bash, Shell та інші оболонки для написання скриптів, якщо в нас є такі вимоги. Але в цьому дослідженні зупинились на PowerShell.

Бази даних

Дані, які використовуємо для дослідження, завантажили до MS SQL. Використовували редакцію MS SQL 2016 Enterprise Edition x64. Це обумовлено великим об'ємом даних, які знадобляться для дослідження.

MS Visual Studio

Для розробки сервісу пошуку в якості IDE використаний MS Visual Studio 2023 редакції Community Edition x64, і також встановлений .NET Framework, що потрібен для розробки сервісів ASP.NET на мові C#.

Це базовий набір програмного забезпечення, що потрібен нам для дослідження і розробки сервісу пошуку даних. Можемо використати деякі утиліти та додатки (наприклад, архіватори, файлові менеджери), але вони лише полегшують процес дослідження і розробки, та не є базово необхідними інструментами.

2) Налаштування кластеру Elastic і імпорт даних.

Створення кластеру.

Для дослідження пошуку за допомогою Elastic платформи створили одно-нодовий кластер і налаштували імпорт даних з бази даних MS SQL за допомогою Logstash.

Встановлення програмного забезпечення є доволі простим – треба лише завантажити компоненти платформи (ElasticSearch, Logstash, Kibana) і разархівувати їх в обраній директорії. В нашому випадку \Elastic. Оскільки розгортаємо кластер на операційній системі MS Windows, треба перетворити виконуваний файл на службу Windows. Наведемо мінімально необхідний файл конфігурації ElasticSearch.

```
# ===== Elasticsearch Configuration =====
# ----- Cluster -----
#cluster.name: es-app812
#
# ----- Node -----
#
node.name: es-node-1
#node.attr.rack: r1
#
# ----- Paths -----
#path.data: /path/to/data
#path.logs: /path/to/logs
#
# ----- Memory -----
#bootstrap.memory_lock: true
#
# ----- Network -----
#
network.host: 192.168.1.102
#
http.port: 9200
#
# ----- Discovery -----
discovery.seed_hosts: ["192.168.1.104", "127.0.0.1", "[::1]"]
#
cluster.initial_master_nodes: ["es-node-1"]
#
# ----- Various -----
#
#action.destructive_requires_name: false
xpack.security.enabled: false
```

Висновки

Провівши дослідження пошуку даних за допомогою платформи Elastic, дійшли низки висновків. В роботі провели налаштування кластеру Elasticsearch, створили індекс із бази даних MS SQL з більш ніж 50 мільйонів документів, провели заміри продуктивності різних запитів на пошук і агрегування даних, порівняли їх швидкість. Також створили РОС (proof of concept) сервіс пошуку даних, який може виступати як middleware сервіс для надання інтерфейсу або шлюзу для інтеграції пошуку в бізнес додатках і може бути масштабований окремо від головного додатку.

Зазначимо ті покращення та можливості, які здобули, залучивши платформу Elastic до функцій пошуку даних в наших додатках.

По-перше, слід зауважити наявність дуже великої швидкості пошуку даних в структурованих документах в індексах, в порівнянні з традиційними реляційними базами даних. Отримано, швидкість пошуку може сягнути разів, або навіть порядків в залежності від складності запитів і типів даних.

По-друге, необхідно відмітити велику кількість різноманітних і гнучких запитів, які направлені як на прямий пошук і вибірку даних, так і на агрегацію даних, аналітику та навіть нечіткі запити.

Проаналізували можливості стандартних аналізаторів Elasticsearch і побачили їх потужність, коли залучаємо до пошуку запити з нечіткими даними пошуку (з помилками, синонімами або з іншим порядком слів).

Також по-третє, відмітимо, що платформа має потужний API і це полегшує інтеграційні процеси, бо все може бути реалізовано на звичайних HTTP запитах, які реалізовані майже у кожній мові програмування, скриптових мовах та маємо окремі команди та інструменти для операційних систем та командних оболонок. Навіть можна використати звичайний браузер, та робити запит до платформи Elastic. Саме це дуже полегшує розробку сервісів, що можуть взаємодіяти з платформою.

Ще одна важлива річ, з якою стикнулися автори і з якою стикнеться кожний розробник, який буде оперувати з великими обсягами даних в вибірках на сотні тисяч і мільйони документів, це те, що платформа Elastic і її система пошуку Elasticsearch побудовані за замовченням дуже надійно і має в першу чергу вимогу не порушити роботу кластера та тримати час відклику

максимально коротким, а це в свою чергу не дозволить вам запросити, наприклад, один мільйон документів у вашому запиті, що може на достатньо складних запитах вплинути на роботу всього кластера. Отже, вам знадобиться налаштовувати ваш кластер під великі запити, використовувати пагінацію, встановлювати розмір відповіді та налаштовувати тайм-аути.

Іншими словами, для великих обсягів вам доведеться не тільки створювати ваші запити, але і оптимізувати їх і налаштовувати ваш кластер під ваші потреби пошуку.

Отже, слід зазначити і особливості цього рішення – як бачимо, що ціна швидкості і додаткового функціоналу є підвищення вимог до користування цим інструментом, високий рівень кваліфікації фахівців, що адмініструють кластер, розробників і навіть системних інженерів, що налаштовують оптимальну інфраструктуру під ці задачі.

Також маємо відмітити, що при потребі швидкого пошуку повинні нести витрати на дисковий простір для хостингу індексів. Що подвоює, а інколи і потроєє потреби в дискових сховищах, тому що в більшості випадків ви не зможете відмовитись від реляційних БД в ваших датках і повністю перейти на документи індексу. Вони мають різні призначення і різні задачі.

І на останнє, потрібно привести кроки, що можна зробити для покращення нашого сервісу. Треба розробити можливість зберігання конфігурації в зовнішньому сервісі конфігурації. Також слід додати можливість перевірок і переключення на пошук в базі даних при відсутності підключення до індексу. В експлуатації можна перевести сервіс в контейнер і використовувати його в системах оркестрації контейнерів, таких як Kubernetes, OpenShift та інших.

Перелік використаних джерел:

1. Обзор решений для полнотекстового поиска в веб-проектах: Sphinx, Apache Lucene, Xapian. URL: <https://dou.ua/lenta/articles/full-text-search-engines-overview-sphinx-apache-lucene-xapian/> (дата звернення 28.07.2023).
2. Why Full Text's CONTAINS Queries Are So Slow. URL: <https://www.brentozar.com/archive/2020/11/why-full-texts-contains-queries-are-so-slow> (дата звернення 28.07.2023).
3. Apache Solr. URL: <https://solr.apache.org> (дата звернення 28.07.2023).
4. Elastic Stack. URL: <https://www.elastic.co/elastic-stack> (дата звернення 13.08.2023).
5. Croft W.B., Lafferty J. Language modeling for information retrieval. Springer Science & Business Media. 2003. 246 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-0171-6>.
6. Different ways to model your data in Elasticsearch. URL: <https://medium.com/@zhaoyi0113/different-ways-to-model-your-data-in-elasticsearch-bbc719f3d4fc> (дата звернення 10.08.2023).

References:

1. Obzor reshenyi dlia polnotekstovoho poyska v veb-proektakh: Sphinx, Apache Lucene, Xapian (Review of solutions for full-text search in web projects: Sphinx, Apache Lucene, Xapian) [Online]. Available: <https://dou.ua/lenta/articles/full-text-search-engines-overview-sphinx-apache-lucene-xapian/>. Accessed on: July 28, 2023.
2. Why Full Text's CONTAINS Queries Are So Slow [Online]. Available: <https://www.brentozar.com/archive/2020/11/why-full-texts-contains-queries-are-so-slow>. Accessed on: July 28, 2023.
3. Apache Solr [Online]. Available: <https://solr.apache.org>. Accessed on: July 28, 2023.
4. Elastic Stack [Online]. Available: <https://www.elastic.co/elastic-stack>. Accessed on: August 13, 2023.
5. W.B. Croft, and J. Lafferty, *Language modeling for information retrieval*. Springer Science & Business Media Publ., 2003. doi: **10.1007/978-94-017-0171-6**.
6. Different ways to model your data in Elasticsearch [Online]. Available: <https://medium.com/@zhaoyi0113/different-ways-to-model-your-data-in-elasticsearch-bbc719f3d4fc>. Accessed on: August 10, 2023.

Рецензент: О.Є. П'ятикоп
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 10.10.2023
Стаття прийнята 07.11.2023

РОЗРОБКА ВЕБДОДАТКУ ДЛЯ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ

У даній статті проаналізований процес проектування та побудови вебдодатку, який працює за так званою моделлю маркетплейсу, тобто це суб'єкт електронної комерції, який зазвичай не продає товари самостійно, але надає майданчик для приватних підприємств, компанії та приватних осіб для систематичного продажу товарів чи послуг. Ці програмні комплекси відрізняються нестандартними для електронної комерції групами користувачів (не тільки покупці в якості клієнтів, але і покупці, і постачальники послуг) та специфічною манерою взаємодії між користувачами, які виступають у різних ролях, таким чином ці проекти реалізують бізнес-модель *Customer-to-Customer*, вирішуючи задачі посередництва, реклами, а також безпеки та арбітражу конфліктів. Програмних рішень такого типу на ринку вдосталь, але майже всі вони мають надлишковий функціонал, складну систему модерації, а найбільші ще й досить активне і конкурентне середовище. Програмний продукт такого типу має особливу архітектуру, тому що йому доводиться вирішувати різноманітні задачі, частина яких виходить за рамки простих угод купівлі-продажу та транзакції грошей від покупця до продавця. Насамперед, платформа повинна забезпечити взаємодію, безпеку даних, переводів, захист від фішингу, розв'язання конфліктів. Функціонал таких проектів екстенсивно зростає, що, з одного боку, дозволяє залучити більше користувачів із різними потребами, з іншого ж – суттєво ускладнює взаємодію, навіть може робити процес продажів та купівлі неефективним і непрозорим. Мінімалістичний підхід до проектування дозволив зупинитись на головному функціоналі і дослідити на цьому прикладі основні риси даного типу програмного забезпечення. В якості програмного стеку було обрано PHP+Node.JS+MySQL у серверній частині (бекенді) та JavaScript у реалізації фреймворку Vue у якості браузерного. На бекенді для пришвидшення розробки використано фреймворк Laravel, який дозволяє вирішити більшість рутинних задач і створити якісний та стабільний проект з використанням підходу REST API.

Ключові слова: маркетплейс, онлайн-маркет, електронна комерція, архітектура ПЗ, PHP, MySQL, Laravel, Node.js, Vue.

O.A. Tuzenko, S.I. Volodin. E-commerce application development. In the current article a process of designing and building a web-application was researched. The application works as a marketplace, it is a subject of e-commerce which usually does not sell goods or provide services itself, it provides a platform for entrepreneurs, companies and individuals to systematically sell goods, promote and provide services. This software packages use unusual for e-commerce user groups (here not only customers are users, but also merchants and service providers) and a very specific interaction model, which have a different system role, thereby these projects embody business model *Customer-to-Customer* by solving intermediation and advertisement tasks as well as different tasks related to security and conflicts arbitration. There are a lot of development solutions like this on the market, but most of them have excess feature set, and the biggest ones in addition provide an extremely competitive environment. The marketplace applications have specific architecture because they are to solve various problems and tasks, which are partially out of simple buy-sell deals and funds transactions from the buyer to the merchant. First of all, this platform must provide an environment for interaction, data security, secure transactions, phishing

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-4920-9417, tuzenkoaa@gmail.com

² ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, volodinsi57@gmail.com

protection, conflict solving framework. Number of functions in the projects of this kind grows extensively, which from one side allows to involve more users with different needs, from other hand it significantly complexes the interaction, and could even make the selling and buying non-effective and non-obvious. A minimalistic approach to the design allowed us to focus on main program features and investigate on this example the main features and principles of current software type. As a main programming stack, a set including PHP+Node.js+MySQL on server side was selected, as a frontend Javascript-based framework Vue was used. On the backend for the development improvement a PHP-framework Laravel was used, which allows to solve most of routine tasks and rather easily create a quality and stable project using REST API approach.

Keywords: marketplace, online-market, e-commerce, software architecture, PHP, MySQL, Laravel, Node.js, Vue.

Постановка проблеми. Електронна комерція росте швидкими темпами кожного року, зростання продажів у різних сферах торгівлі значуще навіть у ті місяці і роки, у яких загалом були кризи в економіці. Широке розповсюдження продаж товарів через Інтернет почалось на початку 2010 року, але справжнім стрибком у рості комерції став 2020 рік, коли торгівля була паралізована через карантини у наслідок пандемії коронавірусу. Розвиток онлайн-торгівлі пов'язаний з тим, що віртуальні магазини мають загалом менше географічних обмежень та дозволяють продавцям залучати нових клієнтів з усього світу. Крім того, інтернет-магазини є зручним та швидким способом здійснення покупок, що дозволяє покупцям зекономити свій час та зручно вибрати необхідний товар чи послугу. Деякі компанії не продають товари самі, але надають продавцям можливість користуватись програмними засобами, додатками і сайтами як платформами для продажу, вони зазвичай називаються онлайн-маркетом. Онлайн-маркет є специфічним типом сайту, тому що він надає одразу послуги декільком групам користувачів, які відіграють у роботі сайту різні ролі (продавці, покупці) і повинні мати різні рівні доступу і права. Розробка онлайн-маркету є складним та багатоетапним процесом, який потребує високих технічних знань та досвіду веброзробки, у зв'язку з чим дана тема є актуальною, а дослідження її є раціональним, не дивлячись на те, що існує досить велика кількість матеріалів на цю тему. Функціонування платформ з онлайн-продажів зазнає змін дуже швидко, крім того, цей процес можна розглядати з різних точок зору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для успішної розробки онлайн-маркету необхідно вивчити проблеми, пов'язані з проектуванням структури бази даних, розробкою функціоналу та інтерфейсу вебдодатку, тестуванням, налаштуванням, та обрати інструменти.

Онлайн-маркет, або маркетплейс – це віртуальна (онлайн) платформа, яка пов'язує між собою продавців і покупців, де вони зустрічаються, щоб обмінюватись, продавати, купувати та просувати товари, віртуальні активи або послуги. Тобто розробники маркетплейсу надають інструменти для маркетингу та власне продажів товарів і місце, де цей продаж можна здійснити. Але однієї платформи зазвичай замало. Коли на одній платформі зустрічаються люди, в яких є економічна зацікавленість у взаємодії, потрібно як мінімум врегульовувати конфлікти, надавати правила взаємодії і поміч у технічній частині. Тому задача побудови саме маркетплейсу виявляється однією з найскладніших і найбільш багатопланових задач у сфері електронної комерції.

Для ефективного функціонування маркетплейсу він повинен відповідати декільком основним вимогам:

1. Забезпечувати механізми залучення трафіку, а отже залучення нових покупців до платформи.
2. Мати зрозумілий та функціональний каталог продукції, який допоможе покупцям зорієнтуватись в асортименті.
3. Дотримуватись кодексу правил, які є чи не найважливішою частиною платформи поза суто технічними інструментами і який дозволяє регулювати відносини між продавцями і клієнтами.
4. Мати прозору платіжну систему і можливість здійснення безпечних покупок, що дозволить клієнту повернутись знов без небезпеки бути ошуканим [1].

Електронний маркетплейс, на якому зустрічаються представники бізнесу або приватні особи, які пропонують певні товари або послуги, і користувачі цих товарів і послуг, повинен забезпечувати наступні дії для процесу торгівлі:

1. Пропонувати товари і послуги у структурованій манері, крім того дозволяти знаходити і обирати з запропонованих варіантів товари і послуги.
2. Мати змогу домовлятися про ціну і умови угоди.
3. Укладати угоди про продаж певних товарів і послуг.
4. Оплачувати товари.
5. Організовувати доставку куплених товарів чи послуг за умовами угод [2].

Якщо будувати онлайн-маркет з нуля, треба розуміти, що даний проект буде розвиватись у надконкурентному середовищі, в якому працюють гіганти міжнародного ринку на кшталт Amazon [3], eBay [4], Aliexpress [5], Etsy [6], тому зайняти будь-яке місце у ряду маркетплейсів такого типу майже не є можливим. Але більш вузькоспеціалізовані маркетплейси часто з'являються у вигляді стартапів і мають успіх, або якнайменше займають свою особливу нішу. Дослідженню онлайн-маркетів як явища займаються як маркетологи, так і технічні спеціалісти і вчені з області інформаційних наук, тому що процеси, що відбуваються у середовищі онлайн-ринку, обумовлені як маркетинговими явищами, так і звісно технічними особливостями функціонування того чи іншого проекту [7]. Досліджуються усі аспекти діяльності таких проектів, багато уваги приділяється взаємозв'язку технічної реалізації, внутрішньої політики та результативності певного проекту [2].

Класифікація онлайн-маркетів теж одна із великих задач дослідження цього явища, кожен із типів має свої показники успішності і особливості роботи. Загалом вирізняють такі типи маркетплейсів за особливостями функціонування:

1. Вертикальні маркетплейси, призначені для тільки однієї категорії продуктів або послуг, наприклад, Airbnb, Bolt.
2. Горизонтальні маркетплейси, призначені для широкого спектру товарів, наприклад, Amazon.
3. Продуктові маркетплейси, які працюють тільки з фізичними товарами.
4. Віртуальні маркетплейси, які продають тільки віртуальні продукти (наприклад, маркетплейси для геймерів, біржі або онлайн-маркети віртуальних валют та крипто валют, маркетплейси, які продають творчі надбання).
5. Сервісні онлайн-маркети, які пропонують тільки послуги, сюди також частково відносяться біржі фрілансу.
6. Гібридні маркетплейси, які пропонують розміщення як продуктів, фізичних та віртуальних, так і послуг.
7. Нішеві маркетплейси, які займають тільки невелику частину ринку або покривають специфічну вузьку нішу.
8. «Чорні» маркетплейси, вкрай успішні майданчики, де продаються незаконні товари і укладаються угоди про незаконну діяльність [8].

Архітектура проектів може суттєво відрізнятись в залежності від направленості, розміру, віку проекту та інших особливостей проекту, але типові риси архітектури властиві більшості маркетплейсів та близьких до них проектів. Схема архітектури зображена на рис. 1.

Таким чином, типова архітектура такого типу проекту складається з чотирьох залежних один від одного шарів, в кожному із яких виконується частина логіки взаємодії між покупцем, продавцем та системою. Відкидаючи побічні дії на кшталт конфігурацій, налаштувань та логування подій та даних, зосередимось на шарі бізнес-логіки, щоб дослідити, що саме там відбувається та спроектувати свій продукт на основі цього функціоналу.

Мета дослідження – на прикладі мінімалістичного додатку дослідити створення платформи-маркетплейсу за допомогою фреймворка Laravel.

Виклад основного матеріалу. Електронна комерція має декілька переваг порівняно з традиційними методами купівлі та продажу товарів. По-перше, вона дозволяє покупцям здійснювати покупки з будь-якого місця та в будь-який час, що робить процес купівлі більш зручним та доступним. По-друге, вона дає можливість продавцям знизити витрати на зберігання та транспортування товарів, що забезпечує зниження вартості продукції для кінцевих покупців. По-третє,

вона забезпечує зручний та швидкий спосіб оплати товарів та послуг, що сприяє збільшенню обсягів продажів.

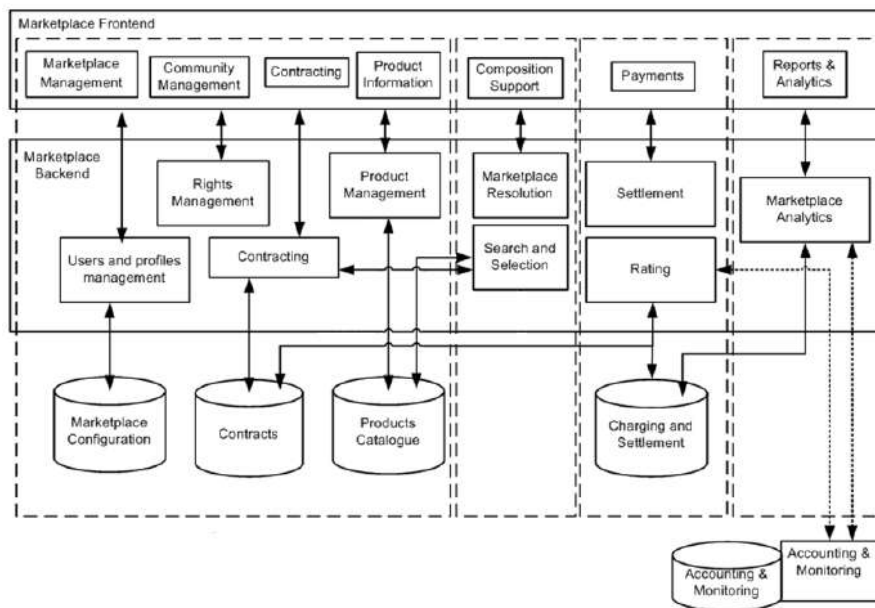


Рис. 1 – Типова архітектура онлайн-маркету

Одним з найбільших викликів електронної комерції є проблеми з безпекою. Зокрема, під час онлайн-платежів можуть виникати ризики викрадення особистих даних клієнтів та крадіжки грошей з їх рахунків. Щоб забезпечити безпеку, компанії повинні використовувати захист від шахрайства та фішингу, а також виконувати вимоги щодо захисту даних клієнтів, включаючи створення безпечних паролів та шифрування даних.

Особливо важливим для платформ-маркетплейсів є побудування відносин між продавцем та покупцем. Цей процес міститиме розробку правил та гарантій їх дотримання, можливість розв'язання суперечок, розглядання в розумні терміни скарг і ухвалення адекватних рішень по кожній з них, а також захист від нечесних дій за допомогою захисту платежів і гарантій виконання зобов'язань з обох сторін. Обидві групи користувачів (і покупці, і продавці) є клієнтами платформи, тому захист угод та розв'язання конфліктів є однією з важливих частин функціонування платформи. Також необхідно приділяти увагу до захисту даних, паролів, платіжних транзакцій, що є складовою безпекової стратегії додатку.

Вибір мови програмування для подібних проектів обумовлений багатьма факторами і є складним стратегічним рішенням. Зазвичай вибір мови заснований на можливостях команди, але при проектуванні слід враховувати не тільки поточну ситуацію на ринку та у бізнесі, а і перспективи розвитку. Так, треба враховувати перспективу зростання попиту і кількості користувачів і відвідувачів на сайті чи у додатку, яка вимагатиме масштабування кодової бази та бази даних, підвищення пропускну здатності і підвищення продуктивності функціонування програмного продукту. Для великих продуктів або продуктів, які мають швидку перспективу зростання, обирають асинхронні варіанти, комбіновані архітектури та часто мікро-сервісний або модульний підхід. Для програмних продуктів, зростання яких лежить у коридорі від повільного до помірного, а також для продуктів, які треба швидко і досить дешево підтримувати і розвивати, основним технологічним стеком є так званий LAMP. В основі цього стеку лежить мова PHP, яка є однією з найрозповсюдженіших мов програмування. Ця мова є досить швидкою, щоб витримувати помірні та високі навантаження, а також досить безпечною. Вона активно розвивається ком'юніті і використовується у великій кількості проектів. Зазвичай у зв'язці з PHP використовують систему керування базами даних MySQL, яка являє собою систему, що дозволяє створювати, підтримувати та масштабувати реляційні бази даних. Якщо проект не піддається надвисокому навантаженню, то такий технологічний стек є раціональним вибором через його відносно легку підтримуваність, можливості розміщувати на дешевих виділених та хмарних серверах та

відносно стабільність додатків. В якості браузерного клієнту можна використовувати безліч різних варіантів бібліотек і фреймворків на базі мови Javascript або інших мов, що здатні виконуватись у середовищі веббраузера.

Для розробки вебдодатків часто використовують фреймворки. Фреймворк є набором інструментів, бібліотек та методологій, що спрощують розробку програмного забезпечення і дозволяють розробникам швидше створювати додатки. Наявність стандартних методів вирішення типових задач також дозволяє уникнути помилок, збільшує стабільність та безпеку додатку.

Після аналізу різних методів вирішення проблем було зроблено висновок, що використання фреймворку Laravel [9] забезпечить швидку розробку та ефективне використання ресурсів. Основні переваги використання фреймворку Laravel полягають у тому, що він забезпечує зручну інтерфейсну частину, швидкість розробки, високу продуктивність та безпеку вебдодатків. Один з найбільш важливих аспектів Laravel – це його система маршрутизації, яка дозволяє розробнику легко налаштувати маршрути та контролери в додатку. Це дозволяє значно скоротити час розробки та забезпечує простоту управління трафіком в додатку. Laravel також має велику кількість різноманітних додаткових бібліотек і плагінів, що робить його більш гнучким для розробки вебдодатків різних складностей [10].

Для проектування задачі платформи були умовно поділені на наступні модулі:

1. Товари – містить сутності і бізнес логіку, яка включає опис товарів, їх категоризацію, сортування, фільтрування та рекомендації.

2. Модуль роботи з продавцем (Магазин) – система керування товарами, налаштуваннями, статистикою продажів та ін.

3. Модуль покупця – містить роботу з платформою з точки зору покупця, включаючи особистий кабінет із списком замовлень, кошик, персональні дані.

4. Платіжний модуль – модуль додатку, що працює з платіжними системами на стороні покупця та продавця, забезпечує безпечні транзакції, простий Escrow-подібний досвід переказів та ін.

5. Модуль арбітражу – модуль, робота якого присвячена розв'язанню конфліктів та обробці взаємних скарг.

6. Модуль доставки – регулює діяльність та налаштування коду, що відповідає за оформлення доставки і відстежування, якщо воно доступне.

7. Модуль статистики – відповідає за збір, зберігання та аналіз статистики та поставляє дані до адміністраторів системи та продавців.

Основні завдання розробки маркетплейсу включають:

– розробку архітектури системи: структури бази даних, взаємодії між компонентами системи;

– розробку інтерфейсу користувача: дизайн і розміщення елементів, функціональність;

– розробку функціональності системи: авторизація користувачів, створення та редагування товарів, оформлення замовлень, оплата тощо;

– тестування та відлагодження системи.

Діаграма станів і переходів наведено на рис. 2.

Отже, для досягнення поставлених завдань розробки онлайн-маркету були використані наступні сучасні технології та програмні засоби:

– фронтенд: Vue 3, Laravel 9 (має вбудований шаблонний движок Blade, який дозволяє розбити HTML-код на невеликі шаблони), Bootstrap 5;

– бекенд: Laravel 9, Node.JS[11];

– СУБД MySQL 8.0 [12].

До додаткових інструментів додаються: пакетні менеджери Composer, NPM, а також інструмент для збірки Vite із мовою препроцесору SCSS.

Архітектура системи вебдодатку на Laravel, Vue [13] та MySQL була побудована на базі клієнт-серверної архітектури з використанням REST API. У цій архітектурі клієнти взаємодіють з сервером через API, виконуючи запити і отримуючи відповіді в форматі JSON.

Вебдодаток онлайн маркету складається з 44 маршрутів, три з котрих стандартні, створені для відслідковування помилок в роботі додатку, а один направлено на генерацію токєну захисту від CSRF-атак. Інші маршрути поділені на дві великі категорії: API, Web.

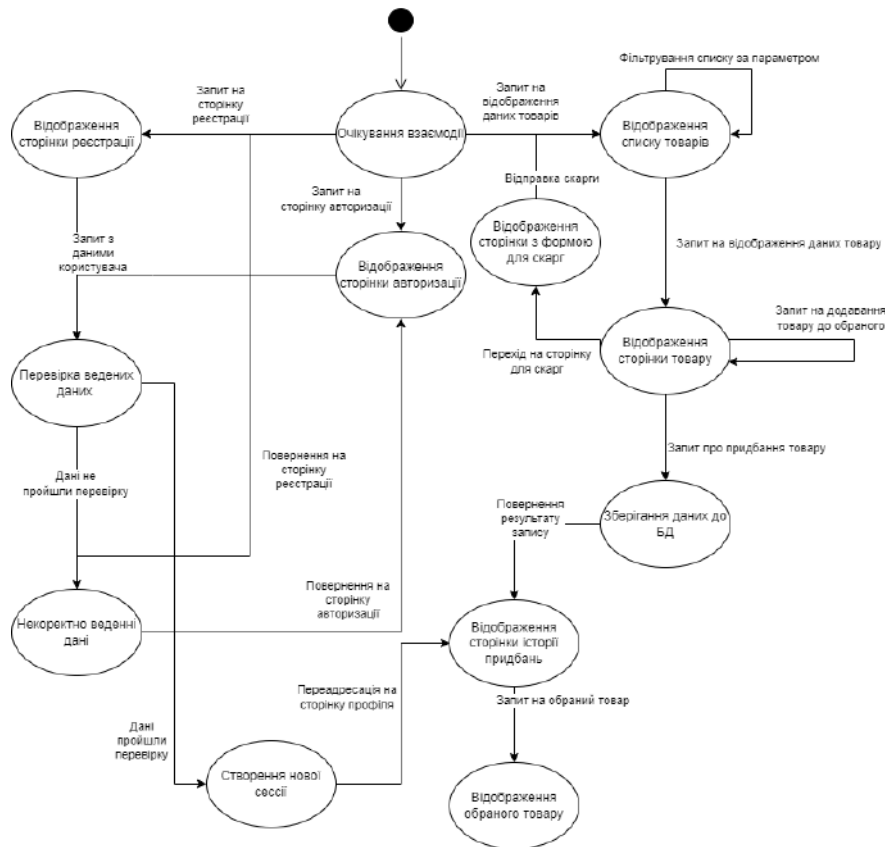


Рис. 2 – Діаграма станів і переходів

Web-маршрути використовуються для забезпечення доступу до статичних HTML-сторінок, які відображаються в браузері. Ці маршрути можуть використовувати middleware, які забезпечують аутентифікацію, авторизацію та інші функції безпеки.

API-маршрути використовуються для доступу до даних через API. Вони використовуються для передачі даних в JSON-форматі та відповідають на запити HTTP-методами, такими як GET, POST, PUT та DELETE. API-маршрути також можуть використовуватись проміжним програмним забезпеченням, які забезпечують аутентифікацію та авторизацію, а також перевірку валідності даних, які надсилаються з клієнтської сторони. У даній роботі API-маршрути були зроблені для взаємодії з Vue-компонентами.

Було прийнято рішення робити проект без певної головної сторінки, роль головної сторінки відіграє сторінка з рекомендованими або обраними товарами із каталогу. Ця сторінка з товарами має адаптивну верстку під будь-які розміри екрану та товари, які виводяться послідовно по 15 елементів і доповнюються у сторінку при наближенні користувачем кінця сторінки. Обравши товар, користувач потрапляє до сторінки товару, яка має кілька відмінностей у користувацькому досвіді взаємодії та дизайн, залежно від ролі користувача.

Основні скріншоти програмного забезпечення наведено на рис. 3.

Для покупки товару на платформі покупець повинен надати особисті дані, а для цього необхідна реєстрація. Для реєстрації необхідно перейти на відповідний розділ на сайті, вказати ім'я користувача, адрес електронної пошти, пароль. Для фільтрування товарів за категоріями необхідно натиснути на відповідний розділ у меню, яке розташовано на навігаційному меню. Після того, як користувач обирає необхідний товар, він переходить на сторінку з цим товаром, де може придбати товар, додати його до обраного, перейти до іншого, рекомендованого, товару, ознайомитись з описом, оцінкою та відгуками на нього, переглянути додаткові зображення товару. За бажанням він може залишити свій відгук. Після додавання товару до обраного, користувача поверне на сторінку з товаром. Після придбання, його перенаправить на сторінку профіля, де буде відображена історія придбань. Там же зліва він може обрати перегляд обраного товару, а також, за бажанням, видалити його зі списку.

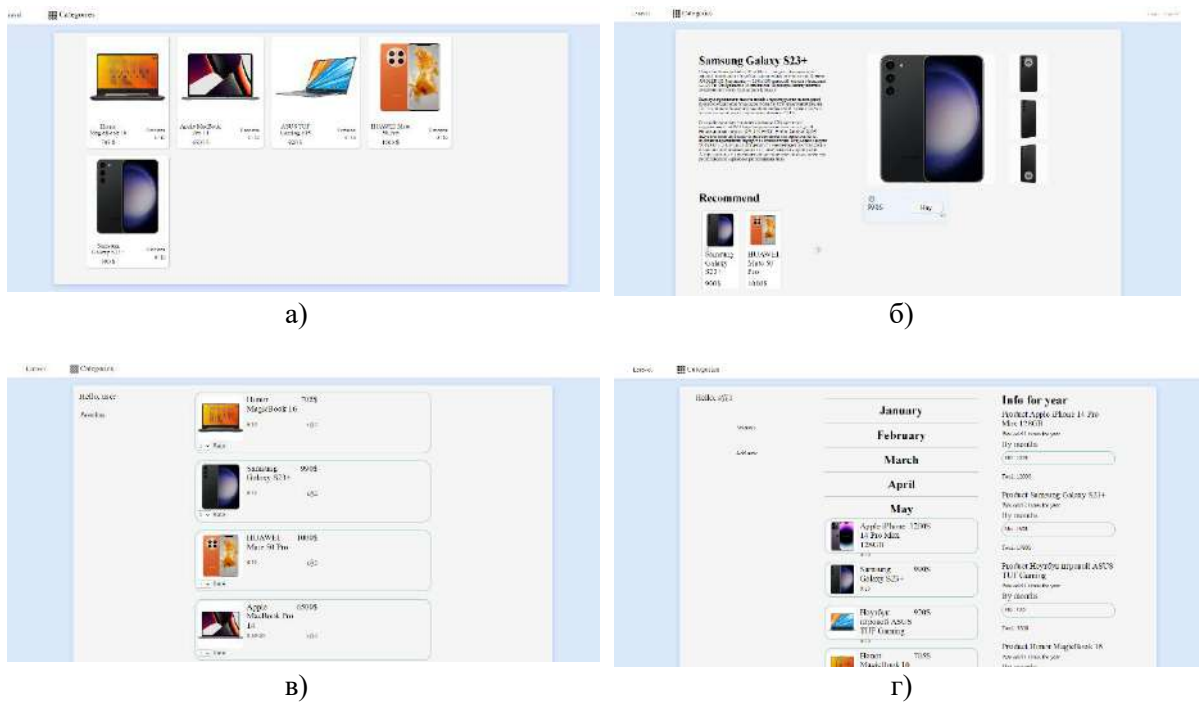


Рис. 3 – Основні скріншоти вебдодатку: а) – головна сторінка; б) – сторінка товару; в) – сторінка профілю покупця зі списком товарів, які він придбав; г) – сторінка профілю продавця зі статистикою продажів

На сторінці профілю продавець може додавати новий товар або переглядати статистику продажів. На першій сторінці він має заповнити форму, яка зберігає його товар у базу даних, після чого вона буде відображена у списку на головній та за фільтрацією по категоріях або продавцях. На другій сторінці продавець буде бачити інформативну статистику продажів. На ній буде зображено товари, відсортовані по місяцях. Також буде підраховано скільки було продано кожного товару щомісячно, а також скільки було отримано грошей за ці продажі, що буде підраховано також щомісячно та за весь рік цілком. Крім цього продавцю дозволяється видалити свій товар на сторінці товару. Останній функціонал на сторінці товару, а також на списках товарів, не відрізняється від функціоналу, до якого має доступ продавець.

Адміністратор також проходить етап реєстрації, після якого його акаунту надають роль адміністратора. Адміністратор має можливість видалити будь-який товар з публічного доступу на сторінці товару. На сторінці профілю у адміністратора знаходиться список скарг, на які він має можливість відповісти двома варіантами. У скарзі може бути відмовлено, якщо вона не відповідає дійсності.

Таким чином, було створено вебдодаток для електронної комерції, який дозволяє:

- користувачам реєструватись та переглядати товари в онлайн-маркету, фільтруючи їх за категоріями або продавцями; слідкувати за історією покупок та обраними товарами;
- продавцям створювати нові позиції на маркету, а також підраховування статистичних даних щодо продажів;
- адміністраторам сайту швидко реагувати на скарги або видалити товари, які порушують правила сервісу чи є незаконними.

Висновки

1) Було проведено огляд принципів побудування додатків-маркетплейсів, їх розмаїття, особливості функціонування та архітектури.

2) Було проаналізовано основні етапи розробки, такі як проектування бази даних, розробка моделей та контролерів, налаштування маршрутів та створення користувацького інтерфейсу, та

створено вебдодаток для електронної комерції, який забезпечує високий рівень безпеки та швидкість роботи.

3) Практична значущість розробленого додатку полягає у тому, що він надає можливість зручно та швидко розгорнути продавцям свій бізнес; користувачам – отримати необхідний товар в будь-який час та з будь-якої точки світу.

4) Лімітований функціонал додатку дозволяє розробити тільки основні модулі і функції, а потім у гнучкому режимі із попереднім тестуванням додавати те, що необхідно саме цільовій аудиторії покупців і продавців, а також залучати тих, для кого функціонал та конкурентне сервіси великих маркетплейсів є надлишковим.

Перелік використаних джерел:

1. Sedziewski M. Building an online marketplace from scratch – introduction [Online]. Available: <https://medium.com/hackernoon/building-an-online-marketplace-from-scratch-introduction-738839e4e76> (дата звернення 30.09.2023).
2. A marketplace framework for trading cloud-based services / A. Menychtas, S. Garcia Gomez, A. Giessmann, A. Gatzoura, K. Stanoevska, J. Vogel. *Proceedings of the 8th international conference on Economics of Grids, Clouds, Systems, and Services GECON 2011*, Paphos, Cyprus, 5 December 2011. Pp. 76-89. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-28675-9_6.
3. Amazon. URL: <https://www.amazon.com/> (дата звернення 30.06.2023).
4. EBay. URL: <https://www.ebay.com/> (дата звернення 30.06.2023).
5. Aliexpress. URL: <https://www.aliexpress.com/> (дата звернення 30.06.2023).
6. Etsy. URL: <https://www.etsy.com/> (дата звернення 30.06.2023).
7. MarketPlace – a digital materials modelling marketplace / G. Goldbeck et al. 2023. 39 p. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.8330333>.
8. 20+ Best marketplaces in Germany. URL: <https://ecommercegermany.com/blog/20-best-online-marketplaces-in-germany> (дата звернення 01.10.2023).
9. Pecoraro C. *Mastering Laravel*. Birmingham : Packt Pub., 2015. 204 p.
10. Wilson R. *Planning your internet marketing strategy: a doctor Ebiz guide*. New York : Wiley, 2001. 276 p.
11. Syed B. *Beginning Node.js*. New York : Apress, 2014. 308 p.
12. Stokes D. *MySQL and JSON: a practical programming guide*. New York : McGraw Hill, 2018. 128 p.
13. Hanchett E., Listwon B. *Vue.js in action*. Shelter Island : Manning, 2018. 304 p.

References:

1. M. Sedziewski, Building an online marketplace from scratch – introduction [Online]. Available: <https://medium.com/hackernoon/building-an-online-marketplace-from-scratch-introduction-738839e4e76>. Accessed on: September 30, 2023.
2. A. Menychtas, S. Garcia Gomez, A. Giessmann, A. Gatzoura, K. Stanoevska, and J. Vogel, «A marketplace framework for trading cloud-based services», in Proceedings of the 8th international conference on Economics of Grids, Clouds, Systems, and Services GECON 2011, Paphos, Cyprus, 2011, pp. 76-89. doi: 10.1007/978-3-642-28675-9_6.
3. Amazon [Online]. Available: <https://www.amazon.com/>. Accessed on: June 30, 2023.
4. EBay [Online]. Available: <https://www.ebay.com/>. Accessed on: June 30, 2023.
5. Aliexpress [Online]. Available: <https://www.aliexpress.com/>. Accessed on: June 30, 2023.
6. Etsy [Online]. Available: <https://www.etsy.com/>. Accessed on: June 30, 2023.
7. G. Goldbeck et al., *MarketPlace – a digital materials modelling marketplace*. 2023. 39 p. doi: 10.5281/zenodo.8330333.
8. 20+ Best marketplaces in Germany [Online]. Available: <https://ecommercegermany.com/blog/20-best-online-marketplaces-in-germany>. Accessed on: October 1, 2023.
9. C. Pecoraro, *Mastering laravel*. Birmingham, UK: Packt Publ., 2015.
10. R. Wilson, *Planning your internet marketing strategy: a doctor Ebiz guide*. New York, USA: Wiley Publ., 2001.
11. B. Syed, *Beginning Node.js*. New York, USA: Apress Publ., 2014.

12. D. Stokes, *MySQL and JSON: a practical programming guide*. New York, USA: McGraw Hill Publ., 2018.
13. E. Hanchett, and B. Listwon, *Vue.js in Action*. Shelter Island, USA: Manning Publ., 2018.

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

Стаття надійшла 18.10.2023

Стаття прийнята 23.11.2023

УДК 004.056.53:519.17

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.299981

© Кажан Д.В.¹, Левицька Т.О.², Кривенко О.В.³

ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНОГО ПРЕДМЕТУ ЗА ДОПОМОГОЮ ДЕРЕВА РІШЕНЬ

В роботі наведено метод дерева рішень для класифікації типу вибухонебезпечних предметів. Це дозволяє робити висновки відносно типу вибухонебезпечного предмету, що заховано в залежності від типу ґрунту. Дана проблематика є актуальною, оскільки дозволяє обґрунтовано пояснювати тип небезпеки в залежності від різних зовнішніх факторів. В роботі запропоновано загальне представлення побудови дерева рішень для визначення виду вибухонебезпечних предметів. Крім цього в роботі надано візуалізацію розбиття на вузли для наочного представлення побудови дерева рішень з урахуванням розбиття на піддерева та вузли. У якості вузлів виступають основні атрибути: напруга, висота датчика над рівнем ґрунту, тип ґрунту. Наведено алгоритм побудови дерева рішень та структурну блок-схему алгоритму ID3. Було проведено дослідження, на основі якого було обрано для вимірювання хаосу розбиття дерева рішень ентропію. Були перелічені основні характеристики алгоритму ID3 з урахуванням предметної галузі, в якій він застосовується. В роботі наведено одне з побудованих дерев рішень, що було побудовано в рамках досліджень для визначення типу вибухонебезпечного предмета в залежності від можливого типу ґрунту, на прикладі це сухий та піщаний ґрунт.

Ключові слова: дерева рішень, візуалізація даних, вибухонебезпечні предмети, алгоритм ID3.

D.V. Kazhan, T.O. Levytska, O.V. Kryvenko. Determining the type of explosive item using a decision tree. The present circumstances in Ukraine delineate specific areas of study. The imperative to identify an explosive device is increasingly paramount for adults and particularly for children. Failing to recognize this danger poses a threat to health and life. The paper presents a decision tree method for classifying the type of explosive objects. This allows you to draw conclusions about the type of explosive object hidden depending on the type of soil. This problem is relevant, as it allows to reasonably explain the type of danger depending on various external factors. The paper offers a general representation of the construction of a decision tree for determining the type of explosive objects. In addition, the work provides a visualization of the division into nodes for a visual representation of the construction of a decision tree, taking into account the division into subtrees and nodes. The nodes are the main attributes: voltage, sensor height above ground level, soil type. The

¹ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3359-1313, levitskaya_t_a@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0006-2860-6575, krivenko_o_v@pstu.edu

decision tree construction algorithm and the structural block diagram of the ID3 algorithm are given. A study was conducted based on who was chosen to measure the entropy decision tree split chaos. The main characteristics of the ID3 algorithm were listed, taking into account the subject area in which it is used. The paper presents one of the built decision trees, which was built as part of research to determine the type of explosive object depending on the possible type of soil, for example, it is dry and sandy soil. Moreover, the paper provides a comparative analysis of the decision tree model against existing methodologies, shedding light on its efficacy, accuracy, and potential advancements in enhancing threat detection capabilities. This comprehensive analysis not only showcases the model's strengths but also offers insights into potential areas for refinement and improvement.

Key words: *decision trees, data visualization, explosive objects, ID3 algorithm.*

Постановка проблеми. Сьогоднішня ситуація в Україні диктує свої напрямки тематики для вивчення. Необхідність уміти розпізнати вибухонебезпечний пристрій стає першочерговою задачею як для дорослих, так і особливо для дітей. Бо невміння розпізнати небезпеку несе в собі загрозу здоров'ю та життю. Окрім цього міни виявилися серйозною перешкодою для українських військових, сповільнюючи наступальні дії, пошкоджуючи бронетехніку. Для подолання мінних полів у Запорізькій і Донецькій області необхідні масштабні військово-інженерні операції, які є непростими навіть для найкраще оснащених армій.

Таким чином, в країні стає гостре питання щодо виявлення мін та їх розмінування. Основна загроза, яка стає перед цивільним населенням, полягає в тому, щоб вчасно помітити міну та проінформувати служби, що займаються розмінуванням. Це значить, що діти та дорослі повинні бути обізнаними у тому, яким чином може їм погрожувати небезпека. Тому навчання з попередження ризиків від вибухонебезпечних предметів є актуальним питанням сьогоднішнього дня в Україні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В роботі [1] представлено запровадження дистанційного навчання в українських школах під час карантину через пандемію COVID-19. В ній представлено дослідження з використанням різних видів електронної освіти, ресурсів, що допомагають викладачам забезпечити якісне дистанційне навчання. В роботі представлено онлайн-опитування 576 вчителів, на основі якого можна зробити висновки, що 12% опитаних вчителів почали користуватися електронними освітніми ресурсами для забезпечення дистанційного навчання студентів під час карантину.

В роботі [2] розглядається процес реформування освіти, спрямований на перехід вищої освіти до компетентнісних та індивідуальних підходів. Автори зазначають, що відбувається стикування з необхідністю побудови індивідуальних навчальних шляхів для кожного майбутнього морського фахівця. У цьому відношенні технологія адаптації навчання на основі сучасних інформаційно-комунікаційних технологій (ІКТ) набуває великого значення. Автори піднімають питання створення адаптивного інформаційного середовища, актуального для підготовки сучасних і конкурентоспроможних спеціалістів. Автори вважають, що це середовище має базуватися на впровадженні адаптивних технологій навчання та підготовки студентів морського факультету, тому в статті досліджено педагогічну проблему майбутніх мореплавців.

У статті [3] розглядається доповнена реальність, як одна з технологій, що найбільш активно розвивається, яка знайшла своє застосування у сфері освіти. Аналіз різноманітних публікацій підтвердив, що технологія AR відкриває нові можливості для викладачів і підвищує привабливість навчання для студентів різного віку. Особливо це стосується маленьких дітей. У статті визначено види діяльності, які надають дитині особистий досвід використання технології AR. Дается порівняння існуючих додатків AR для вивчення алфавіту. Описано нову програму AR, розроблену за допомогою Unity, C#, Vuforia. Розроблений мобільний AR-додаток дає можливість вивчати український алфавіт, назви цифр, звуки тварин. Завдяки цьому додатку процес навчання супроводжується тривимірною візуалізацією та озвученням кожної букви та цифри. Аналіз опитування вчителів і батьків показав, що при використанні AR-додатку інтерес і самоефективність дітей у вивченні літер і цифр значно зростає. Використання додатку AR збільшили швидкість запам'ятовування матеріалу та допомогли утримати увагу дитини під час навчання нового матеріалу.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності визначення вибухонебезпечних предметів за допомогою алгоритму ID3.

Виклад основного матеріалу. Дерево рішень – це контрольовані алгоритми машинного навчання, які використовуються як для регресії, так і для формулювання проблеми класифікації. Вони використовують подання дерева для вирішення проблеми, в якій кожен вузол представляє атрибут, кожне посилення представляє правило прийняття рішень, а кожен листок представляє результат (категоричне або безперервне значення) [4].

Використовуються дерева рішень в даній роботі в якості класифікатора для визначення типу мін. Тобто у якості листка виступає тип міни: протитанкова, протипіхотна міна-пастка, М-14 протипіхотна або відсутність міни. Дане розбиття обрано з погляду на реальні дані, що використовуються як тестовий набір даних для визначення типу міни.

У якості вузлів виступають основні атрибути: напруга, висота датчика над рівнем ґрунту, тип ґрунту. В якості правил виступають правила продукційного типу.

Візуальне представлення побудови дерева рішень з урахуванням розбиття на піддерева та вузли наведено на рис. 1.

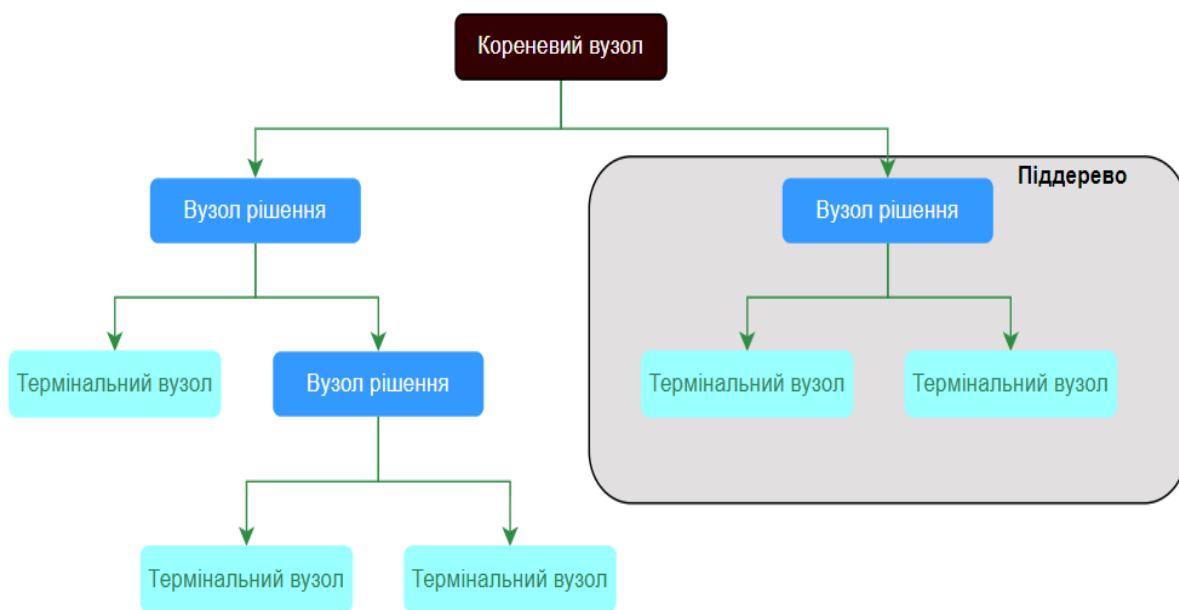


Рис. 1 – Візуалізація розбиття на вузли

Було вирішено використовувати алгоритм ID3, він є алгоритмом класифікації, який використовує жадібний підхід побудови дерева рішень шляхом вибору найкращого атрибута, який дає максимальний приріст інформації (IG) або мінімальну ентропію (H) [5].

Основні складники алгоритму: вузол – функція (атрибут); відділення – рішення (правило); листок – підсумок (категоричний або суцільний).

Кореневий вузол – це найвищий вузол у дереві, який представляє повний набір даних. Також можна сказати, що це початкова точка процесу прийняття рішень.

Рішення / внутрішній вузол. Вузли рішення є нічим іншим, як результатом поділу даних на кілька сегментів даних, і головною метою є створення дочірніх вузлів із максимальною однорідністю або чистотою (тобто всі одного типу).

Ліцевий / кінцевий вузол – цей вузол представляє розділ даних із найвищою однорідністю (означає, що всі вони одного типу).

В алгоритмі ID3 було вирішено використовувати як критерій визначення хаосу – ентропію. Ентропія є мірою кількості невизначеності в наборі даних S [6]. Математичне представлення ентропії:

$$H(S) = \sum_{c \in C} -p(c) \log_2 p(c), \quad (1)$$

де S – поточний набір даних, для якого обчислюється ентропія (змінюється на кожній ітерації алгоритму ID3);

C – набір класів у S {приклад – $C = \{yes, no\}$ };

$p(c)$ – пропорція кількості елементів у класі c до кількості елементів у наборі S .

Ентропія в ID3 ентропія обчислюється для кожного атрибута, що залишився. Атрибут із найменшою ентропією використовується для розбиття набору S на цій конкретній ітерації [7].

Ентропія = 0 означає, що це чистий клас, тобто всі належать до однієї категорії. В цілому це майже не досягається, бо якщо поставити обмеження складання дерева саме по фінальному значенню ентропії, то буде виконано перенавчання. Тому що коли ентропія дорівнює нулю, то позначає, що розбиття зупинилось на поділені на кожний окремий лист, а це не є метою побудови дерева рішень. Крім цього, це в свою чергу є серйозною проблемою.

Приріст інформації $IG(A)$ повідомляє нам, наскільки похибка в S була зменшена після розбиття набору S на атрибут A . Математичне представлення приросту інформації:

$$IG(A, S)_i = H(S) - \sum_{t \in T} p(t)H(t), \quad (2)$$

де $H(S)$ – ентропія множини S ;

T – підмножини, створені в результаті розбиття множини S за атрибутом A .

Підмножина, яка створюється у результаті розбиття множини S за атрибутом A , розраховується наступним чином:

$$S = \cup_{t \in T} H(t), \quad (3)$$

де $p(t)$ – пропорція кількості елементів у t до кількості елементів у наборі S ;

$H(t)$ – ентропія підмножини t .

В цілому в алгоритмі ID3 можна розрахувати приріст інформації (замість ентропії) для кожного атрибута, що залишився. Його можна використовувати для відбору ознак шляхом оцінки інформаційного приросту кожної змінної у контексті цільової змінної. Атрибут із найбільшим приростом інформації використовується для розбиття набору S на цій конкретній ітерації.

Критерій приросту інформації використовується здебільшого для вибору кращого розбиття підмножин у вузлах дерев рішень в алгоритмах навчання ID3. Але для задачі визначення типу вибухонебезпечного об'єкта при побудові дерева рішень було вирішено використовувати ентропію, оскільки саме визначення хаосу в кожному піддереві є поточною актуальною задачею.

Алгоритм ID3 включає в себе наступні основні кроки:

Крок 1: Попередня обробка даних – очищення і попередня обробка даних, створення множини V . Необхідно обробити відсутні значення та перетворити категоричні змінні в числові представлення, якщо це необхідно.

Крок 2: Вибір кореневого вузла – обчислення ентропії цільової змінної (мітки класу) на основі набору даних, згідно з формулою (1).

Крок 3: Розрахунок приросту інформації – для кожного атрибута в наборі даних обчислюється приріст інформації, згідно з формулою (2), коли набір даних розділено на цей атрибут, кожен атрибут має номер з множини i .

Крок 4: Вибір найкращого атрибута – вибір атрибута (A) із найбільшим приростом інформації як вузла прийняття рішення для дерева.

Крок 5: Розділення набору даних – розділення набору даних на основі значень вибраного атрибута ($A_i \subset S$).

Крок 6: Повторіть процесу – рекурсивно повторюються кроки 2-5 для кожної підмножини (A_i), доки не буде виконано критерію зупинки.

Критерієм зупинки може бути – глибина дерева досягне максимальної межі, всі екземпляри в підмножині належатимуть до одного класу.

Для обраної задачі визначення типу вибухонебезпечного предмету обрано максимальну глибину розбиття $l = 3$.

Алгоритм визначення типу вибухонебезпечного предмета за допомогою дерева рішень представлено на рис. 2.

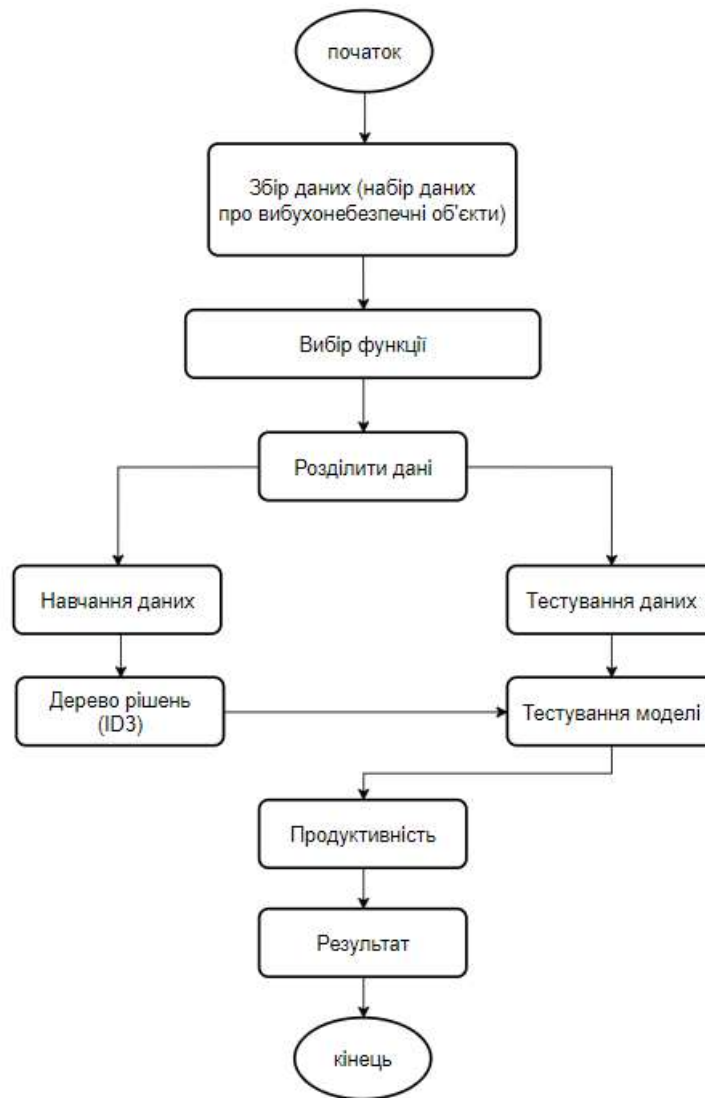


Рис. 2 – Блок схема алгоритму ID3

Основні характеристики алгоритму ID3 такі:

- 1) ID3 використовує жадібний підхід, тому він не гарантує оптимального рішення; він може застрягти в локальних оптимумах.
- 2) ID3 може переобладнати навчальні дані (щоб уникнути переобладнання, слід віддавати перевагу меншим деревам рішень перед більшими).
- 3) Цей алгоритм зазвичай створює невеликі дерева, але він не завжди створює найменше можливе дерево, що в обраній задачі визначення вибухонебезпечних предметів є головною задачею.
- 4) ID3 важче використовувати для безперервних даних (якщо значення будь-якого заданого атрибута є безперервним, тоді є багато місць для розділення даних на цьому атрибуті, і пошук найкращого значення для розділення може зайняти багато часу), з поглядом на обрану предметну галузь даних мінус не є критичним.

Оскільки за допомогою класифікації можна визначати схожі характеристики та можливе передбачення розташування вибухонебезпечних предметів в залежності від типу ґрунту.

В виборці, на якій проводились дослідження та яка стала основою для побудови дерев рішень, використовуються наступні показники: напруга, висота, тип ґрунту, тип міни. Детальніше наведено визначення кожного показника, що використовується у вибірці.

Напруга – Значення вихідної напругу датчика FLC завдяки магнітного скривлення.

Висота – висота датчика від землі.

Тип ґрунту – тип ґрунту, де може бути встановлена міна, поділ іде на шість різних типів ґрунту в залежності від вологості стану ґрунту.

Типи мін – це міни, що найчастіше зустрічаються на суші, у виборці розглянуто п’ять різних класів.

Спираючись на ці знання, можна навчити уважно відслідковувати навколишнє середовище та виявляти небезпеку. На рис. 3 наведено побудоване дерево рішень для типу ґрунту сухий та піщаний. Таким чином, можна відслідковувати по різному типу ґрунту, який саме тип вибухонебезпечного об’єкта там розташовано.

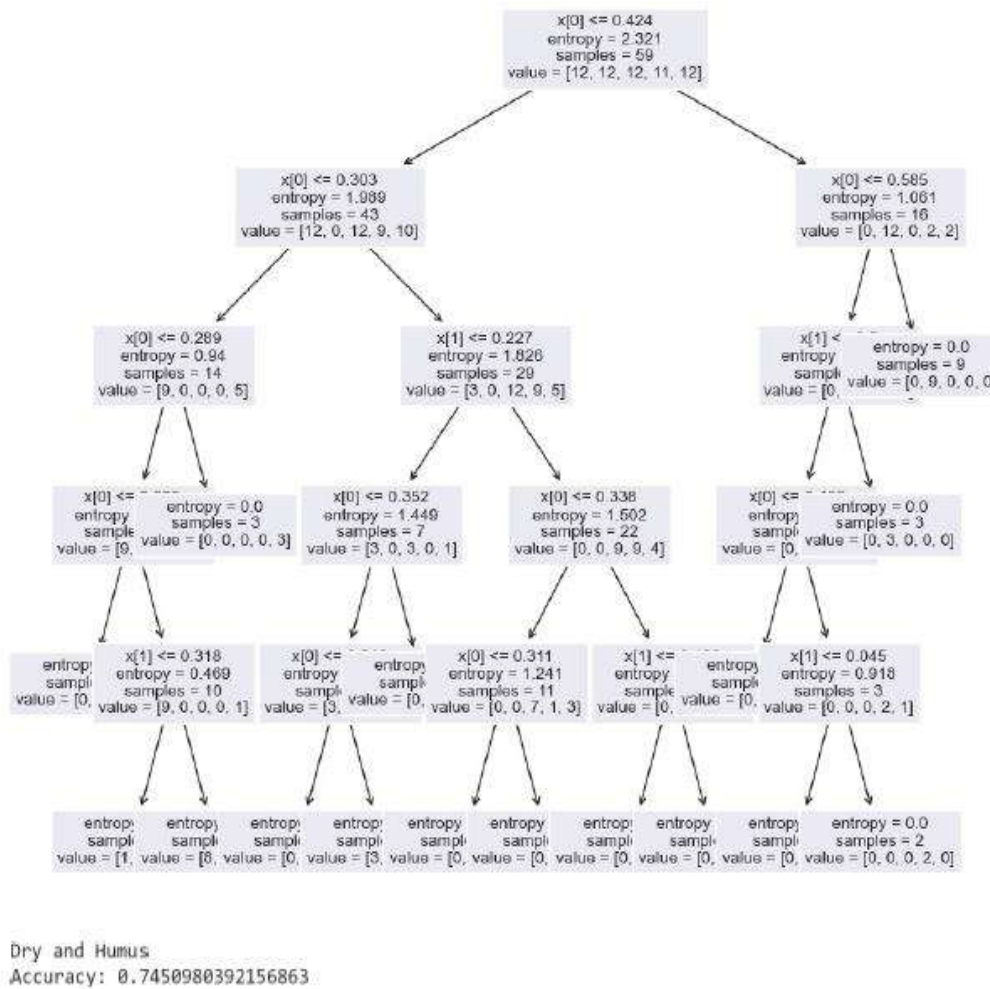


Рис. 3 – Побудоване дерева рішень для типу ґрунту сухий та піщаний

На рис. 3 наведено одно з побудованих дерев рішень, крім нього побудовано ще шість дерев рішень, на яких представлено поєднання різних типів ґрунту. Це підтверджує те, що саме тип ґрунту є одним із головних показників, оскільки різні типи мін будуть встановлені в різному типі ґрунту.

Висновки

Запропонований алгоритм ID3 використовується для визначення типу вибухонебезпечних предметів, що представляє собою значущий крок у вирішенні актуальної проблеми в Україні. Використання методу дерева рішень для класифікації типів вибухонебезпечних предметів виявляється обґрунтованим підходом, який дозволяє адаптувати тип небезпеки до різних зовнішніх факторів. Подана структурна блок-схема алгоритму ID3.

В подальшому планується використання побудованих дерев рішень в основі інтерактивної навчальної системи. Що є актуальною науково-практичною задачею для вивчення типів небезпеки при її виявленні.

Перелік використаних джерел:

1. Experience of use of electronic educational resources by Ukrainian teachers during the distance learning due to the COVID-19 pandemic (March-May 2020) / Zhenchenko M., Melnyk O., Prykhoda Y., Zhenchenko I. *ICT in education, research and industrial applications. integration, harmonization and knowledge transfer* : Proceedings of the 17th International Conference, Kherson, Ukraine, 28 September - 2 October 2021. Vol. II. Pp. 55-65.
2. Adaptive Learning Environment Design in the System of Future Maritime Specialits' Training / S. Voloshynov, I. Riabukha, O. Dobroshtan, H. Popova, T. Spychak. *ICT in education, research and industrial applications. integration, harmonization and knowledge transfer* : Proceedings of the 17th International Conference, Kherson, Ukraine, 28 September - 2 October 2021. Vol. II. Pp. 66-76.
3. Using augmented reality for early literacy / Piatykor O., Pronina O., Tymofieieva I., Palii I. *ICT in education, research and industrial applications. integration, harmonization and knowledge transfer* : Proceedings of the 17th International Conference, Kherson, Ukraine, 28 September - 2 October 2021. Vol. II. Pp. 221-236.
4. Shai S.-S., Shai B.-D. *Understanding machine learning: from theory to algorithms*. Cambridge University Press, 2014. 500 p.
5. Gambhir A. *Classification problem in data mining using decision trees*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019. 96 p.
6. Maimon O.Z., Rokach L. *Data mining with decision trees: theory and applications*. 2nd ed. World Scientific Publishing, 2014. 330 p.
7. Rokach L. *Ensemble learning: pattern classification using ensemble methods*. 2nd ed. World Scientific Publishing, 2019. 300 p.

References:

1. M. Zhenchenko, O. Melnyk, Y. Prykhoda, and I. Zhenchenko, «Experience of use of electronic educational resources by Ukrainian teachers during the distance learning due to the COVID-19 pandemic (March-May 2020)», in Proceedings of the 17th International Conference ICT in education, research and industrial applications. Integration, harmonization and knowledge transfer, Kherson, Ukraine, 2021, vol. II, pp. 55-65.
2. S. Voloshynov, I. Riabukha, O. Dobroshtan, H. Popova, and T. Spychak, «Adaptive Learning Environment Design in the System of Future Maritime Specialits' Training», in Proceedings of the 17th International Conference ICT in education, research and industrial applications. integration, harmonization and knowledge transfer, Kherson, Ukraine, 2021, vol. II, pp. 66-76.
3. O. Piatykor, O. Pronina, I. Tymofieieva, and I. Palii, «Using augmented reality for early literacy», in Proceedings of the 17th International Conference ICT in education, research and industrial applications. Integration, harmonization and knowledge transfer, Kherson, Ukraine, 2021, vol. II, pp. 221-236.
4. S.-S. Shai, and B.-D. Shai, *Understanding machine learning: from theory to algorithms*. Cambridge University Press Publ., 2014.
5. A. Gambhir, *Classification problem in data mining using decision trees*. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019.
6. O.Z. Maimon, and L. Rokach, *Data mining with decision trees: theory and applications*, 2nd ed. World Scientific Publishing, 2014.
7. L. Rokach, *Ensemble learning: pattern classification using ensemble methods*, 2nd ed. World Scientific Publishing, 2019.

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

Стаття надійшла 18.10.2023
Стаття прийнята 23.11.2023

**ВЕБДОДАТОК ДЛЯ ДОПОМОГИ ТИМЧАСОВО ПЕРЕМІЩЕНИМ
ОСОБАМ У НІМЕЧЧИНІ**

В цій статті розглянуто процес побудови інформаційної системи, яка сконцентрована на потребах дуже широкої групи людей – українських біженців у Німеччині. Бюрократична система Німеччини вкрай складна, зокрема у сфері міграційного законодавства, тому людям, які прибувають в країну, потрібна допомога, але волонтерська допомога поступово зменшується, тому виникає потреба у інформаційній системі, яка допоможе зорієнтуватись самостійно. Більшу частину питань, пов'язаних з інтеграцією, людині доводиться вирішувати самостійно, а систематизованих різнонаправлених джерел інформації немає, збір інформації про необхідні дії та вимоги законів є досить складним. Тому розробка допоміжної системи для орієнтації людей у нових умовах, що дозволить розвантажити роботу волонтерів і допомогти людям легше орієнтуватись самим, є дуже актуальною. Дана інформаційна система виконана у формі вебдодатку, який використовує в стеку програмування комбінацію MySQL в якості бази даних, PHP у якості основної мови серверної частини (бекенду) у реалізації фреймворка Laravel та Javascript у реалізації React в якості основної мови браузерного клієнта (фронтенда). Одна з ключових проблем, висвітлених у даній статті, це проблема збору та організації інформації серед різнопланових даних, коли джерела, типи даних та швидкість їх застарівання кардинально відрізняються у кожному окремому випадку. Окрім цього, означена важливість дизайну користувацького досвіду через дані в умовах, коли неможливо провести повноцінне дослідження із анкетуванням, фокус-групами і поетапним тестуванням різних підходів до організації даних. Основною задачею дослідження слід вважати саме досвід побудови додатку, який допоможе створити зрозумілий і чіткий алгоритм дії по прибуттю до Німеччини, забезпечить необхідною актуальною і достовірною інформацією, а також надасть довідку з різних аспектів адаптації і перебування в країні у якості особи під захистом.

Ключові слова: українські біженці, особа під захистом, тимчасовий захист, Німеччина, німецьке міграційне законодавство, організація даних, первинна реєстрація, довідкова інформація, вебдодаток, PHP, Laravel, MySQL, React.

O.A. Tuzenko, S.I. Volodin. The web application for supporting temporarily relocated persons in Germany. In current article a process of development of the information system for Ukrainian refugees in Germany was researched. Though this group is the only target audience, the number of people who belongs to it is big. Germany has an extremely complex bureaucracy system, particularly in migration area, especially for refugees. Therefore, people who come to Germany require help, but the number of volunteers involved in this help decreases gradually. That's why a need of the system which can help them to get through themselves is high. Most of the questions, related to integrations, the person is ought to solve on his own, and there is a lack of sources with systematized and differentiated information, the obtaining, gathering information about required actions and legal requirements is rather complex. The need of the supporting system for people's orientation in new conditions, that would decrease the pressure on volunteers and help people to easier cope themselves. The current information system is created as a website, based on PHP programming stack particularly MySQL as a database management system, Laravel as

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-4920-9417, tuzenkoaa@gmail.com

² ст. викладач, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, volodinsi57@gmail.com

PHP framework and Javascript in the framework React as frontend. One of the key problems aside of building web application itself is a problem of gathering and reorganizing various types of data, when its sources, types and obsolescence rate as so different in each particular case. Furthermore, the importance of user experience through data was investigated, especially in the circumstances when normal interviewing, creating focus groups and staged user testing is impossible, as well as it is impossible to test different types of data organization. The main purpose of the paper is an experience of development of web application, which can help to create an intelligible algorithm of actions for the person who just arrives to Germany, as well as provides you up-to-date and reliable information and reference about different aspects of adaptation in the country of residence as a person with protective status.

Keywords: *Ukrainian refugees, person under protection, temporary protection, Germany, German migration law, data organization, primary registration, information, web application, PHP, Laravel, MySQL, React.*

Постановка проблеми. У 2022 році збройна агресія Російської Федерації змусила мільйони людей покинути свої домівки та шукати притулку в інших місцях. Хтось мігрував в межах своєї області, хтось в межах країни, а хтось був змушений шукати притулку за кордоном – в країнах Європейського Союзу. Одні з найкращих умов для біженців пропонувала Німеччина, тож більше мільйону українців приїхали до цієї країни в пошуках захисту та спокійного життя. Але й тут вони зіштовхнулись з проблемами, головними з яких стали незнання німецької мови та нерозуміння того, що взагалі і в якій послідовності їм робити. Основною проблемою є дуже багато інформації. Це й зараз призводить до помилок і тимчасових затримок. Оскільки у наш час всі люди користуються мережею Інтернет для пошуку відповідей на свої питання, то створення вебдодатку для допомоги тимчасово переміщеним особам з України в Німеччині дозволить постраждалим швидко знаходити підтверджену інформацію. У випадку з біженцями та особами, що знаходяться під тимчасовим захистом Німеччини, найгостріше стоїть проблема неоднорідності інформації. В Німеччині діє складна бюрократична система, що керує міграцією та допомогою. Процес адаптації складається з декількох етапів, відрізняється в залежності від багатьох параметрів, географічного положення (Німеччина є федеративною державою, правила і закони у різних землях Федерації суттєво відрізняються).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Допомога біженцям являє собою комплекс дій небайдужих людей, які проводять з метою поліпшення умов перебування постраждалих в незнайомій країні. До цього комплексу входить допомога пошуку житла, пошуку інтеграційних курсів, надання адрес соціальних магазинів та благодійних організацій, надання інформації щодо подачі документів в різні інфраструктури. Волонтери, що долучилися до цієї допомоги, допомагають зорієнтуватися при подачі документів, перекладають з німецької на українську мову, виступають в ролі перекладача на прийомах у лікаря тощо.

Загалом, процес первинної адаптації у німецьке суспільство на правах людини, що знаходиться під тимчасовим захистом, є дуже багатоплановим, він включає в себе первинну реєстрацію у міграційній службі; проживання в таборі біженців або розселення у родини волонтерів, організаціях, що опікуються біженцями і різноманітних гуртожитках; оформлення грошової допомоги, яка відрізняється в залежності від віку, статусу, наявності дітей; особливостей власного здоров'я та ін. Інформація про необхідні кроки для інтеграції у спільноту біженців та одночасно у німецьке суспільство надходить із різноманітних джерел різного ступеня достовірності та надійності. Більшість інформації щодо дій, які необхідно здійснити, щоб отримати відповідний статус, соціальну допомогу і медичне страхування, доступна із відкритих офіційних джерел. Проблема тут полягає в тому, що частина інформації не переведена на українську мову, а у деяких даних взагалі є тільки німецький варіант, що ускладнює процес отримання довідкової інформації, особливо у найкритичніші перші дні після прибуття. Деякі види інформації змінюються доволі динамічно, наприклад, місця у таборах біженців, можливість приїхати до цих установ людям з інвалідністю, людям, з якими приїжджають маленькі діти, або людям, які привезли з собою домашніх тварин. Деякі дані розповсюджуються у стихійних чатах в месенджерах, погано піддаються верифікації, слабо модеруються, викладені в упередженій, емоційній, нечіткій манері, або їх треба самостійно виокремлювати із дискусій.

Щоб вирішити цю проблему, створюються ресурси, які узагальнюють, верифікують, доповнюють та систематизують. Частина із цих ресурсів контролюється урядом Німеччини. Також є ресурси, пов'язані з українськими дипломатичними установами, та різні гарячі лінії для відповіді на питання. Але майже всі електронні ресурси мають серйозні проблеми з актуальністю, повнотою та своєчасним оновленням інформації, а гарячі лінії на додачу мають серйозні проблеми з перевантаженням та недоступністю.

Для розуміння основних проблем серед аналогів та пошуку варіантів їх вирішення було проведено огляд існуючих програмних засобів.

Один з таких засобів – Germany4Ukraine [1]. Це одна з сторінок Федерального відомства у справах міграції та біженців Німеччини, яка була створена спеціально для допомоги постраждалим від війни в Україні особам. Представлений вебдодаток містить актуальну інформацію, що здобула підтвердження владою. Користувач має змогу знайти інформацію про перші кроки по прибуттю у Німеччину, про розміщення та прихисток для біженців з України (пошук житла, актуальні адреси таборів тимчасового розміщення), охорону здоров'я, роботу та соціальну сферу, інтеграційні курси та вивчення мови, освіти та іншу актуальну інформацію. Вебдодаток має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, перелік корисних посилань та оформлення онлайн-заяв. Присутня можливість перекладу сторінки українською, німецькою, англійською та російською мовами. Також на сайті є контактні дані та посилання на сторінки в соціальних мережах для запитань від користувачів. Однак на сайті не вказана дата останнього оновлення інформації, а в наш час кожен день ситуація навколо змінюється, тому й інформація повинна бути актуальна. Також, цей вебдодаток інформує нас про загальні правила та порядок дій, та не про конкретну федеральну землю. Для користувачів це може стати проблемою, адже закони та порядки в кожній землі дещо відрізняються.

Інший програмний засіб – Ukr-DIM [2]. Цей український вебдодаток, який містить усю важливу інформацію для тимчасово переміщених осіб з України в Німеччині. На головній сторінці користувач має змогу обрати одну з трьох мов: українську, німецьку або англійську. Перевагою цього додатку є постійне оновлення інформації та додавання нових корисних статей. Користувач залишається в курсі останніх подій та може бачити, в який час та чи інша стаття була актуальною. Ще одною перевагою є можливість спілкування з онлайн-консультантом в месенджері. Це дозволяє користувачам задати питання, відповіді на які вони знайти не в змозі. Однак вебдодаток має не зовсім зручний інтерфейс: зміст основної статті не містить гіперпосилань, через це, щоб отримати відповідь на останнє питання зі списку, користувач має скролити усю статтю до самого кінця власноруч.

Також існують вебдодатки для допомоги тимчасово переміщеним особам з України, що спеціалізуються на конкретному окрузі. Прикладом такого вебдодатку є сторінка uahelp.wiki для міста Штутгарт та його околиць.

Інформація надходить із різних джерел: служб федерального уряду, земельних урядів, Міністерства закордонних справ України, Bundesamt für Migration und Flüchtlinge (Федеральне відомство у справах міграції та біженців BAMF) [3], митних установ України, Польщі (Польща є транзитною країною для наземного шляху міграції біженців у Європу), Німеччини, Міністерства внутрішніх справ Німеччини, а також карантинних та ветеринарних служб. Ця інформація має різні типи, тексти, розклади, списки документів та місць, де надають допомогу, що постійно оновлюються, контактні дані, статистичні дані та ін. Представлення інформації у вигляді, що швидко та легко сприймалась би людиною, яка погано знайома з реаліями життя в країні, є вкрай важким завданням як у психологічному, так і в технічному плані, а також є складним завданням з інформаційного менеджменту.

Мета дослідження – аналіз проблем визначення вимог до інформаційної системи для українців, що є біженцями в Німеччині, проектування та створення вебдодатку для узагальнення, систематизації та зручної публікації інформації стосовно перебування у якості особи під захистом на території Німеччини.

Виклад основного матеріалу. Інтернет є основним джерелом інформації. Альтернативні джерела, такі як інформаційні дошки (найчастіше німецькою мовою, що складає велику проблему для новоприбулих біженців), гарячі лінії, які часто є недоступними, на додачу спеціалізовані консультативні лінії німецьких урядових відомств, надають інформацію тільки німецькою мовою. Тому коли під час бойових дій на Україні багато людей було змушено шукати притулок

у Німеччині, вони почали шукати інформацію у мережі. Нажаль такої інформації або не було, або було дуже мало й розрізнено. По прибуттю в країну вони не знали, куди їм звертатися, які документи потрібно оформлювати, де знайти безкоштовне місце для ночівлі. Допомогою в цьому стали волонтери – небайдужі люди, які намагаються допомогти постраждалим від війни. Але волонтерський ресурс є обмеженим, більшість людей, хто допомагав у перші місяці, були змушені повернутись до своєї звичної роботи, волонтерська допомога майже перестала надаватись, окрім безпосередньо первинного прийому на вокзалах і в таборах біженців.

Згодом вся інформація, яку так потребували біженці, з'явилася в соціальних мережах. Зазвичай це Telegram-канали або сторінки на Facebook. Великою незручністю є те, що це величезний потік інформації, який зазвичай неупорядкований, з яким дуже важко розібратися та зрозуміти в якій послідовності і що саме потрібно робити.

З точки зору користувача, волонтери можуть надати допомогу у наступних питаннях:

1. Подача документів до Міграційної служби округу, тобто подача заяви на тимчасовий захист за Параграфом 24 німецького законодавства (§24 AufenthG). Людина повинна отримати термін в Міграційну службу, прибути без запізнь та мати при собі: закордонний або внутрішній паспорт, заяву на вид на проживання (ВНП) та фото на документи розміром 3x4. Після подачі усіх документів, на період очікування біометричної пластикової картки ВНП, людина отримує Fiktionsbescheinigung (фікційне посвідчення) зі строком дії 6 місяців.

2. Подача документів до Jobcenter округу, для отримання грошей на проживання як безробітна особа, що проживає в Німеччині. В перелік необхідних документів входить: заповнена анкета, яка приходить поштою від Jobcenter, копія паспорту, паспорти або свідоцтво про народження дітей (якщо такі є), копії атестатів про навчання або дипломів (якщо такі є), копії фікційних посвідчень (Fiktionsbescheinigung), копії прописки, копії посвідчень інваліда (якщо такі є). В анкеті потрібно вказати страхову компанію, в якій людина бажає бути застрахована або додати копію вже оформленої картки медичного страхування. Потрібно вказати номер картки німецького банку, на яку людина бажає отримувати виплати. Також важливо пам'ятати, що в анкеті потрібно вказувати правдиву інформацію для уникнення проблем при подальшій перевірці.

3. Подача заяви на отримання медичного страхування. Користувач обирає з переліку компаній медичного страхування, враховуючи послуги, що вони надають, та відсоток, який вони покривають при лікуванні різних хвороб. До переліку документів для отримання картки медичного страхування входять: копія прописки, копія Fiktionsbescheinigung та фото для документів розміром 3x4. Цей пакет документів потрібно відправити поштою, E-Mail або особисто принести до філіалу обраної страхової компанії. Але існує й інший варіант дій, легший, але набагато довший – людина може вказати назву обраної страхової компанії в анкеті для Jobcenter, тоді працівники цієї інстанції повинні будуть самостійно відправляти запит з приводу оформлення картки медичного страхування.

4. Довідка для водіїв. Згідно з німецьким законодавством, авто з іноземними номерними знаками має право безперешкодно знаходитись на території Німеччини не більше 6 місяців, але для українців цей термін було подовжено до одного року. Також український водій має право подати заяву про перехід на німецьку систему реєстрації і до закінчення річного періоду. Для цього потрібно мати наступний пакет документів: попередні документи на іноземні транспортні засоби та номерні знаки (будуть конфісковані); свідоцтво про митне оформлення; техпаспорт для транспортних засобів (формату ЕС); електронне підтвердження страхування; підписаний дозвіл на автоматичне зняття податку на транспортний засіб з вашого банківського рахунку; паспорт або посвідчення особи (zareєстроване в Німеччині).

5. Допомога з пошуком житла. Користувач отримує перелік таборів, що приймають людей з вулиці, так звані «табори первинного розташування», та інформацію про можливість пошуку власного житла. В цей пункт входить надання списку дозволеної квадратури та ціни квартири з розрахунку на кількість осіб, приклади сайтів пошуку житла в Німеччині та допомога складання тексту-розсилки при самостійному пошуку житла. При самостійному пошуку житла, людина повинна звірятися з дозволеними нормами по ціні та квадратурі від Jobcenter, адже доки особа зареєстрована як безробітна, усі витрати на житло (окрім електроенергії та води) сплачує ця інстанція. Після того, як житло буде знайдено, людина повинна відправити план квартири або дому та контракт з орендодавцем на узгодження до Jobcenter.

6. Інформація про безкоштовні або соціальні, тобто дешевші, магазини одягу та продуктів харчування. Також користувач має дізнатися про благодійні організації, що допомагають українцям в різних сферах інтеграції. Майже в кожному місті існує соціальний магазин харчових продуктів для безробітних, де люди можуть придбати їжу за дуже малі кошти. Такі магазини мають назву Tafel та для їх відвідування потрібно принести документи з Jobcenter, що підтверджують малозабезпеченість особи.

7. Допомога пошуку ліпших шкіл для вивчення німецької мови – інтеграційних курсів. Користувач має отримати список найближчих шкіл з інтеграції, терміни навчання в кожній школі та умови. Слід зауважити, що інтеграційні курси призначені для людей від 18 до 60 років. Діти, молодші 18 років, за німецьким законодавством зобов'язані відвідувати загальноосвітні установи. Люди старші 60 років вважаються пенсіонерами та можуть не відвідувати інтеграційні курси.

8. Користувач може отримати інформацію про знижки на вхідні білети для українців в музеї, театри, на різні культурно-розважальні заходи, довідку про оформлення картки Kulturpass для родин та самотніх людей.

Щоб надати можливість спілкування з людьми, які мають змогу допомогти, – волонтерами, а також знаходити достовірну та надійну інформацію самостійно, було прийнято рішення розробки вебдодатку із простим і зручним у використанні інструменту для допомоги тимчасово переміщеним особам з України у Німеччині.

Оскільки даний проект є інформаційно-довідковою системою, тому ключовим моментом у процесі розробки проекту є збір і опрацювання різних вимог: функціональних архітектурних вимог, вимог до даних, бізнес-вимог та вимог до організаційної діяльності даних [4].

Розроблений вебдодаток є клієнт-серверним, який надає можливість пошуку інформації для людей, що прибули до Німеччини в пошуках прихистку, з метою підвищення швидкості пошуку відповідей та надійності інформації. Слід відмітити доступність системи з будь-якого пристрою, що має підключення до Інтернету, та можливість збереження та обробки даних про користувачів, їх запитань та проблем, з якими стикаються найчастіше [5].

Вхідні дані є різноманітними: розклади робіт, координати на картах, новинні пости, тексти законів та підзаконних актів України та Німеччини.

Існують різні способи збору даних до проекту. Серед найпоширеніших методів збору вхідної інформації є наступні: аналіз даних; інтерв'ювання; анкетування; робота у «полях»; мозковий штурм; бенчмаркінг.

Використання інтерв'ювання, анкетування, мозкового штурму та бенчмаркінгу дуже ускладнено в ситуації з даними, необхідними біженцям, тому що самі користувачі йдуть на контакт неохоче, вони не хочуть витратити час на анкети і не довіряють інтерв'юерам. В комерційних проектах ситуація компенсується можливістю заохочення аудиторії та безпосереднього впливу на них комерційного бренду через соцмережі, в яких вже сформована цільова аудиторія. Більше того, у фокус групи даного проекту нема спільних інтересів, цінностей, задач, поглядів, окрім статусу захисту. Основним механізмом в такому випадку стає аналіз даних, тому що різноманітні за форматом, мовою та джерелами дані потрібно систематизувати та приводити до спільного формату чи декількох форматів, стандартизувати взаємодію із ними. Для даного проекту важливо враховувати особливості процесів та життєвих ситуацій, в яких додаток використовується. Також надважливим є оновлення динамічної інформації, доступні слоти на запис до державних установ Німеччини і Україні або набір вимог до перетину кордону України у різних країнах транзиту, послідовність дій в залежності від країни транзиту, транспортні маршрути, інструкції щодо побудови таких маршрутів. Така необхідність надавати інформацію одразу у кількох структурованих форматів вимагає вкрай уважного підходу до користувацького досвіду [6, 7]. Іншим надважливим аспектом у побудові додатків такого типу є те, що візуальний дизайн, а також дизайн структури та архітектури додатку, повинен базуватись на даних, які відіграють головну роль, а також бути обумовленим даними про поведінку користувачів, корисність та доступність інформації для кінцевого користувача, які збираються в процесі розробки, тестування та повноцінного використання даного продукту [8].

Вихідними даними є: інформація, отримана за пошуковим запитом; повідомлення користувачів про знайдені варіанти житла; перелік поширених запитань; перелік пропонованих послуг.

Вихідні дані і методика взаємодії користувача з ними спирається на основа «економного» користувацького досвіду (lean UX) [9].

Для розробки веборієнтованих застосунків використовують багато мов програмування, це PHP [10], Python [11], Java [12], Ruby [13] та інші. Різницею в використанні цих мов є наявність фреймворків для деяких з них та самостійність для інших. Фреймворки застосовуються для спрощення підтримки та написання технічно складних та багатофункціональних вебпроектів, серед них найвідоміші це Laravel [14, 15], React, Vue.js, Django та інші. Окрім використання фреймворків при створенні вебдодатку можуть використовуватися бази даних, такі як MySQL [11], PostgreSQL і MongoDB [13].

Для створення вебдодатку були використані сучасні технології та програмні засоби, включаючи фреймворк Laravel, базу даних MySQL, HTML/CSS та мови програмування PHP, JavaScript.

Серед методологій розробки, які використовуються до проектів такого типу, слід зазначити інкрементну, ітераційну та гнучку моделі. Кожна з цих методологій передбачає розробку продукту у вигляді ітерацій, але вони відрізняються своїми підходами до цих ітерацій. Інкрементна модель забезпечує послідовне доповнення проекту, в той час як ітераційна модель дозволяє зосередитися на розробці нового функціоналу у кожній ітерації. Обидва підходи дають змогу ефективно розробляти програмне забезпечення з врахуванням потреб користувачів та змін у вимогах проекту [16]. Але найбільш раціонально у даному випадку використовувати гнучку модель, яка передбачає короткі ітерації, що називаються спринтами. Кожен спринт має фіксовану тривалість, під час якої виконуються задачі, випробовуються продукти та додаються нові функціональні можливості. Вона є найоптимальнішою моделлю для розробки цього проекту, оскільки виконання роботи за спринтами дозволяє швидко адаптуватися до змін у вимогах або вирішувати проблеми, що виникають під час розробки [17].

На рис. 1 наведена схема взаємодії модулів вебдодатку інформаційної системи для біженців. Система складається з двох основних ролей: користувач та адміністратор. Кожна з них відрізняється здебільшого правом доступу до окремих елементів сторінок, які зумовлені можливістю впливати на ці елементи користувачам з різним рівнем доступу. На відміну від адміністратора, користувач не має можливості додавати нові пости, поширені запитання та відповіді, локації, а також він не може видалити ці елементи і чужі запити. Проте він має можливість створювати та видалити свої запити. Усі користувачі мають право створювати теми на форумі та писати повідомлення в них. Адміністратор також має можливість створювати нові пости, поширені запитання та відповіді, локації, а також видалити будь-який запит.

Архітектура системи побудована на базі клієнт-серверної архітектури з використанням REST API, який використовується для забезпечення взаємодії між клієнтською та серверною частинами додатку. Використовуючи REST API, клієнт може звертатись до сервера з запитом та отримувати відповіді у форматі JSON. Це дозволяє забезпечити масштабованість та гнучкість системи, а також підвищує її безпеку та надійність.

На рис. 2 можна побачити діаграму розгортання, яка графічно демонструє вигляд цієї архітектури. На ній зображена система, яка складається з таких компонентів: клієнтська частина, яка забезпечує інтерфейс для користувачів та взаємодіє з сервером через REST API; серверна частина на Laravel, яка приймає та обробляє запити клієнта через REST API, взаємодіє з базою даних MySQL, обробляє бізнес-логіку та повертає відповіді клієнту; база даних MySQL, де зберігаються дані про користувачів, їхні дії, додаткові налаштування та інші потрібні дані.

На рис. 3 наведено основну сторінку з постами. Вона має адаптивну верстку під будь-які розміри екрану. Для адміністратора ця сторінка трохи відрізняється та має розділ додавання посту.

Сама сторінка посту виглядає однаково для обох користувачів, окрім кнопки видалення посту в адміністратора. Для пошуку відповіді на поширені запитання вебдодаток пропонує скористатися сторінкою з переліком всіх поширених запитань та відповідями на них (FAQ).

На сторінці Location розташовані посилання на місця розташування таборів первинного розміщення, соціальних магазинів тощо. Для адміністратора, на відміну від користувача, на сторінці присутня можливість додати нову локацію.

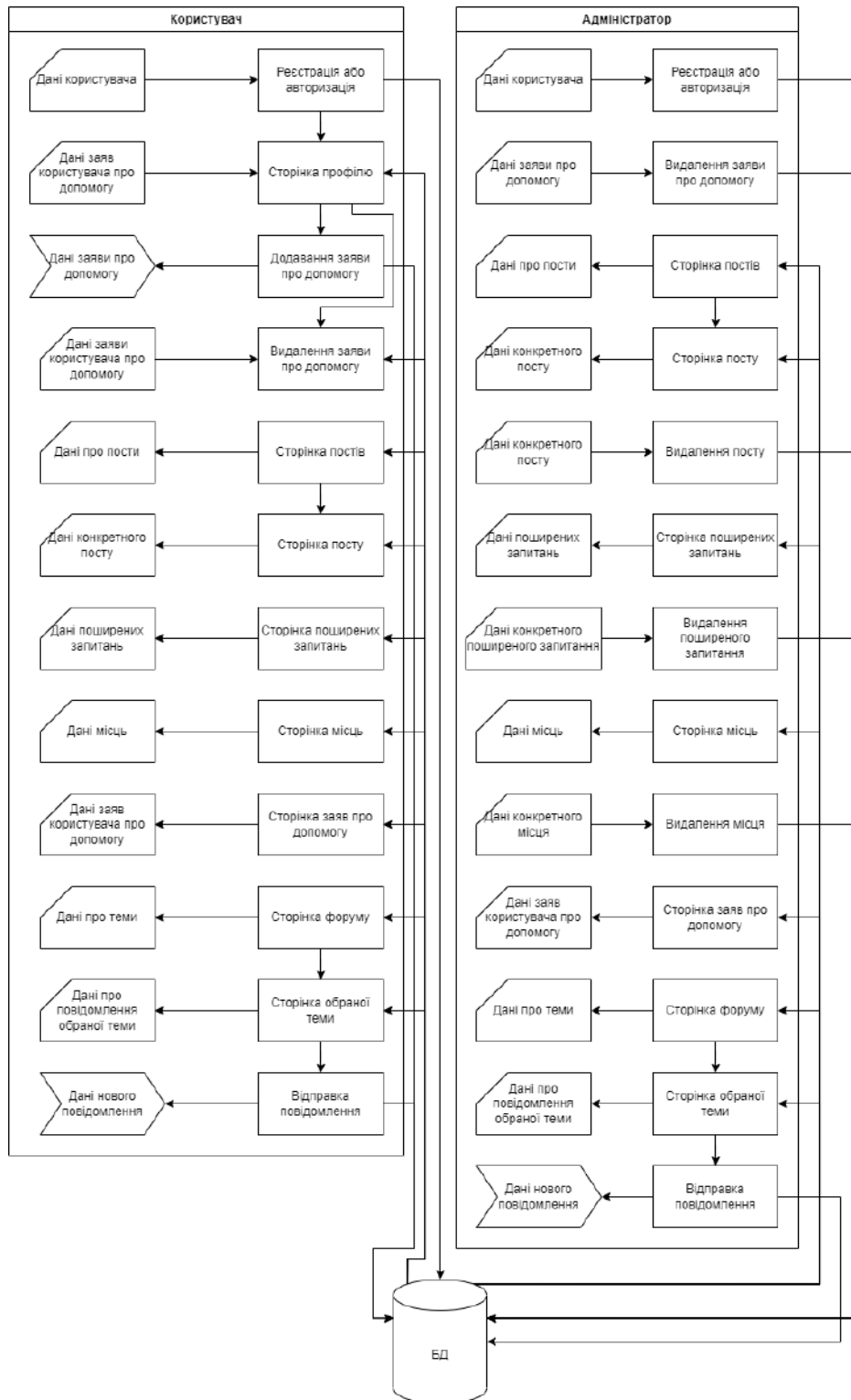


Рис. 1 – Схема взаємодії програмних модулів

На сторінці Appeals, користувачі можуть залишити свій запит про допомогу в тому чи іншому питанні. Ця сторінка відрізняється для користувача та адміністратора лише присутністю кнопки «Видалити» для адміністраторів.

Сторінка з форумом для спілкування користувачів та адміністрації сайту виглядає однаково для обох сторін та майже не відрізняється функціоналом. Але адміністратор може видалити вже існуючі теми для обговорень.

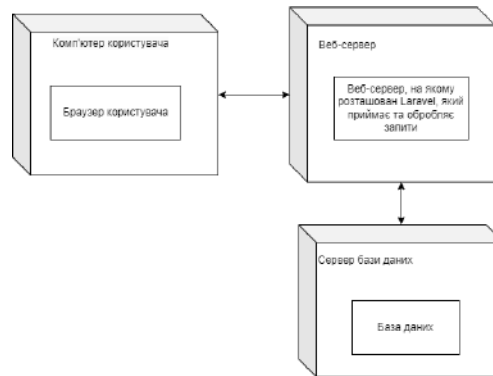


Рис. 2 – Діаграма розгортання

Якщо користувачу потрібно виправити ту чи іншу інформацію про себе в профілі, він може скористатися функцією редагування профілю. Для використання повного функціоналу вебдодатку користувачу бажано зареєструватися на сайті. Якщо користувач використовує вебдодаток не вперше та вже має власний обліковий запис, потрібно перейти до вікна авторизації.

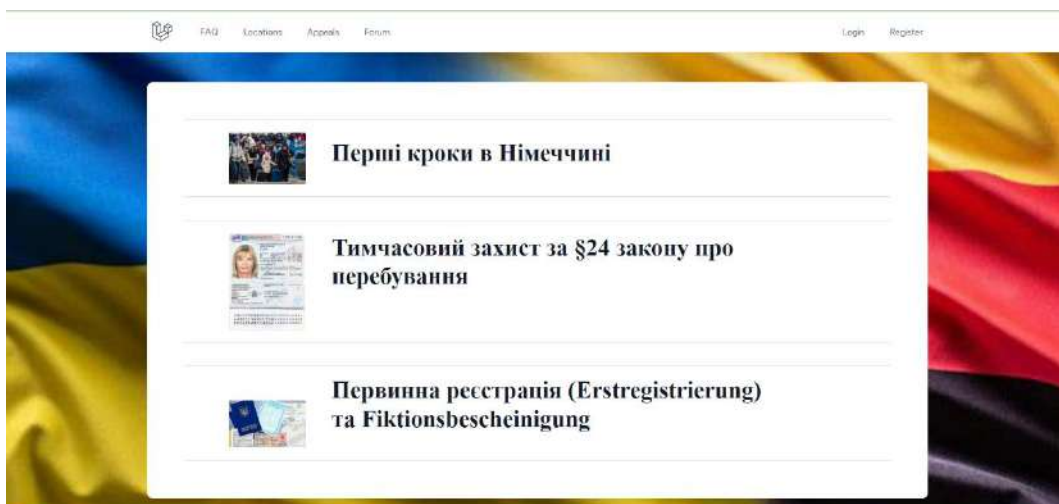


Рис. 3 – Головна сторінка вебдодатку

Даний вебдодаток було впроваджено волонтерами у федеральній землі Баден-Вюртемберг. Його використання значно полегшило процес інтеграції громадян України.

Висновки

1. Було створено вебдодаток для допомоги тимчасово переміщеним особам у Німеччині, який забезпечив ефективний засіб надання швидкого доступу до потрібної інформації біженцям.

2. Створений проект дозволяє швидко знайти відповіді на питання: куди звернутися при першому прибутті у Німеччину, які документи потрібно подавати до Jobcenter, де знайти табори первинного розміщення, які існують компанії медичного страхування, з чого і де краще починати пошук житла, надає можливість спілкуватися з адміністраторами та іншими користувачами в режимі форуму, залишити запит про допомогу. Окремою сторінкою виділені запитання, що ставлять частіше за все.

3. Рекомендовано продовження роботи над розвитком проекту. Постійне додавання нового функціоналу сприяє популярності у використанні серед користувачів, а також підвищенню якості подачі інформації, можливості зворотного зв'язку, а також підкреслює важливість інформаційних технологій та їх роль в сучасному світі.

Перелік використаних джерел:

1. Germany4Ukraine – hilfe portal: урядовий портал допомоги українським біженцям у Німеччині. URL: <https://www.germany4ukraine.de/hilfeportal-ua> (дата звернення: 20.05.2023).
2. UKR-DIM: портал для українських переселенців за кордоном. URL: <https://ukr-dim.de/refugees> (дата звернення: 20.05.2023).
3. Federal Office for Migration and Refugees – BAMF. URL: https://www.bamf.de/EN/Startseite/startseite_node.html (дата звернення: 22.06.2023).
4. Wiegers K. *Software requirements (developer best practices)*. 3d ed. New York : Microsoft Press, 2013. 670 p.
5. *The Basics of User Experience Design* / by ed. M. Soegaard. 2020. 112 p.
6. *Psychology of Interaction Design*. URL: https://www.interaction-design.org/courses/psychology-of-interaction-design-the-ultimate-guide?utm_source=ebook&utm_medium=chapter-end&utm_campaign=basics-of-ux-design-2017 (дата звернення 28.07.2023).
7. King R., Churchill E.F., Tan C. *Designing with Data*. Sevastopol : O'Reilly Media, 2017. 339 p.
8. Lang J., Howell E. *Researching UX: User Research*. Melbourne : SitePoint, 2017. 203 p.
9. Gothelf J., Seiden J. *Lean UX*. Sevastopol : O'Reilly Media, 2021. 257 p.
10. Mann E. *PHP Cookbook*. Sevastopol : O'Reilly Media, 2023. 658 p.
11. Ramalho L. *Fluet Python*. 2nd Edition. Sevastopol : O'Reilly Media, 2022. 850 p.
12. Salvanos A. *Professionell entwickeln mit Java EE 8*. Bonn : Rheinwerk Computing, 2018. 505 p.
13. Thomas D., Fowler Ch., Hunt A. *Programming Ruby: The Pragmatic Programmers' Guide*. Sevastopol : Pragmatic Bookshelf, 2020. 824 p.
14. Olsen R. *Eloquent Ruby*. Boston : Addison-Wesley Professional, 2011. 442 p.
15. *Blade Templates – Laravel 10.x – The PHP Framework*. URL: <https://laravel.com/docs/10.x/blade> (дата звернення: 04.09.2023).
16. Stelman A., Greene J. *Learning Agile: Understanding Scrum, XP, Lean, and Kanban*. Sevastopol : O'Reilly and Associates, 2014. 417 p.
17. Loeffler M. *Improving Agile Retrospectives*. London : Pearson Education, Inc., 2018. 353 p.

References:

1. Germany4Ukraine – hilfe portal: uriadovyi portal dopomohy ukrainskym bizhentsiam u Nimechchyni (Germany4Ukraine – hilfe portal: a government portal to help Ukrainian refugees in Germany) [Online]. Available: <https://www.germany4ukraine.de/hilfeportal-ua>. Accessed on: May 20, 2023.
2. UKR-DIM: portal dlia ukrainskykh pereselentsiv za kordonom (UKR-DIM: a portal for Ukrainian immigrants abroad) [Online]. Available: <https://ukr-dim.de/refugees>. Accessed on: May 20, 2023. (Ukr.)
3. Federal Office for Migration and Refugees – BAMF [Online]. Available: https://www.bamf.de/EN/Startseite/startseite_node.html. Accessed on: June 22, 2023.
4. K. Wiegers, *Software requirements (developer best practices)*, 3d ed. New York, USA: Microsoft Press Publ. 2013
5. *The Basics of User Experience Design*, M. Soegaard, Ed., 2020.
6. *Psychology of Interaction Design* [Online]. Available: https://www.interaction-design.org/courses/psychology-of-interaction-design-the-ultimate-guide?utm_source=ebook&utm_medium=chapter-end&utm_campaign=basics-of-ux-design-2017. Accessed on: July 28, 2023.
7. R. King, E.F. Churchill, and C. Tan, *Designing with Data*. Sevastopol, USA: O'Reilly Media Publ., 2017.
8. J. Lang, and E. Howell, *Researching UX: User Research*. Melbourne, Australia: SitePoint Publ., 2017.
9. J. Gothelf, and J. Seiden, *Lean UX*. Sevastopol, USA: O'Reilly Media Publ., 2021.
10. E. Mann, *PHP Cookbook*. Sevastopol, USA: O'Reilly Media Publ., 2023.
11. L. Ramalho, *Fluet Python*, 2nd Ed. Sevastopol, USA: O'Reilly Media Publ., 2022.
12. A. Salvanos, *Professionell entwickeln mit Java EE 8*. Bonn, Germany: Rheinwerk Computing Publ., 2018.

13. D. Thomas, Ch. Fowler, and A. Hunt, *Programming Ruby: The Pragmatic Programmers' Guide*. Sebastopol, USA: Pragmatic Bookshelf Publ., 2020.
14. R. Olsen, *Eloquent Ruby*. Boston, USA: Addison-Wesley Professional Publ., 2011.
15. Blade Templates – Laravel 10.x – The PHP Framework [Online]. Available: <https://laravel.com/docs/10.x/blade>. Accessed on: September 04, 2023.
16. A. Stellman, and J. Greene, *Learning Agile: Understanding Scrum, XP, Lean, and Kanban*. Sebastopol, USA: O'Reilly and Associates Publ., 2014.
17. M. Loeffler, *Improving Agile Retrospectives*. London, UK: Pearson Education Publ., 2018.

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

Стаття надійшла 21.08.2023

Стаття прийнята 17.09.2023

УДК 004.89

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.299984

© Проніна О.І.¹, Айнагоз А.В.²

СИСТЕМА ПОШУКУ ОДНАКОВИХ ГЕОМЕТРІЙ ПРИ ПОБУДОВІ 3-D МОДЕЛЕЙ

У статті розглядається система пошуку однакових геометрій при побудові 3D-моделей. Використання алгоритмів пошуку схожих 3D-моделей водяних структур може відігравати ключову роль у різних галузях, включаючи виробничі процеси, де потрібно швидко ідентифікувати та класифікувати водяні компоненти. У цій статті розроблено ефективну модель на основі оптимізованого алгоритму порівняння водяних структур, що дозволяє точно визначати геометричні особливості без потреби у складній попередній обробці. Запропонована модель досягла високої точності в розпізнаванні схожих 3D-моделей, ефективно працюючи навіть коли використовується сцена з багатьма полігонами. Ця модель може бути використана для ідентифікації в режимі реального часу як для окремих 3D-об'єктів, так і для комплексних 3D-сцен. У цій статті детально розглядається система пошуку однакових моделей та її важливість у різних галузях, включаючи виробничі процеси, де потрібно швидко ідентифікувати та класифікувати геометрії для їх призначення. Однак, ця система не обходиться без математичної підтримки, і метою даної статті є побудова математичної моделі для оптимізації процесу пошуку однакових моделей. Важливим аспектом цього дослідження є розробка ефективної математичної моделі на основі оптимізованого алгоритму пошуку та порівняння, яка дозволяє точно визначати геометричні структури. Ця модель має великий потенціал у роботі зі схожими 3D-моделями, навіть в умовах, коли у проєкті використовується багато геометрії. Робота над оптимізацією алгоритмів порівняння є постійним завданням для науковців та інженерів, оскільки вона дозволяє покращувати якість та продуктивність систем пошуку. Результати цього дослідження можуть бути корисними для широкого спектру застосувань, де важлива висока точність і швидкість обробки даних. Запропонована модель показує високу точність в розпізнаванні схожих 3D-моделей, що є важливим досягненням в моделюванні. Вона може бути використана для ідентифікації в режимі реального часу, незалежно від того, чи мова йде про окремі 3D-об'єкти, чи про складні 3D-сцени, реконструйовані з послідовностей зображень або відео. Таким чином, ця стаття вкладається в загальний контекст

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-7085-8027, pronina.lelka@gmail.com

² магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

досліджень у цій області і відкриває нові можливості для реалізації систем пошуку однакових моделей.

Ключові слова: 3D об'єкти, однакові геометрії, 3D моделі, вектори, система пошуку.

O. Pronina, A. Aynahoz. A system for finding identical geometries when building 3-D models. In today's fast-paced world of technology, where innovation plays a crucial role in our daily lives, the importance of search engines for identical models cannot be overstated. Every day, technological progress is becoming an integral part of our existence, penetrating various aspects of our lives. In this context, the search and identification of identical or similar 3D models become particularly relevant and become an integral part of innovative technologies. This article is an in-depth study in the field of creating and describing a mathematical model to search for similar 3D models. Developed using advanced comparison algorithms, this model has enormous potential and can be used in a variety of fields. It is important to emphasize that it is not limited to just one area of application, but finds its application in many areas of human activity. The application of such algorithms is important in various fields, including automated manufacturing, where accuracy and speed of component identification and classification are critical. They also find use in archaeology, where they help in the analysis and study of artifacts and structures. Architecture is also seeing great benefit from these innovations, allowing for more complex and detailed 3D models to be created for design and visualization. The new approach presented in the paper is based on an optimized matching algorithm that enables accurate recognition of geometric structures associated with 3D models without complex data pre-processing or image enhancement. This is a significant step forward in improving the efficiency and accuracy of identifying similar 3D models, even in low-resolution images. However, the application of this model is not limited to these areas. Its integration into real-time systems allows for the identification and classification of both individual 3D objects and complex 3D scenes created from image or video sequences. This is of great importance for the development of virtual and augmented reality technologies, where a high degree of detail and identification is necessary to create captivating and realistic visual effects. Thus, the presented mathematical model and the corresponding software open up enormous prospects for us in various fields. This is an important step forward in the development of technologies related to computer vision and image processing, as well as in the field of virtual and augmented reality, promoting progress and innovation.

Key words: 3D objects, identical geometries, 3D models, vectors, search engine.

Постановка проблеми. Однією з важливих проблем при вилученні 3D-моделей є представлення моделей у дескрипторах. Дескриптори [1] точно та ефективно описують 3D-модель для підтримки класифікації моделей, побудови індексів та зіставлення подібностей. Дескриптори 3D-моделей можна розділити на чотири категорії: на основі геометрії [2], на основі статистичного аналізу [3], на основі топології та проєктивні дескриптори на основі подання. Для дескрипторів 3D-моделі на основі геометрії – 3D-модель розбивається на безліч сіток, а потім особливості 3D-моделі витягуються різними математичними перетвореннями ґрид-моделі.

Дескриптори, засновані на статистичному аналізі, пропонують інший підхід, зосереджуючись на аналізі статистичних даних, пов'язаних із 3D-моделлю. Це може включати вивчення розподілу точок, поверхневої площі, об'єму та інших кількісних характеристик. Такий підхід дозволяє виявити приховані візерунки та тенденції, які можуть бути неочевидні за більш традиційних методів аналізу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Існує ряд наукових робіт, в яких розглядається пошук однакових 3D-об'єктів.

В роботі [4] автор представляє свій метод, який робить процес обробки моделей, він розділений на три етапи. На першому етапі 3D-моделі спочатку перетворюються на 2D-проєкції, а потім ці 2D-проєкційні види використовуються для навчання CNN [5]. Запропоновано проєкційний метод для генерації видів. На іншому етапі 3D-моделі спочатку перетворюються на 2D-проєкційні види з використанням того ж методу проєкції, який використовується при навчанні.

Потім ці уявлення вибираються запропонованим методом на основі k -середніх. На третьому кроку вхідними даними може бути зображення або 3D-модель. Якщо вхідними даними є зображення, то класифікація та витяг виконуються безпосередньо.

У статті [6] описано метод розпізнавання 3D-об'єкта за допомогою технології машинного навчання Shanahan and Dai [7]. Авторами було проведено багато експериментів з розпізнавання об'єктів, але більшість з них включали в себе виявлення об'єкта з використанням 2D-піксельних даних, отриманих із зображень, згенерованих камерою. Для 3D-об'єктів у цій статті використовувався стандарт X3D. Спочатку зчитується набір 3D-даних. Потім 3D-файли аналізуються для отримання необхідної інформації. Далі попередня обробка даних, яка виконується для зіставлення форматів даних для машинного навчання [8]. Наступний етап – це визначення моделі для навчання, яка буде ініціалізувати модель і потім набір 3D-даних навчається за допомогою моделі машинного навчання. Останнім кроком є прогнозування та оцінка об'єкта за допомогою навченої моделі.

У наступній статті [9] автори роблять швидкий і простий алгоритм пошуку 3D-об'єктів зі схожими формами за допомогою Ray Cast (RCVS) [10]. Далі автори описують як працює принцип RCVS, а саме, модель поміщається всередину ікосаедрічного сферичного багатогранника, промені відкидаються від його багатокутників до поверхні моделі та їх довжини збираються до списків. Списки цих довжин сортуються та порівнюються між собою. Сортування виключає обертання, оскільки для однакових або близьких за геометрією моделей довжини променів будуть збігатися в межах помилки, але відрізнятися по порядку.

Можна сказати, що алгоритм відмінно працює для пошуку близьких за геометрією об'єктів, наприклад, високо полігональних та низько полігональних варіантів однієї і тієї ж моделі, іноді добре справляється з близькими за змістом об'єктами, наприклад, з чайниками чи гітарами різної форми. Для уточнення пошуку слід враховувати розмір і/або поворот об'єктів. На основі результатів експериментів цієї роботи X3D підходить для розпізнавання 3D-об'єктів за допомогою машинного навчання.

V3Geo – це хмарне сховище для публікації віртуальних 3D-моделей у галузі геолого-геофізичних досліджень [11]. Система дозволяє зберігати, шукати та візуалізувати сітчасті моделі, зазвичай отримані за допомогою таких методів, як фотограмметрія та лазерне сканування. Моделі розбиті на плитки, щоб забезпечити ефективну потокову передачу через Інтернет. Веб-переглядач дозволяє інтерактивно досліджувати 3D-моделі без необхідності встановлення спеціального програмного забезпечення.

V3Geo дозволяє створювати дуже великі моделі, що складаються з декількох секцій, і включає додаткові кулі інтерпретації.

У статті [12] автор описує систему CityGML яка представляє ієрархічну інформацію. Ієрархічна інформація містить взаємозв'язки між поверхнями у 3D-моделях. В даний час є багато методів редагування типових 3D-моделей. Однак збереження семантичної та ієрархічної інформації за допомогою процесу редагування підтримується лише конкретними програмами, які тісно пов'язані з базовою моделлю даних.

Мета дослідження. Метою роботи є підвищення ефективності пошуку однакових 3D-моделей за рахунок інформаційної технології, що розроблена.

Виклад основного матеріалу.

У цієї роботи було побудовано власну систему пошуку однакових 3D-моделей.

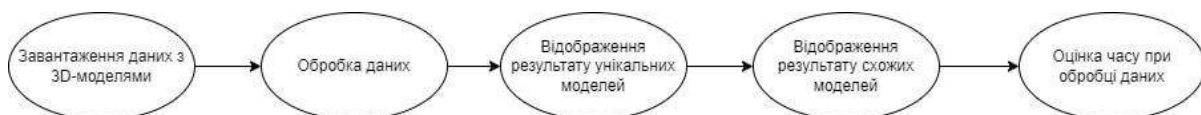


Рис. 1 – Процес роботи системи для пошуку однакових моделей

Процес обробки складається з наступних етапів, спочатку зчитуються дані 3D моделей, а потім використовуючи векторні координати, відтворюються всі моделі притаманні на сцені, і робиться порівняльний аналіз для виявлення унікальності моделей та виявлення схожості.

Після обробки даних, використовуючи модуль Jupyter Anaconda, можна відтворити векторну координатну площину в об'ємний графік і виводити явну різницю між моделями.

Далі описано методологію, як саме працює порівняння вершин. Цей метод виконує порівняння двох мешів (3D-моделей) на ідентичність. Порівняння включає кілька етапів, зокрема перевірку кількості вершин, ребер та граней, а також порівняння координат кожної вершини в парах мешів.

Визначення рівності векторів наведено у формулі 1:

$$E(V_1, V_2) = (V_{1.x} = V_{2.x}) \wedge (V_{1.y} = V_{2.y}) \wedge (V_{1.z} = V_{2.z}), \quad (1)$$

де E означає «Рівність»;

V_1, V_2 – вектори, що порівнюються;

$V_{1.x}, V_{2.x}, V_{1.y}, V_{2.y}, V_{1.z}, V_{2.z}$ – координати першого та іншого векторів відповідно.

Порівняння двох мешів наведено у формулі 2:

$$I = (\text{len}(A) = \text{len}(B)) \wedge \bigwedge_{i=0}^n (A_i = B_i), \quad (2)$$

де I означає «Ідентичність»;

$\text{len}(A)$ та $\text{len}(B)$ – кількість вершин у мешах A та B;

A_i та B_i – i-ті вершини мешів A та B.

Візуалізація мешів:

$$V(M) = \bigcup_{i=1}^n (M_{i.x}, M_{i.y}, M_{i.z}), \quad (3)$$

де V – символ, що представляє візуалізацію меша;

M – міш для візуалізації;

$M_{i.x}, M_{i.y}, M_{i.z}$ – координати i-ї вершини меша M.

Алгоритм включає в себе наступні етапи. Спочатку функція створює два об'єкти `bmesh` для кожного з мешів, які надають доступ до їх геометричних даних. Далі йде перевірка, чи однакова кількість вершин, ребер та граней в обох мешах. І якщо кількість елементів співпадає, функція переходить до порівняння координат вершин мешів. Цей етап передбачає детальне порівняння координат кожної пари вершин. І коли функція повертає `True`, значить меші ідентичні, а якщо `False` то не ідентичні.

Для перевірки розробленої системи проводилося дослідження. Було протестовано кілька рівнів складності. Були взяті різні моделі з різною складністю полігонування і безліччю дублікатів моделей. На рис. 2 представлено фрагмент моделей у вигляді рисунку одного з рівнів складності. А також у таблиці 1 та на рис. 3 представлені результати проведення тестування.

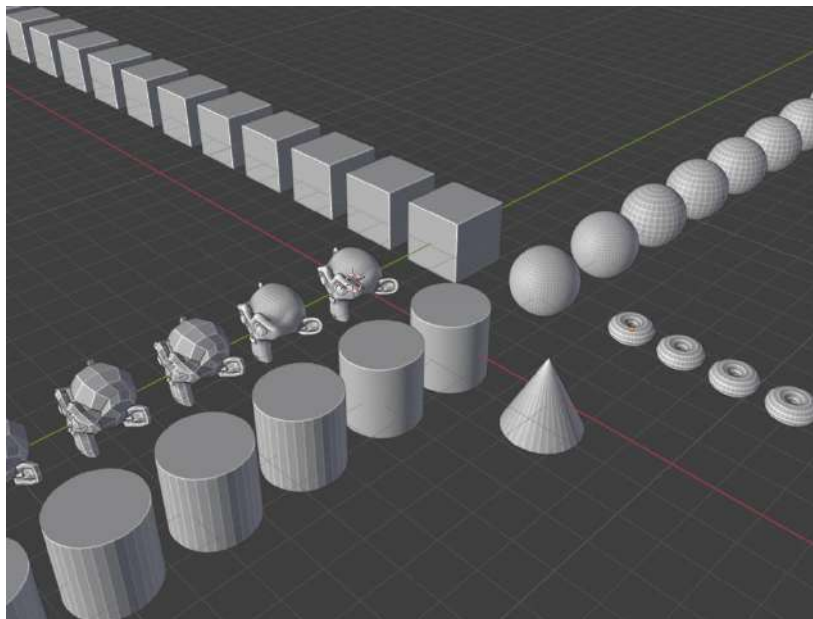


Рис. 2 – Рівень складності

Таблиця 1

Результат проведення експерименту в системі, що розроблена

Складність	Відсоток схожості	Витрачений час
Рівень 1	0%	1.04 секунд
Рівень 2	21,22%	5.55 секунд
Рівень 3	38,56%	6.58 секунд
Рівень 4	48,66%	15.12 секунд
Рівень 5	66,09%	66.29 секунд

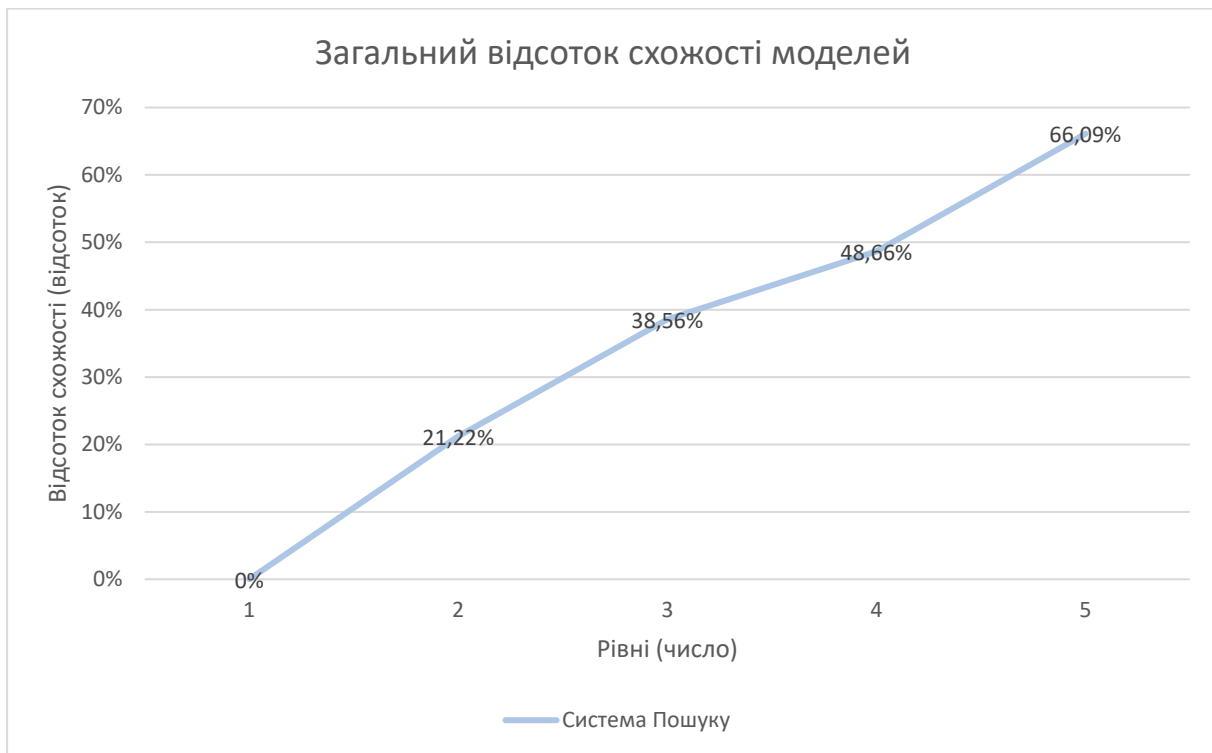


Рис. 3 – Відсоток схожості моделей за рівнями

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що результати тестування показують достатню достовірність у пошуку схожості 3D-моделей. Головною перевагою розробленої системи можна зазначити наявність візуального представлення різниці між моделями, за допомогою якого розробник може побачити, які моделі є різними, а які моделі є схожими. Що в свою чергу дозволяє економити час при розробці моделей та прискорює загальний час роботи з проектами.

Висновки

Розроблена математична модель, яка лягла в основу системи для пошуку однакових 3D-моделей, пройшла всебічне тестування. Застосування розробленої системи дозволяє знизити рівень надмірної інформації та скоротити час, який потрібен для первинної обробки та порівняння 3D-моделей. Однією з головних переваг розробленої системи є зменшення ймовірності припущення помилок та економія часу, що витрачається на аналіз моделей.

Крім того, розроблена математична модель може бути використана для подальшого розвитку технологій управління цифровими активами. Система, що була розроблена на основі побудованої математичної моделі, дозволяє користувачам ефективно каталогізувати та упорядковувати великі обсяги 3D-моделей, що особливо важливо у світі, де обсяг цифрового контенту постійно зростає. Така організація даних сприяє кращому використанню ресурсів і збільшує продуктивність процесу проектування та виробництва.

За допомогою системи, що була розроблена, можна проводити аналіз робіт студентів, що навчаються 3D-моделюванню та бути використана професіоналами 3D-моделювання. Таким чином, система сприяє підвищенню ефективності та точності у роботі з 3D-моделями.

Перелік використаних джерел:

1. Yang X., Liang T., Lu S. Monocular 3D target detection model based on differential neural network architecture search. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2493/1/012011>.
2. Blender. URL: <https://www.blender.org> (дата звернення: 03.06.2023).
3. 3Ds Max, AutoCad. URL: <https://www.autodesk.com> (дата звернення: 15.07.2023).
4. ZBrush, Cinema4D. URL: <https://www.maxon.net/en/zbrush> (дата звернення: 23.06.2023).
5. Daz 3D. URL: <https://www.daz3d.com> (дата звернення: 23.06.2023).
6. MeshMixer. URL: <https://www.meshmixer.com> (дата звернення: 13.07.2023).
7. BIAS-3D: Brain inspired attentional search model fashioned after what and where/how pathways for target search in 3D environment / Kumari S., Amala V., Nivethithan M., Chakravarthy S. *Frontiers in Computational Neuroscience*. 2022. Vol. 16. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3389/fncom.2022.1012559>.
8. An efficient end-to-end 3D Voxel reconstruction based on neural architecture search / Y. Huang et al. 2022 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Montreal, Canada, 21-25 August 2022. Pp. 3801-3807. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICPR56361.2022.9956169>.
9. Filali Ansary T., Vandeborre J.-P., Daoudi M. (2007). 3D-Model search engine from photos. *CIVR'07: Proceedings of the 6th ACM international conference on Image and video retrieval*, Amsterdam, The Netherlands, 9-11 July 2007. Pp. 89-92. DOI: <https://doi.org/10.1145/1282280.1282293>.
10. A search engine for 3D models / T. Funkhouser et al. *ACM Transactions on Graphics*. 2003. Vol. 22. Iss. 1. Pp. 83-105. DOI: <https://doi.org/10.1145/588272.588279>.
11. Fisher M., Hanrahan P. Context-based search for 3D models. *ACM Transactions on Graphics*. 2010. Vol. 29. Iss. 6. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1145/1882261.1866204>.
12. Materials and applications of 3D printing technology in dentistry: an overview / M. Jeong, K. Radomski, D. Lopez, J. Liu, J. Lee, S. Lee. *Dentistry Journal*. 2023. Vol. 12. Iss. 1. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/dj12010001>.
13. A search engine for manufacturers using product manufacturing information (PMI) enhanced 3D model search / Angrish A., Craver B., Xu X., Starly B. *ASME 2018: 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Texas, USA, 18-22 June 2018. Vol. 3. DOI: <https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6649>.

References:

1. X. Yang, T. Liang, and S. Lu, «Monocular 3D target detection model based on differential neural network architecture search», *Journal of Physics: Conference Series*, pp. 1-5, 2023. doi: **10.1088/1742-6596/2493/1/012011**.
2. Blender [Online]. Available: <https://www.blender.org>. Accessed on: June 03, 2023.
3. 3Ds Max, AutoCad [Online]. Available: <https://www.autodesk.com>. Accessed on: July 15, 2023.
4. ZBrush, Cinema4D [Online]. Available: <https://www.maxon.net/en/zbrush>. Accessed on: June 23, 2023.
5. Daz 3D [Online]. Available: <https://www.daz3d.com>. Accessed on: June 23, 2023.
6. MeshMixer [Online]. Available: <https://www.meshmixer.com>. Accessed on: July 13, 2023.
7. S. Kumari, V. Amala, M. Nivethithan, and S. Chakravarthy, «BIAS-3D: Brain inspired attentional search model fashioned after what and where/how pathways for target search in 3D environment», *Frontiers in Computational Neuroscience*, vol. 16, pp. 1-20, 2022. doi: **10.3389/fncom.2022.1012559**.
8. Y. Huang et al., «An efficient end-to-end 3D Voxel reconstruction based on neural architecture search», in 2022 26th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Montreal, Canada, 2022, pp. 3801-3807. doi: **10.1109/ICPR56361.2022.9956169**.

9. T. Filali Ansary, J.-P. Vandeborre, and M. Daoudi, «3D-Model search engine from photos», in Proceedings of the 6th ACM International conference on Image and video retrieval CIVR'07, Amsterdam, The Netherlands, 2007, pp. 89-92. doi: [10.1145/1282280.1282293](https://doi.org/10.1145/1282280.1282293).
10. T. Funkhouser et al., «A search engine for 3D models», *ACM Transactions on Graphics*, vol. 22, iss. 1, pp. 83-105, 2003. doi: [10.1145/588272.588279](https://doi.org/10.1145/588272.588279).
11. M. Fisher, and P. Hanrahan, «Context-based search for 3D models», *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, iss. 6, pp. 1-10, 2010. doi: [10.1145/1882261.1866204](https://doi.org/10.1145/1882261.1866204).
12. M. Jeong, K. Radomski, D. Lopez, J. Liu, J. Lee, and S. Lee, «Materials and applications of 3D printing technology in dentistry: an overview», *Dentistry Journal*, vol. 12, iss. 1, pp. 1-12, 2023. doi: [10.3390/dj12010001](https://doi.org/10.3390/dj12010001).
13. A. Angrish, B. Craver, X. Xu, and B. Starly, «A search engine for manufacturers using product manufacturing information (PMI) enhanced 3D model search», in 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference ASME 2018, Texas, USA, 2018, vol. 3. doi: [10.1115/MSEC2018-6649](https://doi.org/10.1115/MSEC2018-6649).

Рецензент: Т.О. Левицька
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 17.09.2023

Стаття прийнята 20.10.2023

УДК 004.41:378

doi: [10.31498/2225-6733.47.2023.299985](https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.299985)

© Тузенко О.О.¹, Сідун Н.М.²

АВТОМАТИЗОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА SMM-ЛІДОГЕНЕРАЦІЇ В МЕСЕНДЖЕРІ TELEGRAM

В даній статті було розглянуто створення автоматизованої системи для пошуку зацікавлених користувачів – лідів – в середовищі популярного месенджера Telegram. Оскільки месенджер не є соціальною мережею, а також суттєво відрізняється за способом взаємодії від будь-якого вебсервісу, то пошук цільової аудиторії в ньому ускладнений. Головним чином він складний через відсутність будь-яких рекомендацій для користувача щодо контенту, каналів, чатів та повну відсутність стрічки новин і рекомендованих джерел контенту. В цій статті описується створення інструменту для пошуку зацікавлених користувачів у вигляді Telegram-боту, який взаємодіє з Telegram через API, а за допомогою мовних інструментів аналізує повідомлення в чаті, допомагаючи визначати дискусії на визначені теми, а саме для визначення зацікавлених у конкретних темах користувачів, необхідно аналізувати тексти дискусій у публічних чатах та визначати, які саме теми обговорюють учасники чату. Для такого аналізу необхідні інструменти аналізу природньої мови і контексту бесіди. Бот створений у наступному технологічному стеку: в якості основної мови обрано Python, за взаємодію з серверами Telegram відповідає pyTelegramBotAPI. Отримані та проаналізовані дані зберігаються у MySQL базі даних, обробка текстової інформації виконується у декілька етапів, у яких задіяні бібліотеки обробки природньої мови для мови Python та штучний інтелект, а точніше велика мовна модель ChatGPT. Даний бот збирає та аналізує інформацію, а після того надає звіт, скільки згадувань в рамках заданої адміністратором теми мали користувачі чату, саме ці користувачі є потенційними лідами. Дана інформація допомагає будувати та

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-4920-9417, tuzenkoaa@gmail.com

² асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0001-8343-1273, natalya.sidun@gmail.com

покращувати маркетингові моделі просування товарів і послуг через публікацію дописів, посилань чи повідомлень у чатах, а також визначати ступінь зацікавленості аудиторії конкретною темою у живому спілкуванні.

Ключові слова: Telegram-бот, лід, цільова аудиторія, семантичний аналіз, обробка природньої мови, Python, MySQL, ChatGPT, TelegramAPI.

O.A. Tuzenko, N.N. Sidun. Automated system of SMM lead generation in Telegram messenger. In the article the development of automated system for search of interested users, so called leads, in Telegram messenger environment. While Telegram is not a social network and is strongly different with its interaction mode to any web-service like blog, image or news board or forum, then the search of motivated target audience is a complex task. It is primarily complex because no recommendation system for content or finding new channels, chats, content sources is provided, the news and posts feed does not exist like in other social media. In current paper the process of development of a tool for searching interested users, created as a Telegram-bot, which interacts with Telegram API to gather the data and with different language tools analyses messages in the chat, helping to find discussions related to required theme. Particularly, to detect users that are potentially interested in specific themes, it is required to analyze the very texts of the discussion and detect the themes, users of the current chat discuss. Specifically for this analysis natural language tools are needed, as well as the tools that allow to process discussion's context. Bot was created in the following technologies stack: the main programming language is Python, the framework pyTelegramBotAPI is responsible for interaction with Telegram servers via API, the gathered and processed data is stored in a database based on MySQL, language processing is performed in multiple steps, in which natural language processing libraries for Python and AI particularly big language model ChatGPT are involved. The bot gathers and processes information from the chat messages and then provides a report of how many mentions in the administrator defined theme made certain chat users, these users are potential leads. This data helps to build and improve marketing models of goods and services promotion and detect the level of involvement and the degree of interest in current theme.

Key words: Telegram-bot, lead, target audience, semantic analysis, natural language processing, Python, MySQL, ChatGPT, TelegramAPI.

Постановка проблеми. У сучасному світі, коли більшість бізнес-комунікацій відбуваються в електронному вигляді, зростає значення інструментів, що забезпечують автоматизацію комунікації з клієнтами. Виникає потреба у швидкій та ефективній комунікації з мінімальною втратою часу та зусиль. Важливим каналом зв'язку бізнесу або організації з аудиторією є соціальні мережі та месенджери. У більшості соціальних мереж є стрічка рекомендації та підписок, яка дає можливість просувати матеріали відповідного до соцмережі характеру (фото, відео, тексти) серед своєї аудиторії та завдяки стрічці рекомендації залучати нову. Але Telegram, як і загалом месенджери, не має такого інструменту, тому залучати нових підписників та клієнтів можна тільки у так званий «нативний» спосіб, тобто через дискусію у чаті і приватне спілкування. У такому контексті Telegram-боти стають все більш популярними і корисними інструментами для автоматизації бізнес-процесів. За допомогою даного бота, користувачі матимуть можливість автоматично збирати інформацію про своїх потенційних клієнтів та збільшувати кількість лідів у своїй базі даних. Це не тільки значно скорочує час, необхідний для ручного збору даних, але й знижує витрати на залучення нових клієнтів, що є важливим фактором у сучасних умовах жорсткої конкуренції на ринку. Таким чином, актуальність розробки Telegram-бота для генерації лідів у текстових чатах очевидна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Текстові чати являють собою електронні комунікаційні канали, що дозволяють користувачам обмінюватись текстовою інформацією у режимі реального часу.

Текстові чати є засобом електронного спілкування, що дозволяють обмінюватися повідомленнями між користувачами. Вони використовуються в різних сферах, включаючи бізнес, освіту, медіа та особисте спілкування. В текстових чатах можна обговорювати різноманітні теми,

спілкуватися з друзями, колегами, клієнтами та іншими людьми. Вони також можуть використовуватися для розв'язання проблем та вирішення різних завдань.

Пошук лідів в Telegram [1] в текстових чатах має свої особливості, оскільки текстові чати зазвичай використовуються для особистої комунікації між користувачами і не завжди містять інформацію, яка може бути корисною для бізнесу. Однак, наявність активних і цільових аудиторій в Telegram-чатах може бути дуже корисною для бізнесу, оскільки це може допомогти залучити нових клієнтів і збільшити продажі.

Особливості пошуку лідів у текстових чатах включають використання спеціальних алгоритмів і програм, які обробляють текстову інформацію в чатах, щоб визначити потенційних клієнтів. Деякі з них можуть бути автоматично виділені як потенційні клієнти, спираючись на певні ключові слова, фрази і т.д. Серед спеціальних алгоритмів можна виділити класичний алгоритм пошуку за ключовими словами Бойера-Мура [2, 3], а також алгоритм Дейкстри [4] для дослідження соціальних графів.

Аналіз записів на форумах, у чатах та коментарях в каналах є важливим інструментом для збору відгуків та думок користувачів про певний продукт, послугу або компанію. Цей аналіз дозволяє отримати важливу інформацію про те, що сподобалось клієнтам та що їм не подобається, що потрібно поліпшити або змінити [5].

Для аналізу записів на форумах, в чатах та коментарів в каналах можна використовувати спеціальні інструменти, які дозволяють автоматично зібрати та обробити великий обсяг даних. Зокрема, це можуть бути програми для моніторингу соціальних медіа, які дозволяють відстежувати згадки про певні ключові слова або назви компанії в соціальних мережах та інших Інтернет-ресурсах.

Аналіз записів на форумах, у чатах та коментарях в каналах допомагає підвищити якість продукту чи послуги, зрозуміти потреби та очікування клієнтів, покращити комунікацію з ними та побудувати ефективніші маркетингові стратегії [6].

Загалом робота з лідами є важливою складовою будь-якого бізнесу, який прагне збільшити обсяг продажів та покращити якість обслуговування клієнтів [7].

Таким чином, бот для генерації лідів може стати потужним бізнес-інструментом для адміністраторів, які хочуть автоматизувати процес збору та обробки лідів, зменшити витрати часу та збільшити ефективність своєї роботи.

Існує потужна група рішень в середовищі Telegram, яка так чи інакше пов'язана з генерацією лідів, пошуком та адаптацією маркетингової інформації для бізнесу [8-16]. Частина з них орієнтована на пошук лідів у середовищі Інтернет за контактною інформацією та сайтах та ін., а Telegram є лише медіумом та постачальником інтерфейсу для взаємодії з програмним забезпеченням і представленням результатів [8-13]. Інші є інструментами керування чатами, їх модераторами, виконання скриптів в середовищі чатів, взаємодії з аудиторією. Вони збирають дані про користувачів, але не аналізують, про що ті спілкуються, за винятком використання стоп-слів для відслідковування мови ворожнечі і використання оцінної лексики [14,15]. Треті ж піддають аналізу поведінку користувачів і лексику, якою вони спілкуються, але з метою видокремити патерни спаму, нав'язливої реклами, а також розповсюдження рекламних матеріалів небажаного змісту [16]. Жоден з них не використовує зібрану інформацію з метою оцінки інтересів аудиторії всередині чату і пошуку потенційних лідів.

Telegram є специфічним середовищем для розповсюдження матеріалів, тому що в ньому відсутня стрічка підписок як таких, а також встановлення пріоритету показу публікацій [17]. Це ускладнює процес просування матеріалів, а також значно ускладнює пошук лідів, тому що акаунти в месенджерах здебільшого анонімні, тому сформувавши базу лідів може бути складно або неможливо. Для збору інформації про потенційних клієнтів використовуються спеціальні прийоми контролю активності в чатах та аналізу тексту чату. Останнім часом з'являються продукти, орієнтовані на текстовий аналіз «живих» чатів для пошуку лідів, найчастіше у формі додатків або чат-ботів. Більшість існуючих на ринку комерційних продуктів походять з російськомовного сегменту Інтернету, тому що месенджер Telegram є дуже популярним у російськомовному Інтернеті, набагато популярнішим ніж у західних країнах. Велика кількість користувачів Telegram проживає у країнах Південної Азії, але вони менше орієнтовані на ведення бізнесу у середовищі месенджера.

Мета дослідження – проектування та програмна реалізація автоматизованої інформаційної системи, що працює через інтерфейс Telegram-боту і забезпечує введення, зберігання та обробку інформації про лідів, пошук нових лідів у заданих чатах, та супроводження бази даних лідів між чатами.

Виклад основного матеріалу. Текстові чати зазвичай складаються з повідомлень, які відправляються між користувачами в режимі реального часу. Кожне повідомлення може включати текст, смайлики, емодзі, стікери, а також інші медіа-елементи, такі як фото, відео, аудіо-файли та інші додатки. Деякі текстові чати також можуть містити можливості для створення групових чатів, додавання нових контактів, обміну контактами та інформацією про профіль користувача, інші соціальні функції та інструменти, наприклад, створення каналів обговорення окремих тем, закріплення важливих повідомлень вгорі чату в якості довідки чи постійної об'яви, модерацію чату, виключення або призупинення можливості публікувати повідомлення для окремих користувачів.

Для ефективного пошуку лідів в текстових чатах можна використовувати інструменти для автоматизації процесу, такі як Telegram-боти, які можуть сканувати повідомлення в чатах та збирати корисну інформацію. За відсутності пріоритету показу повідомлень, медіафайлів як у самому чаті, так і у «стрічці» нових повідомлень кожного користувача, треба прийняти, що усі повідомлення у чатах та каналах показані у хронологічній послідовності їх появи. Також часто повідомлення є розрізненими, не структурованими за гілками дискусій, тому що для цього потрібно обирати тип публікації повідомлення у відповідь, а більшість користувачів так у спілкуванні не роблять. Дискусії у чатах є спонтанними. До якої гілки спілкування входять повідомлення можна здогадатися тільки з контексту, тому в якості засобу для збору лідів дуже корисним є програма-бот, яка може мати доступ до перегляду повідомлень в каналі чату.

Бот для генерації лідів в текстових чатах – це потужний бізнес-інструмент для адміністраторів. Для того, щоб користуватися ботом, необхідний адміністраторський доступ до чата, який зберігає потенційних клієнтів. Бот буде збирати дані про цих клієнтів, аналізувати їх та генерувати ліди, тобто нові потенційні контакти для бізнесу. Для того, щоб мати доступ до всіх повідомлень, а також до публічних персональних даних учасників дискусії, бот повинен бути доданий до чату в якості користувача-учасника дискусії, а щоб запитувати через API деталізовані персональні дані та бачити номери телефонів, за якими користувачі реєструвались, бот повинен мати права адміністратора.

Оскільки в Telegram нема стрічки підписок і рекомендацій за інтересами, збір лідів базується на обробці повідомлень і спробі проаналізувати, що саме пишуть користувачі; чи входять їх розмови у сферу інтересів, у якій потрібно шукати ліди; чи використовують вони лексику, яка відповідає тематиці реклами. Бот повинен просканувати весь корпус повідомлень в чаті, зібрати їх і проаналізувати, з'ясувавши чи підпадають вони під категорію, для якої збиратимуться ліди. Це багатокроковий процес, який в таких мережах, як Telegram, досі проходить в ручному режимі, тобто адміністратор чату може власноруч збирати інформацію, на які теми спілкуються користувачі чату і використовувати ці дані для публікації рекламних повідомлень або інших видів просування інформації. Зазвичай це досить трудомістка задача, а в чатах та каналах, де кількість підписників перевищує сотні тисяч і кожного дня публікується велика кількість повідомлень у різних гілках дискусій, ця задача стає нездійсненною в ручному режимі.

Робота з лідами включає кілька етапів:

1. Пошук лідів. Цей етап починається з визначення цільової аудиторії та потенційних джерел лідів. Потенційні клієнти можуть бути знайдені на різних платформах та в різних джерелах, таких як соціальні мережі, пошукові системи, форуми, реклама, електронна пошта і т.д. Компанії можуть використовувати різні методи для пошуку лідів, включаючи ручний пошук та обробку, автоматизовані системи пошуку та різні форми реклами.

2. Збір інформації про ліди. Коли потенційного клієнта знайдено, необхідно зібрати якомога більше інформації про нього. Це може включати дані про його демографічні характеристики, інтереси, проблеми, цілі і т.д. Таку інформацію можна отримати з аналізу текстових чатів або з інформації, наданої лідом у своєму профілі в Telegram.

3. Контакткування з лідом. Коли інформацію про ліда зібрано, наступний етап – встановлення контакту з ним. Це може бути контактний центр, який обробляє дзвінки, електронну

пошту, соціальні мережі тощо. Головне завдання на цьому етапі – зацікавити клієнта продуктом чи послугою, відповісти на всі його питання та перетворити його на реального покупця.

4. Конвертація лідів у покупців. Коли клієнт зацікавлений у продукті чи послугі, наступний етап – конвертація лідів у покупців. Це може бути досягнуто шляхом надання клієнту додаткової інформації, промоакцій, персональних знижок і т.д.

5. Слідування за лідами. Після того, як лід конвертований у покупця, важливо слідувати за ним та підтримувати зв'язок з ним. Це може включати надання післяпродажного обслуговування, повідомлення про нові продукти або послуги, а також прохання зворотного зв'язку та відгуків.

В такому алгоритмі взаємодії бот використовується тільки на першому і частково на другому етапі. Він відшукує серед користувачів, яких цікавлять теми, що просуває бот, і збирає доступну інформацію.

З точки зору користувача бота, якими найчастіше є адміністратори чатів і каналів, процес використання Telegram-бота для пошуку лідів в текстових чатах може мати наступні етапи:

1. Користувач звертається до Telegram-бота з проханням про пошук лідів в текстових чатах.
2. Бот аналізує текстові повідомлення в зазначеному чаті та визначає потенційних клієнтів.
3. Бот надсилає користувачу інформацію про знайдених лідів та запропоновані плани дій щодо їх залучення.
4. Користувач узгоджує запропонований план дій та домовляється про подальші дії.
5. Бот відстежує прогрес у залученні лідів та надсилає звіти користувачеві.
6. Після успішного залучення лідів, користувач отримує можливість перевірити їх якість та впевнитися у задоволеності від наданих послуг або продуктів.

7. Користувач оплачує послуги Telegram-бота та продовжує співпрацю з ним для подальшого пошуку лідів.

Особливості пошуку лідів в текстових чатах включають:

1. Необхідність аналізу кожного повідомлення в чаті, щоб знайти корисну інформацію про потенційних клієнтів.
2. Необхідність розуміння контексту, в якому була висловлена інформація, щоб зрозуміти, чи може ця інформація стати корисною для бізнесу.
3. Необхідність мануальної обробки інформації, яка була знайдена в текстових чатах, щоб виділити потенційних лідів і зберегти їх контактні дані.

Існує безліч алгоритмів, які можуть бути використані для пошуку лідів. Найбільш поширені алгоритми:

1. Пошук за ключовими словами: цей алгоритм використовується для пошуку лідів в Інтернеті. За допомогою цього алгоритму можна відстежувати різні ключові слова, пов'язані з вашою галуззю, і знаходити потенційних клієнтів, які шукають інформацію з цих ключових слів.

2. Рекомендації від відвідувачів: цей алгоритм використовується у соціальних мережах, він ґрунтується на рекомендаціях інших користувачів. Якщо користувач залишає відгук або коментар про вашу компанію або продукт, це може призвести до того, що його друзі дізнаються про вашу компанію та зацікавляться нею. Цей метод може бути опосередковано використаний у текстових чатах, наприклад, шляхом заохочення до репостів певних матеріалів і відслідковування. Але прямого способу використати рекомендації користувачів одне одному в Telegram нема.

3. Збір контактів: цей алгоритм використовується для збирання контактів. Ви можете зібрати адреси електронної пошти та номери телефонів потенційних клієнтів, які висловили інтерес до ваших продуктів чи послуг.

4. Аналіз поведінки користувача: цей алгоритм використовується для аналізу поведінки користувачів на сайті. Можливо відстежувати, які сторінки вони відвідують, які продукти чи послуги переглядають, скільки часу вони проводять на сайті тощо.

5. Аналіз соціальних медіа: цей алгоритм використовується для аналізу активності потенційних клієнтів у соціальних мережах. Можливо відстежувати, що вони пишуть і як активно вони беруть участь у обговореннях у галузі.

В текстових чатах більшість стандартних методів рекламного та рекомендаційного просування не працює. Це відбувається тому, що кожний чат та канал є окремою сутністю, вони не рекомендуються системою автоматично. Зараз у месенджері Telegram з'явився інструмент реклами каналів через внутрішню систему, але його ефективність для просування реклами невелика, тим більш вона невелика саме для пошуку лідів. Для цього у текстових чатах можна використовувати алгоритми машинного навчання, такі як аналіз тональності тексту і класифікація запитів. Наприклад, алгоритм аналізу тональності тексту може визначити настрій користувачів, що може допомогти виділити потенційних клієнтів, які виражають позитивне ставлення до конкретних продуктів чи послуг.

Алгоритми класифікації запитів можуть бути використані для визначення запитів, пов'язаних з певними продуктами або послугами. Наприклад, якщо людина продає косметичні засоби, то алгоритм класифікації запитів використовується для виділення запитів, пов'язаних з доглядом за шкірою обличчя. Це дозволяє швидко та ефективно визначити потенційних клієнтів, зацікавлених у цих продуктах.

Загалом пошук лідів у текстових чатах є ефективним способом отримання потенційних клієнтів, але потребує використання спеціальних алгоритмів та інструментів. Крім того, важливо швидко реагувати на запити користувачів та забезпечувати високу якість обслуговування для підвищення ефективності пошуку лідів у текстових чатах.

Було вирішено спроектувати бот, який буде збирати повідомлення з текстових чатів, аналізувати їх за допомогою бібліотек аналізу тексту і машинного навчання, з'ясовуючи, чи відносяться повідомлення до категорії, лідів із якої ми збираємо, і якщо так, то зберегти дані про цього користувача у базі даних.

Проаналізувавши мови програмування для розробки Telegram-бота було вирішено обрати Python, тому що він має багато бібліотек та фреймворків, що робить його ідеальним вибором для розробки телеграм ботів.

Оскільки бот працює у середовищі месенджеру Telegram та єдиним інтерфейсом таких систем зазвичай є повідомлення в месенджері, необхідно використовувати для зв'язку з Telegram його API. Використовувати цей інтерфейс можна декількома способами – або покладатись на інтерфейси, надані саме розробниками месенджеру, або використовувати бібліотеки або фреймворки-обгортки для спрощеного доступу до цих функцій із середовища різних мов програмування. Також може бути використаний комбінований підхід, тому що більшість фреймворків є обмеженими і недосконалими.

Було вирішено використати фреймворк для роботи з Telegram-ботом для спрощення розробки програмного забезпечення. Вирішено обрати `pyTelegramBotAPI` [18], тому що він забезпечує переважну більшість рутинних операцій по роботі з API та є досить простим у використанні.

Також використовувався «чистий» API Telegram [19] – це набір програмних інтерфейсів, які надають розробникам можливість взаємодіяти з платформою Telegram та створювати свої додатки, в тому числі і Telegram-боти. Telegram API дозволяє розробникам взаємодіяти з Telegram-серверами, відправляти та отримувати повідомлення, працювати зі списками контактів, використовувати криптографію для шифрування повідомлень, встановлювати зв'язок з ботами та багато іншого. Використання API у чистому вигляді поряд із фреймворком обумовлене тим, що не всі необхідні функції були забезпечені бібліотекою `pyTelegramBotAPI`.

В якості основної бази даних було обрано MySQL [20], тому що вона є однією з найпопулярніших та надійних реляційних баз даних у світі. Реляційний тип бази даних був обраний тому, що реляційні бази даних пропонують зручний і стандартизований підхід до зберігання даних, забезпечують можливість здійснення складних запитів, мають добру підтримку транзакцій та інші переваги.

Однією з найважливіших частин роботи даного бота є власне аналіз текстів переписок, повідомлень та постів в чаті. Аналізувати текст можна за декількома напрямками. Оскільки необхідно відокремити тему розмови та що саме було написано кожним з користувачів, то робиться семантичний аналіз кожного повідомлення. Семантичний аналіз є важливою галуззю в обробці природної мови, і для його виконання використовуються різні нейромережеві бібліотеки семантичного аналізу тексту, такі як `Word2Vec`, `FastText`. Існує безліч бібліотек, написаних мовою програмування Python для різнопланового аналізу тексту, але, на жаль, усі безкоштовні бібліотеки

мають серйозні недоліки. Серед недоліків, що неможливо було компенсувати простим додаванням функцій, були такі, як ліміт на кількість запусків бібліотеки, тобто ліміт на кількість текстів, незалежно від їх довжини, що не дозволяє працювати з великою кількістю дуже коротких текстів, а також неможливість виконувати аналіз та шукати синоніми або будувати структуру лексичних одиниць. Використання комбінації декількох бібліотек, щоб компенсувати відсутність функцій кожної, вимагала адаптації даних, з якими працюють бібліотеки, до відповідного кожній формату. Дане рішення вийшло занадто громіздким, а форматування даних сповільняло виконання програми через велику кількість однотипних операцій.

Зважаючи на усі переваги та недоліки серед доступних варіантів для семантичного аналізу повідомлень в текстових чатах було вирішено обрати нейромережу ChatGPT. У ChatGPT є можливість аналізувати тексти будь-якої довжини через ChatGPT API, пропускну здатність такої системи вийшла значно вищою ніж у комбінації спеціалізованих на семантичному аналізі бібліотек. Оптимізований промпт (запит) до ChatGPT дозволяє одночасно виокремити лексичну одиницю і знайти широку групу синонімів, що дозволяє виділити, хто ще з користувачів згадував дану тему в чаті, використовуючи слова-синоніми, а також потенційно є зацікавленою особою, тобто можливим лідом [21-24].

Для ефективної розробки Telegram-бота до цього програмного забезпечення повинна бути висунута низка вимог.

Вимоги до системи в цілому:

- створення Telegram-бота з можливістю сканування повідомлень в чатах та збору корисної інформації про потенційних клієнтів;
- доступність системи з будь-якого пристрою, що має підключення до Інтернету та можливість використання месенджера Telegram;
- можливість збереження та обробки даних про знайдених лідів, таких як ім'я, контактна інформація, інформація про бізнес та інші корисні дані.

Вимоги до функцій (завдань), що виконуються системою:

- підключення Telegram-бота до текстових чатів;
- автоматичне сканування повідомлень в текстових чатах для пошуку лідів;
- збір та збереження корисної інформації про потенційних клієнтів;
- сортування та класифікація зібраної інформації для подальшого аналізу;
- надання звітів та статистичних даних про ефективність Telegram-бота та результативність пошуку лідів.

Вимоги до структури та функціонування системи:

- система повинна мати зручний та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача, що забезпечує легкий пошук лідів в текстових чатах;
- система повинна мати достатньо високу продуктивність та швидкість роботи для забезпечення ефективного пошуку лідів;
- система повинна бути розрахована на можливість розширення та модифікації функціоналу для додавання нових функцій в майбутньому.

Вимоги до надійності:

- система повинна забезпечувати стабільну та безперебійну роботу протягом усього періоду експлуатації;
- система повинна бути розроблена з урахуванням можливих помилок, що можуть виникнути в процесі роботи, та мати механізми захисту від непередбачених ситуацій.

Вимоги безпеки:

- система повинна мати механізми захисту від несанкціонованого доступу;
- при проектуванні системи повинні бути враховані всі можливі загрози безпеці, які можуть виникнути в процесі експлуатації;
- система повинна мати механізми резервного копіювання та відновлення інформації в разі її втрати чи пошкодження;
- встановлення засобів захисту від несанкціонованого доступу.

У даній роботі була розроблена програма для аналізу текстових чатів з метою виявлення потенційних клієнтів з архітектурою клієнт-сервер, де клієнтська частина – це Telegram-бот, а серверна частина – це вебдодаток на мові програмування Python.

Схема архітектури системи в цілому наведена на рис. 1.

Telegram-бот сканує чат, збирає повідомлення, виокремлює із них семантичні одиниці, що потенційно належать до змістової категорії, яка задана. Після розбору текстів на окремі слова і лексичні структури, бот надсилає їх на аналіз у ChatGPT через спеціально розроблений для цього промпт, а потім збирає дані, які у відповідь надсилає ChatGPT, парсить масив синонімів та зберігає їх у таблиці бази даних, уникаючи дублів. При збереженні дані асоціюються з категорією пошуку (темою) або залишаються без категорії, якщо вона ще не була створена. Потім вони потенційно можуть бути задіяні, якщо виникне потреба.

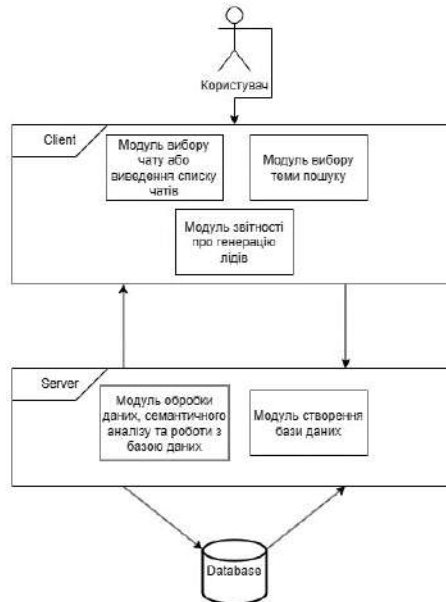


Рис. 1 – Архітектура Telegram-боту для пошуку лідів

Якщо повідомлення відноситься до шуканої категорії, то необхідно запитувати у Telegram його персональні дані, які є в публічному доступі в системі. Після цього звідти береться його внутрішній ідентифікатор у месенджері та ці дані зберігаються у таблиці лідів. Слід окремо зазначити, що ці дані є відкритою інформацією, збирати та зберігати їх цілком законно, а їх обсяг для кожного користувача регулюється налаштуванням конфіденційності акаунту мережі Telegram.

Схема взаємодії програмних модулів боту між собою наведена на рис. 2.

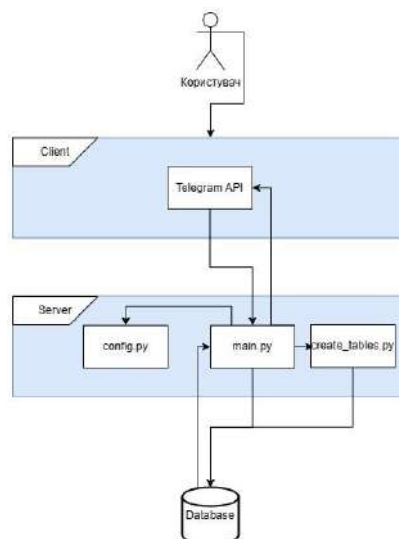


Рис. 2 – Діаграма взаємодії програмних модулів боту між собою

Адміністратор може використовувати цей бот для автоматизації процесу збору лідів і подальшого контактування з ними. Бот може запропонувати користувачам заповнити форму з контактними даними, які потім можна буде використовувати для зв'язку з ними, або зібрати за допомогою API Telegram ті контактні дані, які сам користувач зробив публічними через систему. Крім того, бот може надсилати автоматичні повідомлення з запитаннями про потреби клієнта та відповідати на їх запитання.

Після того, як потенційних клієнтів знайдено, починається процес роботи з ними. Це може бути контактний центр, який обробляє дзвінки, електронну пошту, соціальні мережі тощо. Головне завдання – зацікавити клієнта продуктом чи послугою, відповісти на всі його запитання та перетворити його на реального покупця.

Таким чином, адміністратор чату може створити список людей, які в чаті спілкувались на теми з категорії, що його цікавить, або близькі до них, використовуючи синонімічну лексику; переглядати цей список, використовувати інформацію в якості контактних даних для просування товарів чи послуг або приймати рішення, чи раціонально публікувати рекламні дописи, або якимось іншим чином просувати товари чи послуги з даної категорії в чаті.

Вхідні данні:

- посилання на чати, в яких треба шукати лідів;
- ключові слова або теми за допомогою яких треба шукати лідів.

Вихідні данні:

- аналіз статистики текстових чатів;
- контактні дані про знайдених лідів.

Для зберігання даних про ліди, лексичні одиниці, словника синонімів та логу взаємодій адміністраторів із чат ботом була створена прозора, але ефективна, структура бази даних, що забезпечуватиме атомарність, зв'язаність та цілісність даних. Ця структура не є складною, бо кількість сутностей, що взаємодіють у системі, невелика, але за рахунок своєї простоти і відсутності багаторівневих зв'язків всередині бази даних, здатна до масштабування до середніх або великих розмірів.

Концептуальна модель бази даних представлена на рис. 3.

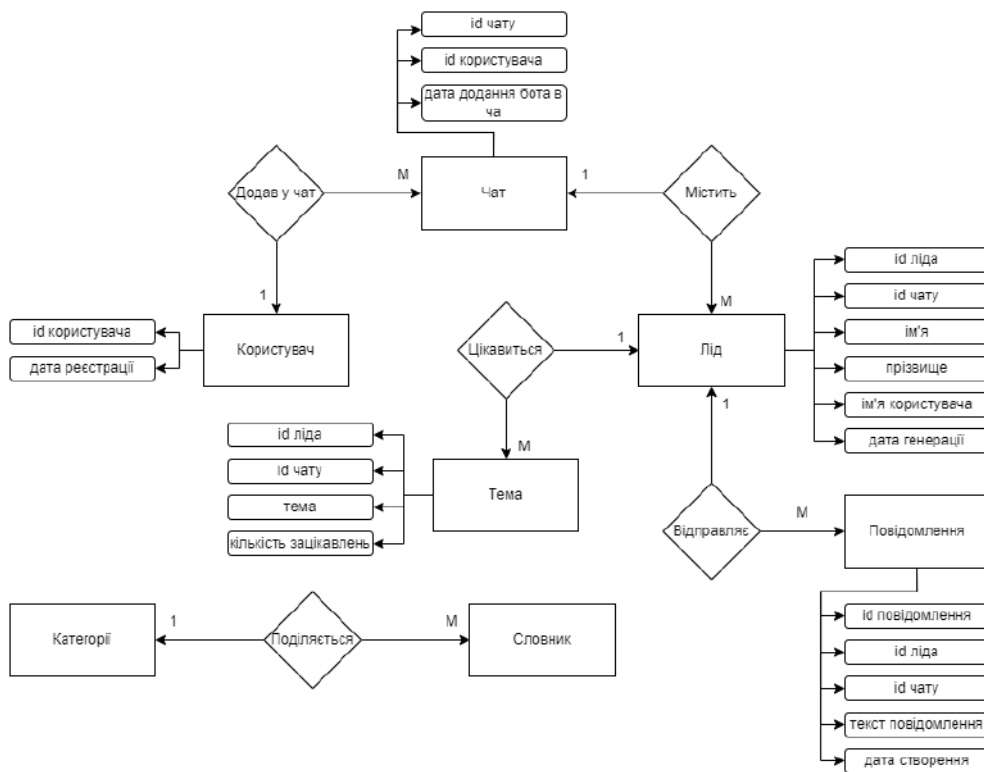


Рис. 3 – Концептуальна модель бази даних

Діаграма концептуальної моделі бази даних наочно демонструє структуру даних та взаємозв'язки між ними. На діаграмі зображені сутності (об'єкти) та їх взаємозв'язки. Також відображені атрибути, які властивості сутностей.

Користувач взаємодіє з десктопним або веб-додатком Telegram або мобільним додатком, який виступає в ролі Клієнта. Користувач взаємодіє з такими модулями як:

- модуль вибору чату або виведення списку чатів;
- модуль вибору теми пошуку;
- модуль створення та редагування заявок;
- модуль звітності та генерації лідів.

Ці модулі потрібні для збору вхідних даних про потребу користувача. Потім ці дані відправляються на сервер, де обробляються модулем обробки даних та роботи з базою даних. Також для первинного налаштування бота використовується модуль створення бази даних, для декількох користувачів є можливість створити декілька окремих баз даних.

Розглянемо безпосередню роботу користувача з Telegram-ботом.

При відкритті чату з ботом, користувачу пропонується додати його до чату, в якому потрібно шукати потенційних клієнтів. Після додавання до чату, бот відправить повідомлення до чату про його приєднання. Потім для того, щоб бот міг зібрати всі повідомлення, його необхідно наділити правами адміністратора.

Після того, як користувач додав бота до необхідних чатів, натиснувши кнопку «Обрати чат», користувачу потрібно обрати чат, в якому йому треба згенерувати лідів або проглянути звіт с генерації.

Після вибору чата користувачу потрібно обрати тему, за якою потрібно генерувати лідів або отримати звіт с генерації.

Далі треба вибрати наступні дії, які бот повинен виконати з чатом:

1. Розпочати новий сеанс пошуку лідів. Цей процес збере всі наявні повідомлення, відправить їх на семантичний аналіз, побудує і збереже структуру словника, цікавих з точки зору обраної теми повідомлень, та їх авторів, та збереже їх у базі даних

2. Показати звіт з генерації лідів. Ця функція недоступна, поки бот не перевірить чат хоча б один раз, але після цього по кліку на кнопку «Звіт» буде виведено список-топ людей, які спілкувались, використовуючи лексику, дотичну до обраної теми, разом з їх контактними даними та даними чату, а також частотою згадування слів із даного контексту.

3. Оновити список лідів. Якщо ліди вже збирались, може виникнути необхідність оновити дані про них, бо спілкування у чаті вкрай динамічне і ситуація змінюється швидко, повторний аналіз знов збере дані про повідомлення в чати, уникаючи повторів, оновить список потенційних лідів, отримає їх контактні дані, якщо вони змінились або особа фігурує в списку вперше, та частоту згадувань слів з наданого контексту. Після цього система поверне оновлений список потенційних лідів в чат.

За допомогою цього Telegram-бота користувач можливе проаналізувати повідомлення в чаті та отримати інформацію про осіб, які можуть бути зацікавлені в послугах чи товарах, що пропонує компанія. Програма не може здійснювати автоматичну генерацію лідів, але дозволяє збирати та аналізувати дані про потенційних клієнтів з текстового чату. Таким чином, цей бот є, в першу чергу, допоміжним або основним засобом у побудові маркетингової моделі чату і визначенні категорій інтересів користувачів, які можуть бути використані для просування товарів чи послуг за допомогою публікації дописів, повідомлень та інших типів взаємодії, враховуючи теми, що цікавлять аудиторію даного чату.

Висновки

1. Досліджено процес пошуку потенційних клієнтів та проаналізовано рівень існуючої автоматизації. За результатами аналізу існуючих програмних засобів були виведені переваги та недоліки кожного боту, які було враховано під час розробки власного додатку.

2. Розроблено інформаційну систему, що працює через вебінтерфейс і забезпечує введення, зберігання та обробку інформації про лідів. Використання даної програми полегшить роботу та забезпечить автоматичний пошук потенційних клієнтів в текстових чатах зі збереженням даних про них.

3. Отримані результати можуть бути використані в галузі бізнесу та маркетингу для автоматизації процесів залучення потенційних клієнтів, при аналізі настроїв і основних тем спілкування у публічних чатах, адмініструванні та модерації публічних чатів, публікації реклами в чатах з урахуванням базових параметрів таргетування реклами до аудиторії.

Перелік використаних джерел:

1. Wilson R. Planning your internet marketing strategy: a doctor Ebiz guide. 1st ed, 2001. Hoboken: Wiley. 272 p.
2. Geeksforgeeks - Boyer Moore Algorithm for Pattern Searching. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/boyer-moore-algorithm-for-pattern-searching/> (дата звернення: 02.05.2023).
3. Dalal N.R., Jadhav P. A composite algorithm for string matching. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER)*. 2015. № 2. Pp. 68-73. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/930/1/012001>.
4. Ahmad A., Ahmad T., Vijay H. Shortest path algorithms for social network strengths. *Proceedings of the 5th International Conference on Frontiers in Intelligent Computing: Theory and Applications*. 2017. Vol 515. Pp. 1223-1224. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-3153-3_35.
5. Rodrigues M., Peterson R.M. The role of social CRM and its potential impact on lead generation in business-to-business marketing. *International Journal of Internet Marketing and Advertising*. 2012. Vol. 7. No. 2. Pp. 567-577. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJIMA.2012.046255>.
6. LeadScanr – Crunchbase Company Profile & Funding. URL: <https://www.crunchbase.com/organization/leadscanner> (дата звернення: 18.06.2023)
7. Hubspot Beginner's Guide to Lead Generation. URL: <https://blog.hubspot.com/marketing/beginner-inbound-lead-generation-guide-ht> (дата звернення: 17.05.2023).
8. LeadExtract Bot. URL: <https://github.com/schurig/LeadExtractBot> (дата звернення: 16.05.2023).
9. Leadmine Bot. URL: https://telegram.me/leadmine_bot (дата звернення: 15.05.2023).
10. Salesbot. URL: <https://telegram.me/salesbot> (дата звернення: 12.05.2023).
11. SalesIQ. URL: <https://telegram.me/SalesIQBot> (дата звернення: 11.05.2023).
12. Leadjet. URL: <https://telegram.me/leadjet> (дата звернення: 01.05.2023).
13. BotLead. URL: https://telegram.me/botlead_bot (дата звернення: 01.05.2023).
14. Combot. URL: <https://combot.org/> (дата звернення: 02.05.2023)
15. GroupButler. URL: <https://groupbutler.org/> (дата звернення: 03.05.2023).
16. Anti-Spam Bot. URL: https://telegram.me/anti_spambot (дата звернення: 04.05.2023).
17. Characteristics of viral messages on Telegram; The world's largest hybrid public and private messenger / Nobari A.D., Mirzaye Sarraf M.H.K., Neshati M., Daneshvar F.E. *Expert systems with applications*. 2021. Vol. 168. Pp. 1-30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114303>.
18. eternnoir/pyTelegramBotAPI: Python Telegram bot api. URL: <https://github.com/eternnoir/pyTelegramBotAPI#api-reference> (дата звернення: 16.04.2023).
19. Telegram APIs. URL: <https://core.telegram.org/api> (дата звернення: 20.04.2023).
20. Stokes D. MySQL and JSON: A Practical Programming Guide. New York : McGraw Hill, 2018. 128 p.
21. Using ChatGPT for sentiment analysis: A Beginner's Guide. URL: <https://blog.gramener.com/using-chatgpt-for-sentiment-analysis/> (дата звернення 23.03.2023).
22. How to build a sentiment analysis application with ChatGPT and Druid. URL: <https://imply.io/blog/how-to-build-a-sentiment-analysis-application-with-chatgpt-and-druid/> (дата звернення 23.04.2023).
23. Application of ChatGPT in improving customer sentiment analysis for businesses / F. Sudirjo, K. Diantoro, J.A. Al-Gasawneh, H. Khootimah Azzaakiyyah, A.M. Almaududi Ausat. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*. 2023. Vol. 5(3). Pp. 283-288. DOI: <https://doi.org/10.47233/jteksis.v5i3.871>.
24. Application of ChatGPT in improving customer sentiment analysis for businesses / F. Sudirjo, K. Diantoro, J. Al-Gasawneh, H. Khootimah Azzaakiyyah, A.M. Almaududi Ausat. *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*. 2023. Vol. 5. № 3. Pp. 283-288. DOI: <https://doi.org/10.47233/jteksis.v5i3.871>.

References:

1. R. Wilson, *Planning your internet marketing strategy: a doctor Ebiz guide*, 1st ed. Hoboken, USA: Wiley Publ., 2001.
2. Geeksforgeeks – Boyer Moore Algorithm for Pattern Searching [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/boyer-moore-algorithm-for-pattern-searching/>. Accessed on: May 02, 2023.
3. N.R. Dalal, and P. Jadhav, «A Composite algorithm for string matching», *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research (IJMTER)*, № 2, pp. 68-73, 2015. doi: **10.1088/1742-6596/930/1/012001**.
4. A. Ahmad, T. Ahmad, and H. Vijay, «Shortest Path Algorithms for Social Network Strengths», in *Proceedings of the 5th International Conference on Frontiers in Intelligent Computing: Theory and Applications*, vol. 515, pp. 1223-1224, 2017. doi: **10.1007/978-981-10-3153-3_35**.
5. M. Rodrigues, and R.M. Peterson, «The role of social CRM and its potential impact on lead generation in business-to-business marketing», *International Journal of Internet Marketing and Advertising*, vol. 7, no. 2, pp. 567-577, 2012. doi: **10.1504/IJIMA.2012.046255**.
6. LeadScanr – Crunchbase Company Profile & Funding [Online]. Available: <https://www.crunchbase.com/organization/leadscanner>. Accessed on: June 18, 2023.
7. Hubspot Beginner’s Guide to Lead Generation [Online]. Available: <https://blog.hubspot.com/marketing/beginner-inbound-lead-generation-guide-ht>. Accessed on: May 17, 2023.
8. LeadExtract Bot [Online]. Available: <https://github.com/schurig/LeadExtractBot>. Accessed on: May 16, 2023.
9. Leadmine Bot [Online]. Available: https://telegram.me/leadmine_bot. Accessed on: May 15, 2023.
10. Salesbot [Online]. Available: <https://telegram.me/salesbot>. Accessed on: May 12, 2023.
11. SalesIQ [Online]. Available: <https://telegram.me/SalesIQBot>. Accessed on: May 11, 2023.
12. Leadjet [Online]. Available: <https://telegram.me/leadjet>. Accessed on: May 01, 2023.
13. BotLead [Online]. Available: https://telegram.me/botlead_bot. Accessed on: May 01, 2023.
14. Combot [Online]. Available: <https://combot.org/>. Accessed on: May 02, 2023.
15. GroupButler [Online]. Available: <https://groupbutler.org/>. Accessed on: May 03, 2023.
16. Anti-Spam Bot [Online]. Available: https://telegram.me/anti_spambot. Accessed on: May 04, 2023.
17. A.D. Nobari, M.H.K. Mirzaye Sarraf, M. Neshati, and F.E. Daneshvar, «Characteristics of viral messages on Telegram; The world’s largest hybrid public and private messenger», *Expert systems with applications*, vol. 168, pp. 1-30, 2021. doi: **10.1016/j.eswa.2020.114303**.
18. eternnoir/pyTelegramBotAPI: Python Telegram bot api [Online]. Available: <https://github.com/eternnoir/pyTelegramBotAPI#api-reference>. Accessed on: April 16, 2023.
19. Telegram APIs [Online]. Available: <https://core.telegram.org/api>. Accessed on: April 20, 2023.
20. D. Stokes, *MySQL and JSON: A Practical Programming Guide*. New York, USA: McGraw Hill Publ., 2018.
21. Using ChatGPT for Sentiment Analysis: A Beginner’s Guide [Online]. Available: <https://blog.gramener.com/using-chatgpt-for-sentiment-analysis/>. Accessed on: March 23, 2023.
22. How to Build a Sentiment Analysis Application with ChatGPT and Druid [Online]. Available: <https://imply.io/blog/how-to-build-a-sentiment-analysis-application-with-chatgpt-and-druid/>. Accessed on: April 23, 2023.
23. F. Sudirjo, K. Diantoro, J.A. Al-Gasawneh, H. Khootimah Azzaakiyyah, and A.M. Almaududi Ausat, «Application of ChatGPT in Improving Customer Sentiment Analysis for Businesses», *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, vol. 5(3), pp. 283-288, 2023. doi: **10.47233/jteksis.v5i3.871**.
24. F. Sudirjo, K. Diantoro, J. Al-Gasawneh, H. Khootimah Azzaakiyyah, and A.M. Almaududi Ausat, «Application of ChatGPT in Improving Customer Sentiment Analysis for Businesses», *Jurnal Teknologi Dan Sistem Informasi Bisnis*, vol. 5, № 3, pp. 283-288, 2023. doi: **10.47233/jteksis.v5i3.871**.

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

Стаття надійшла 23.06.2023
Стаття прийнята 28.07.2023

© Сергієнко А.В.¹, Башкісер В.Р.², Сущевський Д.В.³, Панферова Я.В.⁴**ПРОГНОЗУВАННЯ ФІНАНСОВИХ РИНКІВ
ЗА ДОПОМОГОЮ АЛГОРИТМУ ВИПАДКОВОГО ЛІСУ**

В статті наведено матеріал стосовно аналізу фінансового ринку за допомогою алгоритму випадкового лісу. Розглянуто загальну проблему прогнозування фінансових ринків та роль сучасних технологій для точних прогнозів та автоматизації торгових стратегій. Проведений огляд існуючих моделей прогнозування та можливість їх застосування для фінансових ринків. Проаналізовані останні дослідження та публікації, на основі яких розроблено програму для проведення дослідження. Створена програма має модульну структуру та представляє собою бібліотеку, що може бути використана для подальшого дослідження. Була побудована та натренована нейрона мережа, яка за допомогою алгоритму випадкового лісу може робити аналіз за певний період та надавати прогнозування. В рамках дослідження були використані відкриті дані та проведений аналіз компанії Apple. В ході експериментів зроблені аналіз точності моделі під впливом гіперпараметрів, аналіз роботи моделі на різних ринкових умовах, порівняння з іншими методами прогнозування та аналіз впливу обсягу даних на точність моделі. Для прогнозування ринку було побудовано декілька математичних моделей нейронної мережі. Після чого вони були натреновані на обраних датасетах. Для тренування було взято інформацію за великий проміжок часу, дані за квартали, щоденний прибуток, прибуток за рік. Програмне забезпечення було написано на мові Python, використовувались ряд бібліотек, а саме *yfinance*, *Sklearn-Scikit-learn*, *Matplotlib.pyplot*, *Pandas*. В експериментальних дослідженнях було проведено порівняння результатів різних підходів до аналізу. Були порівняні моделі з використанням методу випадкового лісу та моделі лінійної регресії, що доводять доцільність використання методу випадкового лісу для такого роду задач. За допомогою графіків продемонстровані метрики та виведені середньоквадратичні помилки. Для визначення адекватності роботи розробленої нейронної мережі було проведено тестування на визначення помилок при порівнянні з іншими ринками.

Ключові слова: машинне навчання, Python, Randomforestregressor, Scikit-Learn, навчаюча вибірка, середньоквадратична помилка.

A.V. Serhienko, V.R. Bashkiser, D.V. Sushchevsky, Ya.V. Panferova. Forecasting financial markets using the random forest algorithm. The article provides material on the analysis of the financial market using the random forest algorithm. The general problem of forecasting financial markets and the role of modern technologies for accurate forecasts and automation of trading strategies are considered. An overview of existing forecasting models and the possibility of their application for financial markets was conducted. The latest studies and publications were analyzed, on the basis of which a research program was developed. The created program has a modular structure and represents a library that can be used for further research. A neural network was built and trained, which, using a random forest algorithm, can perform analysis over a certain period and provide

¹ канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-1328-2572, sergienko_a_v@pstu.edu

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

³ канд. техн. наук, доцент, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-9004-2690, sushchevskiy.d.v@nmu.one

⁴ асистент, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-6318-1417, panferova.ya.v@nmu.one

predictions. As part of the research, open data and an analysis of the Apple company were used. During the experiments, an analysis of the accuracy of the model under the influence of hyperparameters, an analysis of the model's operation under different market conditions, a comparison with other forecasting methods, and an analysis of the impact of the amount of data on the accuracy of the model were made. Several neural network mathematical models were built for market forecasting. After that, they were trained on the selected datasets. For training, information was taken for a long period of time, data for quarters, daily profit, profit for a year. The software was written in Python, a number of libraries were used, namely yfinance, Sklearn-Scikit-learn, Matplotlib.pyplot, Pandas. Experimental studies compared the results of different approaches to analysis. Models using the random forest method and the linear regression model were compared, proving the feasibility of using the random die method for this type of problem. With the help of graphs, the metrics are demonstrated and the root mean square errors are derived. To determine the adequacy of the work of the developed neural network, testing was conducted to identify errors when compared with other markets.

Keywords: machine learning, Python, Randomforestregressor, Scikit-Learn, training sample, mean square error.

Постановка проблеми. Фінансові ринки є важливою частиною економіки, яка впливає на інвестиційні стратегії, попит і пропозицію, а також вартість капіталу. Точне прогнозування в цій сфері життєво важливе для інвесторів, компаній і державних органів.

Фінансовий ринок – це місце, де фінансові цінні папери купуються та продаються як на національному, так і на глобальному рівнях, і трейдери працюють, щоб отримати прибуток, одночасно керуючи своїми ризиками. Глибоке розуміння всіх аспектів фінансового ринку є важливим для трейдерів, навіть тих, хто спеціалізується на певних сегментах, оскільки вони можуть взаємно впливати один на одного.

Сучасний фінансовий ринок створює величезний потік даних, включаючи інформацію про ціни, обсяги торгів, фінансові новини та інші важливі дані. Волатильність – це фінансовий спеціаліст, що змінюється щодня [1]. Тому розширені алгоритми машинного навчання, такі як випадковий ліс, необхідні для аналізу та прогнозування ринкових тенденцій і моделей. Великі дані відіграють важливу роль у фінансовій індустрії, і високочастотна торгівля вимагає негайної реакції та адаптації до мінливих ситуацій. Успішна торгівля вимагає правильного поєднання інтуїції та обчислень [2].

Фінансові ринки є складними та непередбачуваними через зовнішні фактори, такі як макроекономічні події, політичні рішення та геополітична нестабільність. Традиційні методи аналізу не завжди ефективні для прогнозування поведінки ринку, яка характеризується значною динамікою та випадковістю. Таким чином, алгоритми машинного навчання, такі як випадковий ліс, стали потужними інструментами для виявлення шаблонів у даних і підвищення точності прогнозування.

Розвиток обчислювальної потужності та алгоритмів машинного навчання дозволив точніше аналізувати ринкові тенденції та ідентифікувати закономірності. Тепер фінансові аналітики мають інструменти для ефективної обробки великих обсягів даних. Надзвичайно актуальною стала важливість аналізу динаміки цін, обсягів торгів, фінансових новин. Автоматизація та роботизація торгівлі з використанням цих алгоритмів дозволяє трейдерам швидше реагувати на зміни на ринку та приймати зважені рішення.

Методи точного прогнозування стають критично важливими для економічного успіху компаній та інвесторів, допомагаючи їм приймати обґрунтовані рішення щодо інвестицій та управління ризиками. Вони надають засоби для кращого управління портфелями та ефективного реагування на зміни в реальному часі. Розвиток прогнозування фінансового ринку з використанням алгоритмів машинного навчання, таких як випадковий ліс, має значні практичні та теоретичні наслідки. Це дозволяє ефективніше використовувати ресурси та керувати ризиками, що, у свою чергу, сприяє загальному економічному та фінансовому добробуту.

Роль технологій в аналізі фінансового ринку надзвичайно важлива. Сучасні програмні рішення дозволяють автоматизувати процес збору, аналізу та візуалізації фінансових даних.

Інтерактивні інформаційні панелі та графічні зображення динаміки цін дозволяють трейдерам та інвесторам легко відстежувати ключові параметри.

Розвиток інформаційних технологій сприяє появі нових джерел даних. Для аналізу громадської думки та настроїв інвесторів активно використовуються соціальні мережі, блоги та форуми. Штучний інтелект і аналіз природної мови (NLP) використовуються для автоматичного аналізу текстової інформації та виділення ключових сигналів.

Важливо зазначити, що ці технологічні засоби та методи не замінюють аналітичного розуму та досвіду спеціаліста. Технології служать інструментами для підтримки прийняття рішень і дають можливість швидко реагувати на зміни на ринку.

У високочастотному світі фінансів, де на рахунок кожна мілісекунда, швидкість обробки та аналізу даних є критично важливим фактором успіху. Інфраструктура та програмне забезпечення, що дозволяють працювати з великими обсягами даних у режимі реального часу, є ключовими складовими сучасного аналізу фінансового ринку.

Практичне застосування досліджень на основі алгоритму випадкового лісу включає покращення прийняття рішень на фінансових ринках, управління ризиками, оптимізацію. Дослідження «Дослідження впливу алгоритму випадкового лісу на точність прогнозування фінансових ринків» має багато практичних застосувань. Це оптимізація портфеля, управління ризиками, алгоритмічна торгівля, прийняття інвестиційних рішень, аналіз новин і настроїв, а також розробка фінансових продуктів.

Інвестори та менеджери портфелів можуть використовувати прогнози на основі алгоритму випадкового лісу, щоб оптимізувати свої портфелі, вибираючи активи, які мають найкращі перспективи зростання та диверсифікують ризик.

Прогнози фінансового ринку на основі алгоритму випадкового лісу можуть допомогти фінансовим установам і компаніям ефективніше керувати фінансовими ризиками. Це включає оцінку кредитоспроможності клієнтів, визначення ринкових ризиків і створення стратегій управління ризиками.

Алготрейдери можуть використовувати прогнози, створені за допомогою алгоритму випадкового лісу, для автоматизації торгових стратегій. Це дозволяє їм швидко реагувати на зміни на ринку та приймати рішення на основі даних.

Інвестори приватного капіталу та окремі трейдери можуть використовувати прогнози для прийняття рішень щодо купівлі та продажу активів. Це може допомогти їм вибрати найкращий час для інвестування та управління своїми інвестиційними портфелями.

Прогнози, засновані на алгоритмі випадкового лісу, також можна використовувати для аналізу новин, соціальних мереж та інших текстових даних, щоб визначити настрої інвесторів і громадську думку. Це може допомогти зрозуміти, як новини та події впливають на ринок.

Фінансові установи можуть використовувати результати досліджень для розробки нових фінансових продуктів і послуг, які відповідають потребам клієнтів та інвесторів.

Практичне застосування досліджень на основі алгоритму випадкового лісу включає вдосконалення процесу прийняття рішень на фінансових ринках, управління ризиками, оптимізацію інвестиційних портфелів і розробку нових фінансових продуктів. Ці програми можуть сприяти збільшенню прибутків і кращому управлінню інвестиціями, створенню інвестиційних портфелів і розробці нових фінансових продуктів, можуть призвести до збільшення прибутку та кращого управління інвестиціями.

Метою даної роботи є дослідження алгоритму випадкового лісу для підвищення точності прогнозування фінансових ринків, покращення процесу прийняття рішень на фінансовому ринку та управління інвестиціями шляхом підвищення розуміння того, як алгоритм випадкового лісу можна використовувати у фінансовій аналітиці, а також пов'язаних з ним переваг і обмежень. Дослідження спрямоване на створення практично застосовних моделей прогнозування для фінансових ринків з використанням алгоритму Random Forest і надання рекомендацій на основі цих прогнозів для покращення фінансових рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Випадковий ліс є потужним алгоритмом у сфері машинного навчання, який використовується для класифікації та регресії. В контексті аналізу фінансових ринків, він може бути використаний для передбачення цінових та ринкових тенденцій на основі історичних даних. В [3] використано бібліотеку scikit-learn для створення та навчання моделі випадкового лісу. Параметр `n_estimators` вказує кількість дерев у лісі, а `random_state`

гарантує відтворюваність результатів. Scikit-Learn, Keras і TensorFlow надають зручні та потужні засоби для побудови інтелектуальних систем в рамках практичного машинного навчання.

Ефективне управління ризиками має вирішальне значення в практичному застосуванні дослідження «Дослідження впливу алгоритму випадкового лісу на точність прогнозування фінансових ринків». Це дослідження підкреслює, як алгоритм випадкового лісу можна використовувати для управління фінансовими ризиками.

Алгоритм випадкового лісу може допомогти оцінити ринкові ризики такі, як коливання цін на активи, зміни процентних ставок і геополітичні події, як це показано в [3]. Аналізуючи та прогнозуючи такі ризики, фінансові установи та інвестори можуть розробляти стратегії управління портфелем, які враховують потенційні ризики.

Інвестори можуть використовувати прогнози, засновані на алгоритмі випадкового лісу, щоб визначити ризикованість своїх інвестицій. Наприклад, модель може передбачити ймовірність збитків від конкретної інвестиції, що допомагає інвесторам приймати рішення про те, наскільки ризикує їхній портфель.

На основі передбачень, створених за допомогою алгоритму випадкового лісу, фінансові установи можуть розробляти стратегії управління ризиками. Це може включати визначення оптимального поєднання активів у портфелі, використання лімітів стоп-лосс для обмеження збитків і розробку стратегій хеджування для зменшення ризику

Алгоритм випадкового лісу можна використовувати для моніторингу поточних ринкових умов і швидкого визначення потенційних ризиків. Це дозволяє фінансовим установам та інвесторам швидко реагувати на зміни на ринку.

Крім того, алгоритм Random Forest можна використовувати для аналізу сценаріїв, що дозволяє моделювати різні сценарії ринкових умов і оцінювати їх вплив на портфель або інвестиції. Це допомагає зрозуміти, які ризики можуть виникнути в різних сценаріях.

Алгоритм випадкового лісу є потужним інструментом для створення моделей прогнозування та стратегій управління ризиками. Це може допомогти фінансовим установам та інвесторам мінімізувати збитки та досягти більш стійкого фінансового успіху в умовах високої волатильності та складних ринкових умов.

Виклад основного матеріалу. Для дослідження параметрів алгоритму випадкового лісу для прогнозування фінансових ринків була розроблена програма, що складається з модулів, які відповідають наступним вимогам:

- 1) надають можливість налагодження та зміни реалізації генетичних операторів для оперативного налаштування їх під конкретні особливості фінансових ринків;
- 2) дозволяють працювати з різними типами представлення особин, такими як цілі числа, числа з плаваючою комою та бінарні дані, що забезпечує використання алгоритму для різних класів фінансових даних;
- 3) надають можливість змінювати основні параметри генетичного алгоритму, такі як частота схрещування, частота мутацій та кількість особин у популяції для отримання оптимальних результатів;
- 4) організовані як бібліотека для подальших досліджень.

Модель взаємодії та обміну даними між об'єктами в рамках процесу прогнозування ринкових трендів наведена на рис. 1.

Для оцінки впливу гіперпараметрів на точність моделі випадкового лісу під час прогнозування фінансових ринків проведено серію експериментів. Для навчання моделі були використані різні значення гіперпараметрів, такі як кількість дерев (`n_estimators`) та глибина дерев (`max_depth`).

Серія експериментів включала в себе навчання моделі випадкового лісу на даних фінансових ринків з різними комбінаціями значень гіперпараметрів. Для кожної комбінації значень параметрів було оцінено точність моделі.

Графіки та таблиці дозволяють наочно оцінити вплив зміни гіперпараметрів на точність моделі випадкового лісу під час прогнозування фінансових ринків. Значення гіперпараметрів для моделі аналізувались наступні:

- `n_estimators`: від 50 до 200 з кроком 10.
- `max_depth`: від 5 до 20 з кроком 5.

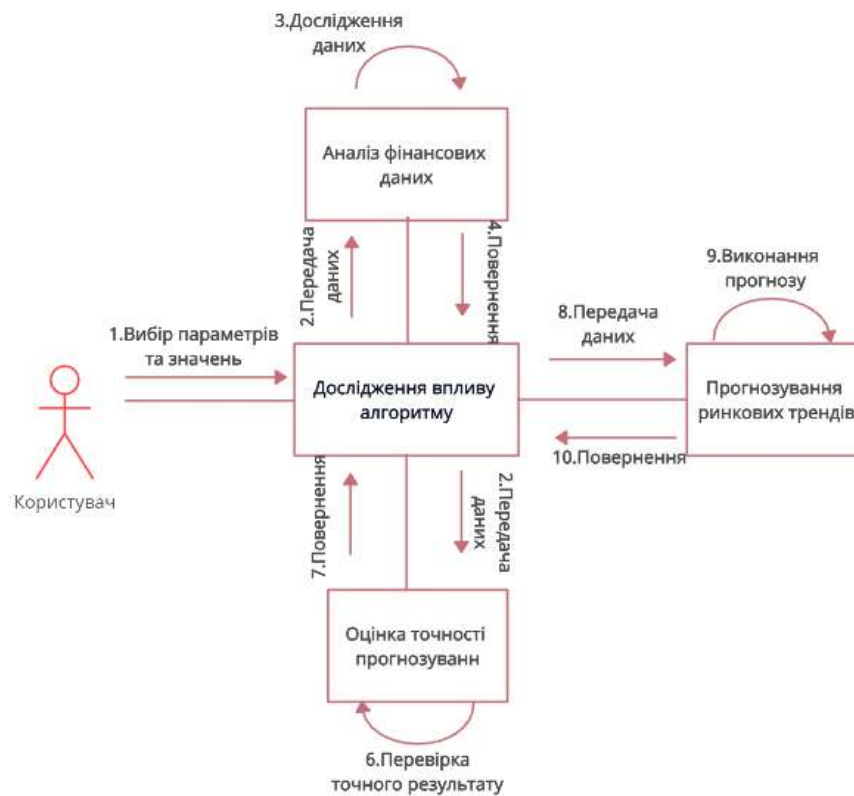


Рис. 1 – Діаграма взаємодії та обміну даними між об'єктами в рамках процесу прогнозування ринкових трендів

Після навчання моделі для кожної комбінації гіперпараметрів було проведено оцінку її точності, для чого була обрахована MSE, графік залежності якої від значень гіперпараметрів наведений на рис. 2.

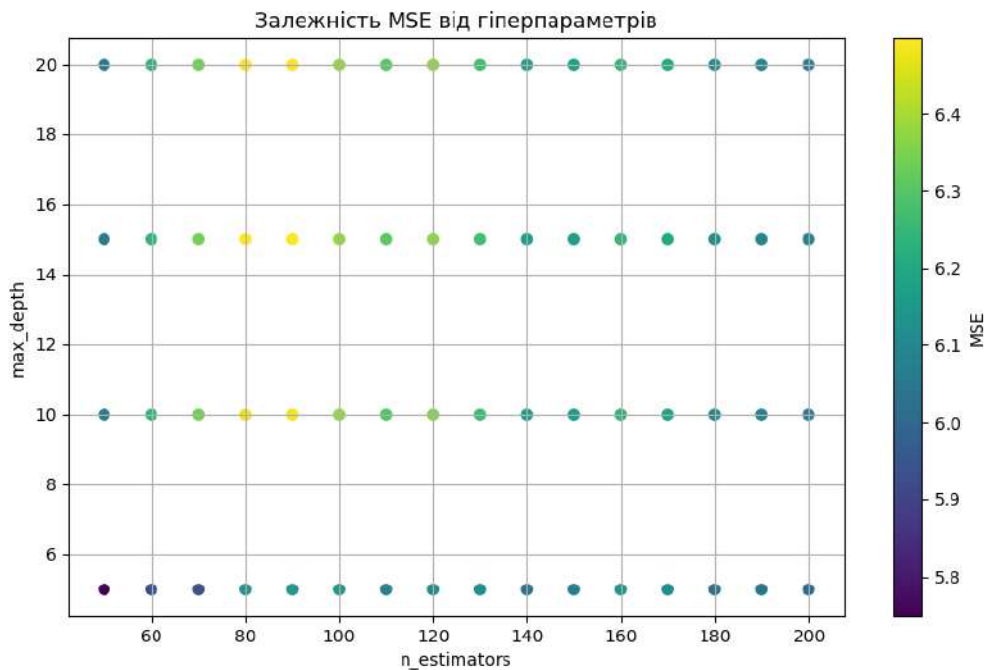


Рис. 2 – Графік залежності MSE від значень гіперпараметрів

Як можна бачити з графіку, кожний з розглянутих гіперпараметрів має вплив на модель. Значення MSE є мінімальними від 5.7 до 6.0 при параметрах $n_estimators$ рівних 30, 140, 200 при будь якому з розглянутих значень max_depth .

Для більш повного і всебічного розуміння роботи моделі та її адаптивності до різних ринкових сценаріїв, був проведений аналіз на даних, що охоплюють різні періоди часу і різні ринкові умови.

Було використано дані з двох різних часових інтервалів для навчання моделі. Перший період охоплював події та дані з 1 січня 2022 року по 31 грудня 2022 року, другий – з 1 січня 2023 року по 30 червня 2023 року. Кожен період представляє різні ринкові сценарії та характеристики [4].

Моделі було навчено на даних із двох періодів часу. Для кожного періоду було розраховано середньоквадратичну помилку (MSE) [4, 5], а також проведено аналіз точності моделі в контексті різних ринкових умов. Отримані результати представлено у вигляді графіків розсіювання, де кожна точка відповідає фактичному значенню і передбаченню моделі для конкретного торгового дня, що зображені на рис. 3.

Аналізуючи представлені графіки, можна зробити висновок про працездатність моделі в різних ринкових умовах та здатність до адаптації до різноманітних сценаріїв.

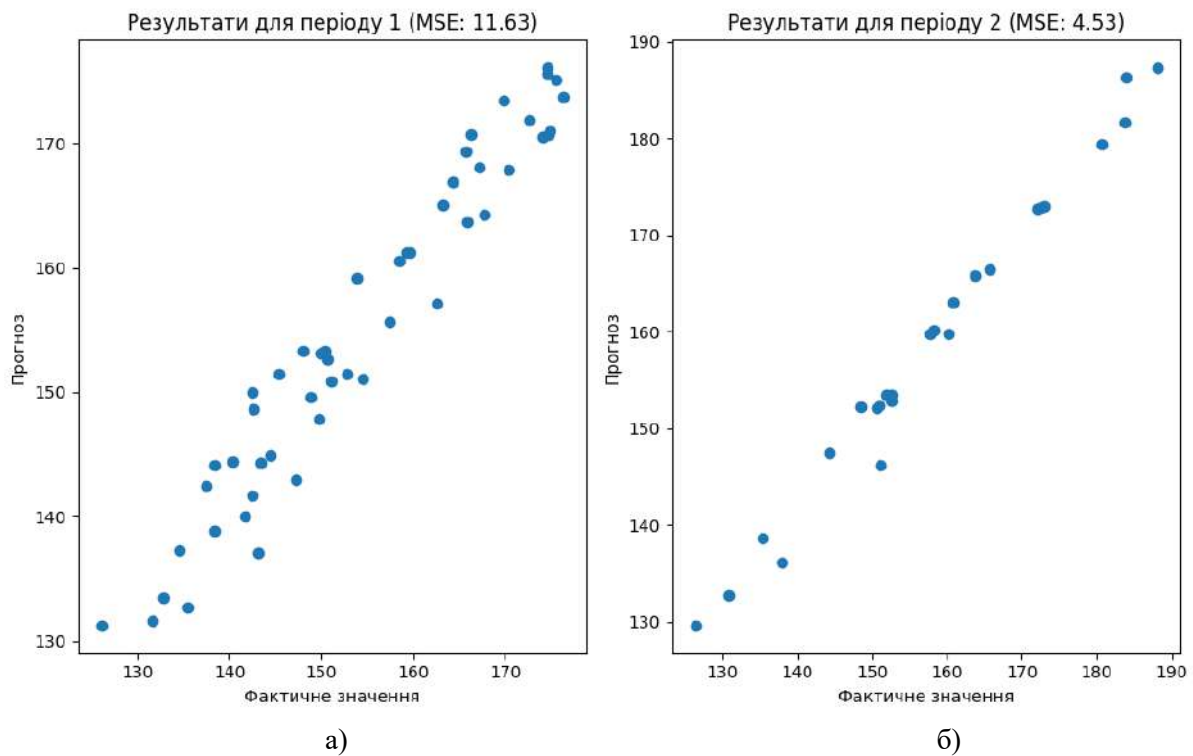


Рис. 3 – Значення середньоквадратичної помилки отриманих для періодів: а – з 1 січня 2022 року по 31 грудня 2022 року; б – з 1 січня 2023 року по 30 червня 2023 року

Наступним був проведений порівняльний аналіз точності моделі з використанням методу випадкового лісу та моделі лінійної регресії, що описані в [5, 6]. На рис. 4 подано графічне зображення проведеного порівняльного аналізу отриманих результатів моделей прогнозування.

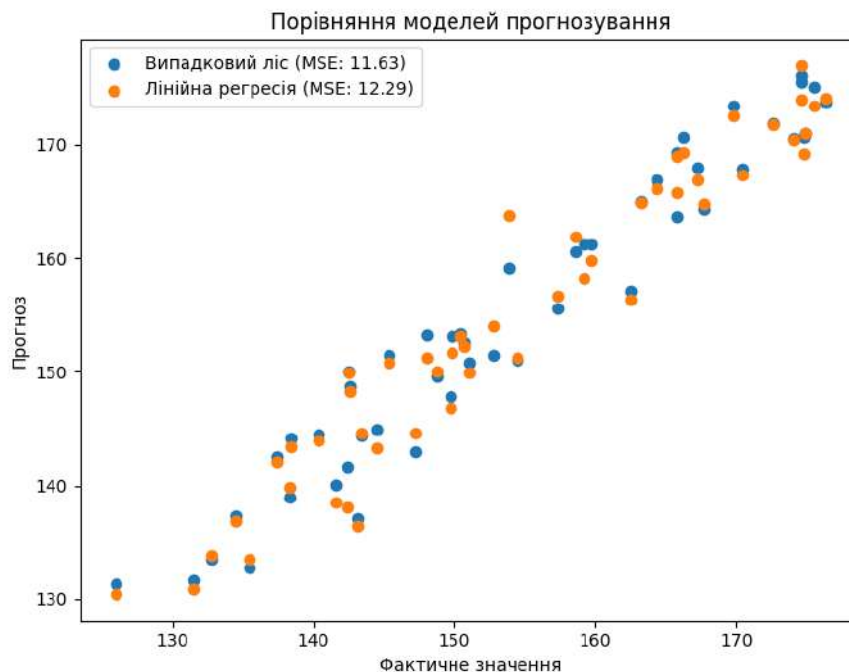


Рис. 4 – Порівняння моделей прогнозування

У даному експерименті використовувалися дані щодо цін акцій компанії Apple (AAPL) за певний період часу. Порівнювані моделі – випадковий ліс та лінійна регресія – були застосовані для прогнозування цінних показників.

Обидві моделі були навчені на однакових даних та протестовані на тестовому наборі даних. Оцінка точності моделей здійснювалась за допомогою метрики середньоквадратичної помилки (MSE) [7, 8].

Порівняльний аналіз вказав на те, що модель випадкового лісу показала MSE: 11,63, в той час як лінійна регресія – MSE: 12,29. За результатами тестування можна зробити висновок про те, що модель випадкового лісу у цьому конкретному випадку демонструє більшу точність прогнозування цінних показників на фінансовому ринку порівняно з моделлю лінійної регресії. Такий результат може бути обумовлений складністю взаємозв'язків у фінансових даних, наявністю нелінійних залежностей, а також більшою адаптивністю моделі випадкового лісу до різних ринкових умов.

Цей експеримент підкреслив важливість вибору оптимальної моделі для конкретної задачі прогнозування на фінансовому ринку та підкреслив переваги використання моделі випадкового лісу у цьому контексті.

Для вивчення впливу обсягу навчальної вибірки на точність прогнозування на фінансовому ринку проведено дослідження зі змінним обсягом даних, що використовувалися для тренування моделі [5, 8].

Модель прогнозування, заснована на випадковому лісі, була навчена на різних об'ємах вхідних даних. Розглянуті були різні розміри навчальних вибірок, що охоплювали різні періоди години на фінансовому ринку. Для шкільного обсягу даних було проведено аналіз точності прогнозування.

У результаті експерименту було виявлено, що точність моделі прогнозування має суттєву залежність від обсягу навчальних даних. Під час зменшення обсягу даних для навчання, точність моделі також зменшується. Однак при збільшенні обсягу даних точність моделі зазвичай підвищується до певної межі, після якої збільшення обсягу даних не призводить до суттєвого зростання точності.

На рис. 5 подано графічне зображення порівняльного аналізу результатів моделей прогнозування.

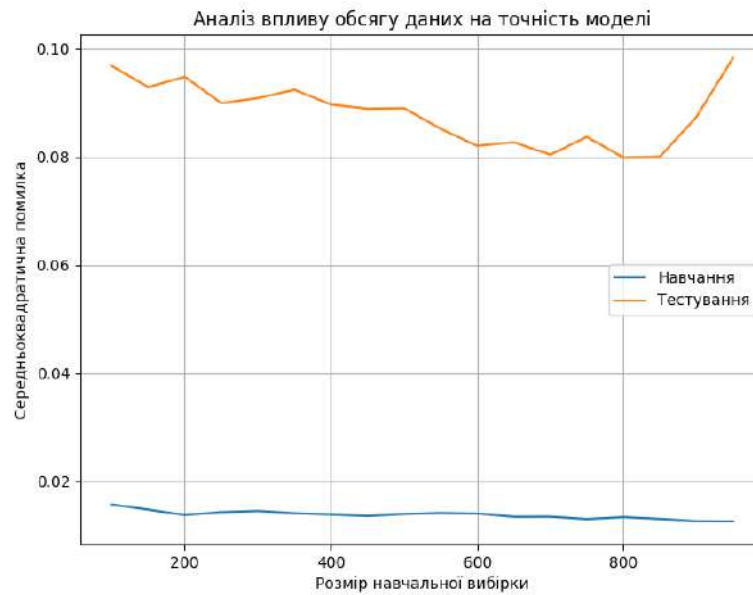


Рис. 5 – Аналіз впливу обсягу даних на точність моделі

Під час дослідження встановлено, що для даної задачі прогнозування оптимальним обсягом даних для навчання є розмір, що дозволяє отримати оптимальний баланс між точністю моделі та обчислювальною складністю. У даному випадку оптимальний обсяг даних складає близько 80% від загального обсягу.

Висновки

В результаті виконання роботи було створено програму, яку можна використовувати як бібліотеку для дослідження параметрів алгоритму випадкового лісу для прогнозування фінансового ринку. В результаті дослідження визначено, що значення середньоквадратичної помилки MSE моделі прогнозування, що базується на генетичному алгоритмі, є мінімальними (5.7 - 6.0) при кількості дерев 30, 140, 200 при всіх значеннях глибини дерев в діапазоні від 5 до 20, з кроком 5. Запропонована модель є працездатною в різних ринкових умовах та здатна до адаптації до різноманітних сценаріїв. При порівнянні модель випадкового лісу у цьому конкретному випадку демонструє більшу точність прогнозування цінних показників на фінансовому ринку порівняно з моделлю лінійної регресії. За результатами проведених експериментів також визначено, що оптимізації розміру навчаючої вибірки для досягнення оптимальних результатів прогнозування на фінансовому ринку є важливою. Оптимальний обсяг навчаючої вибірки, за допомогою якої можна отримати найбільш точні прогнозування на фінансовому ринку, складає близько 80% від загального обсягу даних. Великий обсяг даних може покращити точність моделі, але тільки до певної межі, після чого подальше збільшення обсягу може не мати значного впливу на результати.

Перелік використаних джерел:

1. Poon S.H., Granger C.W. Forecasting volatility in financial markets: A review. *Journal of economic literature*. 2003. Vol. 41(2). Pp. 478-539. DOI: <https://doi.org/10.1257/002205103765762743>.
2. Moody J., Saffell M. Learning to trade via direct reinforcement. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 2001. Vol. 12. Iss. 4. Pp. 875-889. DOI: <https://doi.org/10.1109/72.935097>.
3. Géron A. Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems. 2nd ed. O'Reilly Media. 2019. 856 p.
4. Mitchell M. Artificial intelligence: a guide for thinking humans. Farrar, Straus and Giroux, 2019. 336 p.
5. Goldberg D. Universe! A course in survival among black holes, time paradoxes, quantum uncertainty, 2016. 264 p.

6. Smith M.D., Telang R. Streaming, sharing, stealing : big data and the future of entertainment. 2016. Cambridge, MA : MIT Press. 232 p.
7. Graduate studies in mathematics. American Mathematical Society, 2018. Vol. 195: Combinatorial reciprocity theorems: an invitation to enumerative geometric combinatorics / M. Beck, R. Sanyal. 312 p.
8. Commons M.L., Goldberg D. Clinical Approaches to Adult Development. 1996. 372 p.

References:

1. S.H. Poon, and C.W. Granger, «Forecasting volatility in financial markets: A review», *Journal of economic literature*, vol. 41(2), pp. 478-539, 2003. doi: **10.1257/002205103765762743**.
2. J. Moody, and M. Saffell, «Learning to trade via direct reinforcement», *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 12, iss. 4, pp. 875-889, 2001. doi: **10.1109/72.935097**.
3. A. Géron, *Hands-on machine learning with Scikit-Learn, Keras, and TensorFlow: concepts, tools, and techniques to build intelligent systems*. O'Reilly Media Publ., 2019.
4. M. Mitchell, *Artificial intelligence: a guide for thinking humans*. Farrar, Straus and Giroux Publ., 2019.
5. D. Goldberg. *Universe! A course in survival among black holes, time paradoxes, quantum uncertainty*. 2016.
6. M.D. Smith, and R. Telang, *Streaming, sharing, stealing: big data and the future of entertainment*. Cambridge, MA, USA: MIT Press Publ., 2016. 232 p.
7. M. Beck, and R. Sanyal. «Combinatorial reciprocity theorems: an invitation to enumerative geometric combinatorics», in *Graduate Studies in Mathematics*, vol. 195, American Mathematical Society, 2018.
8. M.L. Commons, and D. Goldberg, *Clinical approaches to adult development*. 1996.

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

Стаття надійшла 18.09.2023

Стаття прийнята 23.10.2023

УДК 004.415:551.509

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.299988

© Тузенко О.О.¹, Сідун Н.М.², Волобуєв Є.С.³

**ПРОЕКТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АТМОСФЕРИ**

В даній статті розглянуто процес проектування вебдодатку, який дозволить аналізувати екологічні дані, зокрема заміри концентрацій певних забруднюючих речовин у повітрі, за допомогою апарату вейвлет-перетворень. Для покращення екологічної обстановки та попередження неблагополучних екологічних ситуацій необхідно здійснювати моніторинг стану навколишнього середовища. Екологічний моніторинг включає комплексну систему спостережень за станом навколишнього середовища, оцінку результатів спостережень, складання екологічного прогнозу з урахуванням впливу природних і антропогенних факторів. Дані моніторингу служать основним джерелом інформації для прийняття екологічно значущих рішень. Екологічні дані є стохастичними та відзначаються винятковою випадковістю, прямо чи

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-4920-9417, tuzenkoaa@gmail.com

² асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0001-8343-1273, natalya.sidun@gmail.com

³ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

опосередковано залежать від багатьох параметрів. Такі дані складно аналізуються за допомогою класичних математичних методів, а в деяких випадках, коли випадковість та розрізненість даних є високою, аналіз за допомогою аналітичних методів та пошук залежностей є неможливим. Дані про заміри концентрацій забруднюючих речовин, виконаних через певні проміжки часу, утворюють часові ряди. В даній роботі для аналізу часових рядів використовується інструментарій вейвлет-перетворень як дискретних, так і безперервних. На основі створеної математичної моделі виконано проектування вебдодатку для моніторингу стану атмосфери. Було зроблено моделювання архітектури проекту, а саме побудовано діаграма класів, діаграма компонентів, діаграма активності. Дане програмне забезпечення повинно бути у вигляді крос-платформного додатку, який встановлюється окремо. Було проаналізовано, обґрунтовано та прийнято рішення щодо написання цього додатку на мові програмування Python, з використанням бібліотек, які спрямовані на реалізацію математичних статистичних функцій, а саме бібліотек NumPy, Math, Statistics, а також PyWv для допомоги у реалізації математичного апарату вейвлетів. Даний додаток дозволить аналізувати поточні та історичні дані з декількох джерел для того, щоб аналізувати тенденції до змін у стані атмосферного повітря.

Ключові слова: повітряний басейн, екологічні дані, стохастичні дані, часовий ряд, вейвлет-перетворення, апроксимація, дискретні вейвлет-перетворення, безперервні вейвлет-перетворення, Python, NumPy, PyWv, MySQL, matplotlib.

O.A. Tuzenko, N.N. Sidun, Y.S. Volobuiev. Designing of the software for atmospheric environment condition monitoring. In current article a process of development of an application for ecological data analysis was researched, particularly pollutants concentration measurements using wavelet transform apparatus. To improve the ecological situation and preventing harmful ecological event it is needed to monitor the condition of environment. Ecological monitoring contains a complex system of observations of current environment conditions, observations' results processing and analysis, creating ecological prognosis including natural and anthropogenic factors. Monitoring data serves as a main source of information for making ecologically significant decisions. Ecological data is stochastic and are extremely random, are known by extraordinary dissipation, directly or indirectly depend on numerous parameters. This data is hard to analyze with methods of classical mathematic, sometimes, when the randomness of the data is high, it could be even impossible. Pollutant's concentration measurements data makes a time series. In current paper for the analysis of the time series wavelet transform tools were used, either the discrete version or the continuous one, based on those a mathematical model of the process was created. Object-oriented modelling of project's architecture was created based on provided mathematical model, particularly, classes, components and activity diagrams were built. The application was developed as a cross-platform stand-alone app. After the analysis it was proved to be reasonable to write the application in Python programming language using libraries for mathematical and statistical functions, particularly NumPy, Math, Statistics, and additionally PyWv for wavelet usage assistance. Current application allows to process ongoing and historical data from multiple sources to analyze tendencies of changes in atmosphere condition.

Key words: air basin, ecological data, stochastic data, time series, wavelet transform, approximation, discrete wavelet transform, continuous wavelet transform, Python, NumPy, PyWv, MySQL, matplotlib.

Постановка проблеми. Різке зростання рівня антропогенного впливу на навколишнє середовище в поєднанні з низькою ефективністю і роз'єднаністю природоохоронних заходів призвело в останні десятиліття до значного погіршення екологічної обстановки. У зв'язку із цим, актуальною є проблема зниження екологічного збитку й управління екологічною ситуацією. Поряд з оцінюванням і контролем концентрацій шкідливих домішок у повітрі виникає необхідність здійснення короткострокового прогнозу забруднення повітря і використання його для регулювання промислових викидів. Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря проводиться

шляхом порівняння концентрацій шкідливих домішок, що знаходяться в повітряному середовищі, з гранично допустимими концентраціями шкідливих речовин. Джерела забруднення атмосфери розрізняються по потужності викиду, висоті викиду, температурі газів. До потужних джерел забруднення належать виробництва типу металургійних та хімічних заводів, заводів будівельних матеріалів, теплові електростанції та ін. До дрібних джерел забруднення – невеликі котельні та підприємства місцевої та харчової промисловості, труби пічного опалення, тощо. Значна кількість палива спалюється автомобільним, залізничним, морським, річковим та авіаційним транспортом. Багато дрібних джерел може значно забруднювати повітря.

Залежно від своєї природи, концентрації, часу впливу на організм людини вони можуть викликати найнесприятливіші наслідки. Медики та екологи встановили прямий зв'язок між зростанням кількості людей, які хворіють на алергію, бронхіальну астму, рак та інші захворювання, та погіршенням екологічної обстановки.

Доцільним у даній ситуації є розробка математичних методів, алгоритмів і програмного забезпечення для дослідження даних про рівень забруднення атмосфери.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Різноманітні методи дослідження рівнів забруднення за допомогою методів комп'ютерного та математичного моделювання використовуються у сервісах моніторингу стану атмосфери чи водних ресурсів, додатках погоди, а також у наукових дослідженнях у сферах, пов'язаних з екологією. На основі зібраних даних вираховуються коефіцієнти, наприклад, коефіцієнт якості повітря по всьому світу [1].

Дані про концентрацію забруднюючих речовин відрізняються випадковістю та відсутністю сталих залежностей, окрім того, навіть в умовах, коли джерела забруднення є стабільними, концентрація речовин в атмосфері є погано передбачуваною, тому що залежить від багатьох різноманітних параметрів з різним впливом на кінцевий результат.

Для дослідження такого роду стохастичних даних та виокремлення трендів, залежностей та для передбачення змін у якості повітря, потрібно вирішити задачу опису та прогнозування часових рядів, сформованих сукупністю спостережень випадкового процесу у техніці, економіці, соціології чи медицині.

Оскільки процеси, які досліджуються, є неоднорідними, виникає потреба у виборі якомога точнішого математичного інструментарію. Цей процес, а також методи дослідження в галузі моделювання атмосферних процесів, описані в фундаментальній роботі Д. Вілкіса [2].

Серед методів розв'язання цієї задачі виокремлюють поліноміальну апроксимацію і розкладання в ряд за системою координатних (базисних) функцій. Залежно від характеру спостережуваного процесу як базисні функції вибирають або ортогональні многочлени (Ерміта, Лагерра, Чебишева тощо), або систему гармонійних коливань (ряд Фур'є). Однак ці методи не забезпечують належну точність апроксимації даних спостережень процесів, що характеризуються локальними особливостями.

На сьогоднішній день для більш якісного аналізу часових рядів широко використовується математичний апарат вейвлет-перетворення, який базується на використанні функцій, узгоджених з компонентами, що діють в різні проміжки часу. Основи вейвлет-аналізу викладені в роботах А. Гроссмана і Ж. Морле в галузі аналізу акустичних сигналів [3]. Вейвлет-перетворення використовується для аналізу нестационарних сигналів і побудови гетерогенних функцій. Вейвлети уявляють собою короткі хвилеподібні функції з нульовою інтегральною сумою, відкладені на осі аргументу (незалежні змінні), інваріантні за зсувом і лінійно. Приклад застосування вейвлет-перетворення до опису гетерогенних процесів добре досліджено в роботі [4]. Вейвлет-перетворенню як сучасному інструменту аналізу неперіодичних часових рядів у різних галузях останнім часом присвячено кілька робіт. Основи застосування викладено і детально описано в академічному підручнику [5], а у роботах [6, 7] розглядаються вейвлет-перетворення як універсальний інструмент для аналізу сигналів та інших часових рядів, залежних від часу.

Мета дослідження – проектування програмного забезпечення для моделювання забруднення атмосфери, спираючись на дані спостережень щодо концентрації забруднюючих речовин у атмосфері.

Виклад основного матеріалу. Розуміння динаміки екосистем та їхньої реакції на зовнішні впливи є ключовим елементом для розроблення ефективних стратегій сталого розвитку та збереження біологічного різноманіття. Моніторинг стану атмосфери – система спостережень за станом забруднення атмосферного повітря, що здійснює збір і накопичення даних про концентрації

деяких атмосферних аерозолів на постах спостережень у низці міст. У викидах підприємств різних галузей промисловості та транспорту міститься велика кількість різних шкідливих домішок. Майже з усіх джерел в атмосферу надходять діоксид сірки (SO_2), пил, оксид вуглецю (CO), оксиди азоту (NO , NO_2). Методика досліджень полягає у тому, що протягом тривалих періодів часу на постах спостережень виконуються періодичні заміри концентрацій забруднювальних речовин. Накопичені дані обробляються різними способами, і на підставі результатів обробки робляться висновки про динаміку процесів, що відбуваються.

У теперішній час для більш якісного аналізу часових рядів широко використовується математичний апарат вейвлет-перетворення, головною областю застосування якого є аналіз та обробка сигналів та функцій, нестационарних за часом або неоднорідних у просторі. Вейвлети мають вигляд коротких хвильових функцій з нульовим інтегральним значенням, локалізованих по вісі аргументів (незалежних змінних), інваріантних до зсуву та лінійних до операцій масштабування. Саме завдяки зміні масштабів вейвлети здатні виявити різницю в характеристиках сигналу на різних масштабах, а за допомогою зсуву – проаналізувати властивості сигналу в різних точках на всьому вивченому інтервалі. Вейвлет-перетворення надають досить широкі можливості для дослідження експериментальних даних та вимірів, таких як концентрація речовин у середовищах, статистичні дані різного походження. Хоча підходи до вирішення задач та пошуку трендів і залежностей загалом дуже подібні, існує суттєва різниця у дослідженні повітряних, рідинних та твердих середовищ, тому складно відшукати єдиний підхід до дослідження та систематизації даних, ще складніше створити універсальний інструмент для такого дослідження. Тому для того, щоб сконцентруватись на особливостях досліджень у конкретному середовищі і виокремити усі можливі особливості даних, було прийнято рішення зосередитись тільки на дослідженні концентрації забруднюючих речовин у повітрі, без урахування значних відхилень у параметрах повітряних басейнів, та враховуючі тільки ті особливості, вплив яких на досліджувані процеси є максимальною значущим.

У основі вейвлет-перетворень лежить використання двох безперервних взаємозалежних функцій:

– вейвлет-функція $\psi(t)$ (базисна функція або материнський вейвлет), яка дозволяє виділяти деталі сигналу та його локальні особливості. Вибір цієї функції є неоднозначним і залежить від конкретної задачі. Зазвичай для аналізуючих вейвлетів вибираються функції, що добре локалізовані у часовій та частотній областях;

– скейлінг-функція $\varphi(t)$, яка здійснює грубе наближення сигналу (апроксимація).

Такий математичний апарат дозволяє проводити весь цикл обробки часових експериментальних рядів концентрацій забруднюючих речовин, починаючи від первинної обробки та аналізу і закінчуючи прогнозуванням, відновленням втрачених значень часових рядів даних без проведення інших проміжних перетворень.

При застосуванні вейвлет-перетворень існують два основних підходи:

– алгоритми, що базуються на роботі з коефіцієнтами розкладання (первинна обробка, фільтрація, стиснення, прогнозування тощо);

– алгоритми, що базуються на багаторозмірному аналізі досліджуваного сигналу (розгляд внутрішньої структури аналізованих даних).

Перші використовують формули дискретного вейвлет-перетворення, другі – неперервного. *Безперервне вейвлет-перетворення*

Вейвлет-перетворення одновимірного сигналу $f(t)$ полягає в його розкладення по базису, сконструйованому з базисної функції вейвлета – Ψ за допомогою масштабних змін a та перенесень b :

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt. \quad (1)$$

Кожна з функцій цього базису характеризує певний часовий масштаб a та його локалізацію у часі b . Таким чином, вейвлет-перетворення забезпечує двовимірне розгортання досліджуваного сигналу, при цьому масштаб і координата розглядаються як незалежні змінні.

В результаті цього з'являється можливість аналізувати властивості сигналу одночасно у часовому та частотному просторах. Вибір базису визначається тим, яку інформацію необхідно витягнути з часового ряду. Реальні базиси часто конструюються на основі похідних Гауса

$\psi_m(t) = (-1)^m \frac{d^m}{dt^m} \left(e^{-t^2/2} \right)$. Для виявлення періодичностей як базисну функцію часто використовують вейвлет Морле. Він представляє собою плоску хвилю, модульовану гаусіаною:

$$\psi(t) = \frac{1}{2\pi} e^{i\omega t} e^{-t^2/2}. \quad (2)$$

Для аналізу з допомогою безперервного вейвлет-перетворення часовий ряд $\tilde{x}(t_1), \tilde{x}(t_2), \dots, \tilde{x}(t_n)$ викладається у вигляді:

$$\tilde{x}(t) = x(t_k) - x_0, \quad x_0 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x(t_k), \quad k = \overline{1, n}, \quad \forall t \in [t_{k-1}, t_k]. \quad (3)$$

Використавши у даному часовому ряду безперервне вейвлет-перетворення, отримаємо:

$$W(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{t_1}^{t_n} \tilde{x}(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt = \frac{1}{\sqrt{s}} \sum_{k=1}^{n-1} \tilde{x}(t) \psi^* \left(\frac{t-\tau}{s} \right) dt, \quad (4)$$

де * – комплексне сполучення;

ψ – аналізуючий вейвлет;

s – масштаб, $a \geq 1$;

τ – зсув за часовою віссю.

Результатом вейвлет-аналізу одновимірного ряду є масив амплітуд вейвлет-перетворення – значень коефіцієнтів $W(a, b)$. Розподіл цих значень у просторі надає інформацію про зміну відносного внеску компонент різної частоти у часі, графік цього розподілу – вейвлетограма.

Дискретне вейвлет-перетворення

У теорії цифрової обробки будь-який інформаційний сигнал зазвичай розглядається як сума різних компонент: регіональної функції тренду, циклічних складових з певним періодом повторення, локальних особливостей різного порядку. Інструментом декомпозиції сигналів на такі компоненти з урахуванням роздільної здатності за часом і за частотою, а також реконструкції сигналів з отриманих компонент, є дискретне вейвлет-перетворення, яке працює з дискретними значеннями параметрів a (масштаб) та b (зсув), що, як правило, виражаються у вигляді степеневих функцій. Розкладання сигналу здійснюється за ортогональним базисом, сформованим зсувами та кратномасштабними копіями вейвлет-функції (вейвлети Добеші, симлети, коїфлети і інші). Результат представляється у вигляді суми апроксимуючих та деталізуючих коефіцієнтів.

Обробка та аналіз часових рядів концентрацій забруднюючих речовин розпочинається з процедури згладжування. Це можна здійснити, видаливши деталізуючі коефіцієнти високочастотних рівнів, оскільки вони містять мінімум інформації про основні тенденції зміни концентрацій забруднюючих речовин. Шумові компоненти, включаючи великі випадкові викиди значень сигналів, можна також розглядати як множину локальних особливостей сигналів. Встановлюючи певний поріг для їх рівня та відкидаючи відповідні деталізуючі коефіцієнти, можна не лише знижувати рівень шумів, а й встановлювати порогові обмеження на декількох рівнях розкладання, враховуючи конкретні характеристики шумів та сигналів для різних типів вейвлетів. Це дозволяє створювати адаптивні системи очищення сигналів від шумів, залежно від їх характеристик.

Регресійний аналіз з використанням вейвлет-перетворень

Вейвлет-перетворення дозволяє здійснювати регресійний аналіз часових рядів концентрацій забруднюючих речовин з метою знаходження функції регресії та подальшого прогнозування або відновлення втрачених значень концентрацій забруднюючих речовин за допомогою цього аналізу. Прогнозування часових рядів є складною задачею через великі обсяги вихідних даних, наявність флуктуацій сигналу або значну нелінійність у даних. Методами прогнозування можуть бути використані метод найменших квадратів, метод авторегресії, метод регресійного аналізу та інші.

Ціллю регресійного аналізу є встановлення форми залежності. Вибір моделі регресії визначається припущенням про форму залежності $Y = f(x)$. Оцінка функції регресії на основі вейвлетів включає наступні кроки:

1. Перетворення даних (X, Y) у дані (X_b, Y_b) , шляхом розділення області значень на малі проміжки (значення X_b рівномірно розподілені).

2. Вейвлет-розклад сигналу Y_b , за допомогою швидких алгоритмів.

3. Для згладжування виконується порогова обробка деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів за алгоритмом:

- розкладення початкового сигналу на апроксимуючі та деталізуючі коефіцієнти;
- порогова обробка вейвлет-коефіцієнтів;
- здійснюється вейвлет-реконструкція на основі початкових апроксимуючих коефіцієнтів та модифікованих деталізуючих.

4. Відновлення оцінки функції з оброблених вейвлет-коефіцієнтів за допомогою швидких алгоритмів.

5. Перемасштабування отриманої функції та інтерполяція функції на кожному проміжку.

Для відновлення пропущених та прогнозування невідомих значень часового ряду концентрацій за допомогою функції регресії сигналу необхідно:

- усереднити значення концентрацій часового ряду за інтервалами рівної тривалості;
- виконати вейвлет-розклад усередненого ряду;
- побудувати функції регресії за усередненими апроксимуючими та деталізуючими коефіцієнтами;
- інтерполювати та екстраполювати сигнал регресійної функції;
- відновити та спрогнозувати шляхом зворотного вейвлет-перетворення;
- зберегти результати та прийняти рішення.

У роботі [8] наведено математичну модель, яка надає можливість не тільки виявити основні тренди та циклічні коливання в екологічних даних, а й дослідити їхні причинно-наслідкові зв'язки. Аналіз взаємозв'язків між різними змінними в екосистемі дає змогу виявити ключові чинники, що визначають її стан і функціонування. Таким чином, розробка більш точних і адаптивних моделей дасть змогу не тільки передбачати зміни в екосистемах, а й виробляти ефективні стратегії управління ресурсами та охорони природи. Крім того, використання математичних моделей на основі вейвлет-перетворення дає змогу виявляти приховані шаблони і неочевидні залежності в даних, що може бути критично важливим для виявлення попереджувальних сигналів про можливі екологічні кризи або несприятливі зміни в навколишньому середовищі. Такі моделі можуть слугувати основою для розроблення ранніх систем попередження та екологічного моніторингу, що зрештою сприяє збереженню природних ресурсів і поліпшенню якості життя нашого суспільства.

На основі математичної моделі можна створити програмне забезпечення, що дозволить моделювати, зберігати, аналізувати та візуалізувати дані екологічних досліджень. Дані, зібрані за допомогою спостережень, необхідно зберігати у вигляді, придатному для подальшої обробки. Одним з найзручніших способів представлення даних такого типу є реляційні бази даних, в яких зберігаються результати замірів концентрації забруднюючих речовин, виконані у певний час доби, та додаткові дані щодо географічного положення станції, що виконує заміри, та погодних умов у момент виміру.

Для успішної реалізації поставленого завдання спочатку необхідно виконати моделювання об'єкта проектування. Для цього було створено об'єктно-орієнтовану модель, яка представляє кожен з аспектів дослідження в якості окремої сутності, відносини між якими дозволяють описувати дослідження і робити висновки щодо впливу окремих факторів, таких як погодні умови, географічне розташування чи їх комбінації на коливання концентрації тих чи інших забруднювачів, прогнозувати зміни якості повітря і екологічної обстановки. На рис. 1 представлена діаграма класів об'єктно-орієнтованої моделі програми. Окремо слід відзначити відносини між забруднюючими речовинами та вимірами, тому що, наслідуючи реляційну модель, програмне забезпечення виокремлює клас для функціоналу заміру та збереження значення концентрації для кожної окремої забруднюючої речовини.

Для розрахунків з використанням математичного апарату вейвлетів, а також для обробки числових даних та їх візуалізації, необхідні спеціалізовані програмні інструменти. Сучасні програмні продукти надають доступ до таких інструментів, як у складі математичних пакетів, наприклад, MATLAB, Mathematica, але для підготовки даних до аналізу, потрібно залучати

додаткові засоби, наприклад, спеціалізовані пакети статистичного аналізу або інструменти, які реалізують чисельні методи.

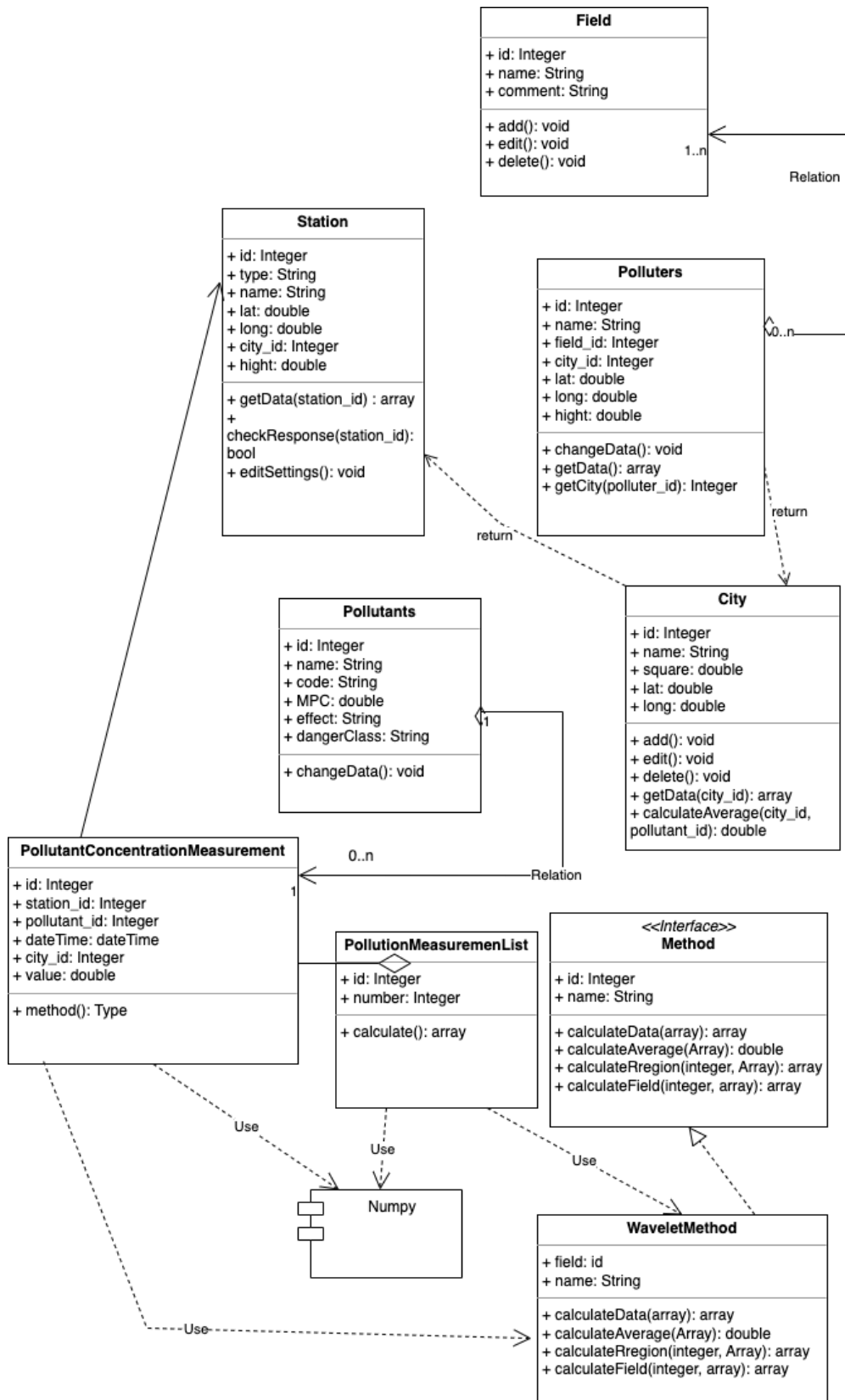


Рис. 1 – Діаграма класів

Щоб уніфікувати досвід розробника і зменшити складність програмного продукту, було вирішено звернутись до програмного стеку на основі мови програмування Python. Численні сучасні бібліотеки, які орієнтовані на математичні статистичні розрахунки та різноманітні методи аналізу даних і мають широкий математичний апарат, роблять Python зручним інструментом для дослідника. Задачу реалізації алгоритму, заснованого на вейвлет-перетвореннях, можна вирішити суто засобами мови, але доцільним є використання спеціалізованих бібліотек для підготовки даних, апроксимації, реалізації вейвлет-перетворення і візуалізації результатів дослідження.

На рис. 2 представлено стек бібліотек і модулів, який входить в програмне забезпечення для вирішення різноманітних задач. Ecowavelets є програмним модулем, який саме вирішує задачу аналізу екологічних часових рядів концентрації та прогнозування змін цих параметрів з часом. Він спирається на ruwt, що є спеціалізованою бібліотекою для роботи з вейвлет-перетвореннями різних типів, numpy для підтримки математичних операцій, а також бібліотеки Math і Statistics, що надають широкий апарат для статистичного аналізу вибірок даних. Для візуалізації даних було обрано Matplotlib, який дозволить побудувати у поліграфічній якості майже будь-яку залежність або представити експериментальні дані у двох чи трьох вимірах.

Для задач зберігання даних залучений комплекс бібліотек для управління базами даних та СУБД MySQL, а також модуль-конектор, що забезпечує зв'язок між базою даних і розрахунковим модулем.

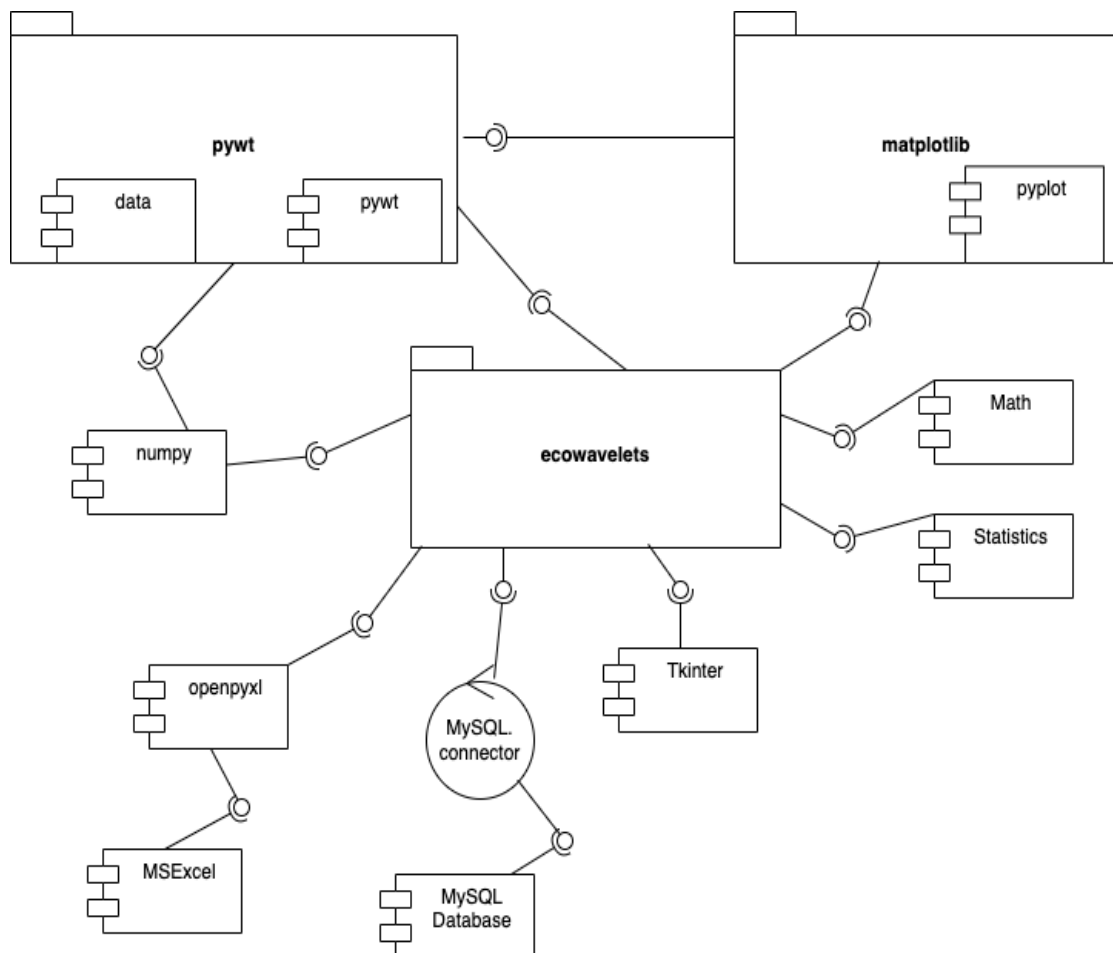


Рис. 2 – Діаграма компонентів

Процес аналізу екологічних даних для прогнозування концентрації речовин і екологічної ситуації у цілому є багатоступеневим. Перш за все необхідно зібрати та підготувати дані до аналізу. Оскільки дані збираються з декількох джерел та не мають єдиного стандартного формату представлення, першим кроком є збір та підготовка даних, а саме приведення їх до єдиного

формату. На рис. 3 надана діаграма активності, яка відображає повний цикл дій для виконання дослідження.

Окремо слід зазначити, що для виконання розрахунків необхідні два різноформатні набори даних: дані спостережень концентрації забруднюючих речовин та метеорологічні дані. Обидва набори формуються з неуніфікованих джерел. Дані, які були отримані, потребують форматування, а в деяких випадках фільтрації та підготовки. Після завершення процесу підготовки дані передаються для побудовання часового ряду, а потім для аналізу ряду за допомогою вейвлет-перетворень. Результати розрахунків передаються для зберігання та візуалізації.

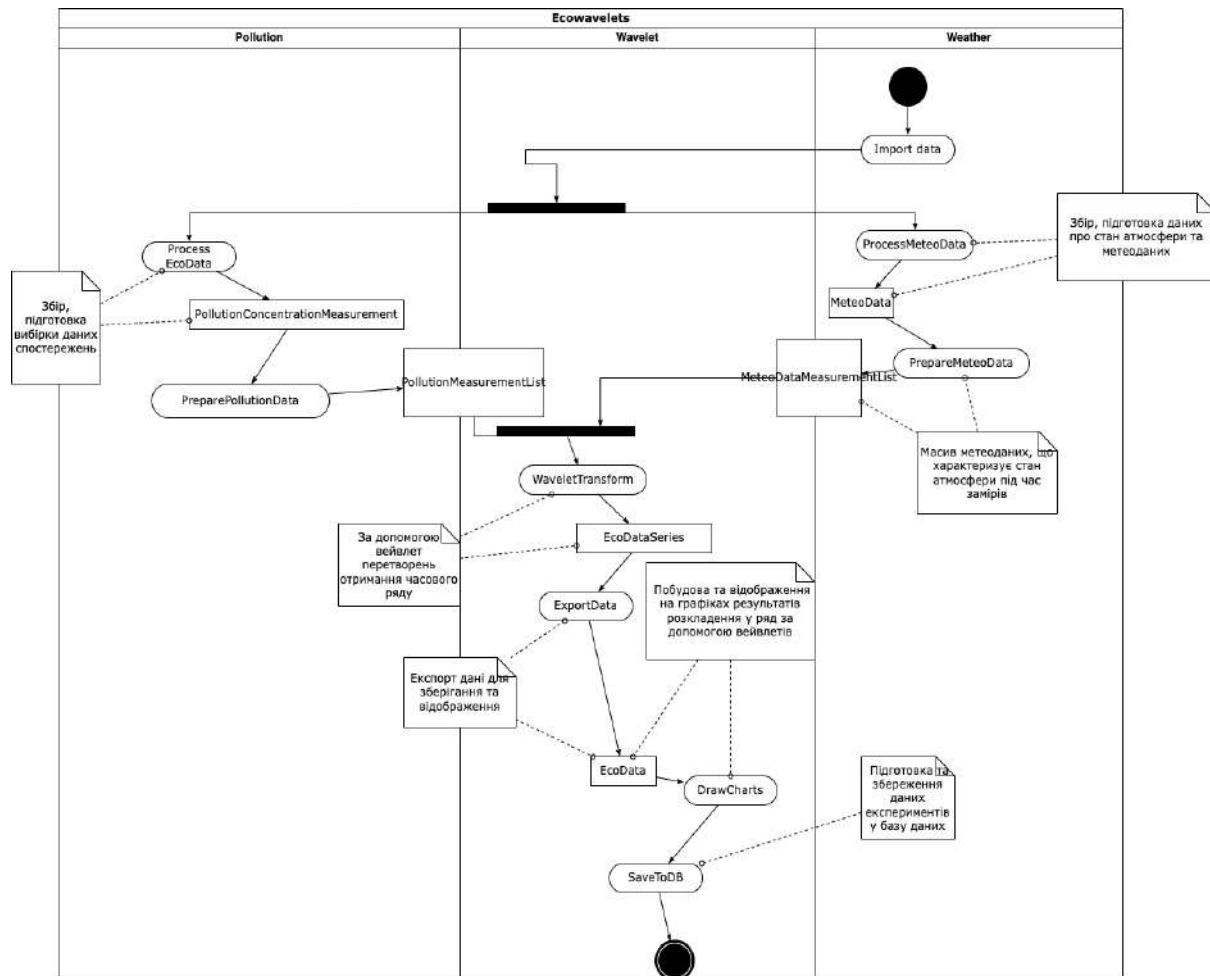


Рис. 3 – Діаграма активності

У подальшому планується на основі створеної об'єктно-орієнтованої моделі розробити програмне забезпечення для аналізу даних щодо концентрації речовин у атмосферному повітрі, яке дозволить узагальнити екологічні дані. Спираючись на оброблені та узагальнені дані, можливо спрогнозувати зміни у екологічних умовах, зробити висновки щодо внеску підприємств, які здійснюють викиди в повітря, інших джерел забруднення, а також оцінити вплив погодних та географічних факторів на коливання концентрації речовин з часом. Уніфікація даних дозволяє вдосконалити прогнози, спираючись на поточні та історичні дані з різних регіонів світу, порівняти стан повітря у місцях зі схожими первинними умовами і зробити висновки про необхідні заходи для покращення якості повітря і їх потенційну ефективність в місцях з різною сукупністю умов.

Висновки

1. Проаналізовано основні джерела, які призводять до забруднення повітря. Виявлено, що екологічні дані, зокрема дані концентрацій забруднюючих речовин у повітрі, мають вкрай

випадковий характер, залежні від багатьох факторів природнього та антропогенного характеру, тому складно піддаються аналізу.

2. На основі створеної математичної моделі аналізу часових рядів на основі вейвлет-перетворень спроектовано програмне забезпечення, розробка якого надасть можливість відобразити криву змін для досить складної багатофакторної залежності.

3. Прийнято рішення розробляти програмне забезпечення на базі мови Python та математичних бібліотек Math, Statistics та NumPy, а також спеціалізованої бібліотеки для роботи з вейвлет-перетвореннями PyWv, що дозволить використати для комп'ютерного експерименту різні типи вейвлетів.

Перелік використаних джерел:

1. Beijing Air Pollution: Real-time Air Quality Index. URL: <https://aqicn.org/> (дата звернення 05.02.2023).
2. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. Amsterdam : Elsevier, 2020. 818 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03921-6>.
3. Grossmann A., Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*. 1984. Vol. 15. Iss. 4. Pp. 723-736. DOI: <https://doi.org/10.1137/0515056>.
4. Pannekoucke O. Heterogeneous correlation modeling based on the wavelet diagonal assumption and on the diffusion operator. *Mathematical Advances in Data Assimilation (MADA)*. 2009. Vol. 137. Iss. 9. Pp. 2995-3012. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009MWR2783.1>.
5. Chun-Lin L. A tutorial of the wavelet transform. Taipei : NTUEE, 2010. 71 p.
6. Burrus C.S. Wavelets and wavelet transforms. Houston : Rice University, 2015. 311 p.
7. Wavelet analysis of ecological time series / B. Cazelles et al. *Oecologia*. 2008. Vol. 156. Pp. 287-304. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-008-0993-2>.
8. Tuzenko O., Sidun N. Mathematical modeling of ecological observations data using time series analysis methods. *18th IEEE International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2023, Lviv, 19-21 October 2023*. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT61576.2023.10324166>.

References:

1. Beijing Air Pollution: Real-time Air Quality Index [Online]. Available: <https://aqicn.org/>. Accessed on: February 05, 2023.
2. D.S. Wilks, *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Publ., 2020.
3. A. Grossmann, and J. Morlet, «Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape», *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, vol. 15, iss. 4, pp. 723-736, 1984. **doi: 10.1137/0515056**.
4. O. Pannekoucke, «Heterogeneous Correlation Modeling Based on the Wavelet Diagonal Assumption and on the Diffusion Operator», *Mathematical Advances in Data Assimilation (MADA)*, vol. 137, iss. 9, pp. 2995-3012, 2009. **doi: 10.1175/2009mwr2783.1**.
5. L. Chun-Lin, *A tutorial of the wavelet transform*. Taipei, Taiwan: NTUEE Publ., 2010.
6. C.S. Burrus, *Wavelets and wavelet transforms*. Houston, USA: Rice University Publ., 2015.
7. B. Cazelles, et. al., «Wavelet analysis of ecological time series», *Oecologia*, vol. 156, pp. 287-304, 2008. **doi: 10.1007/s00442-008-0993-2**.
8. O. Tuzenko, and N. Sidun, «Mathematical modeling of ecological observations data using time series analysis methods», in *18th IEEE International Conference on Computer Science and Information Technologies, CSIT 2023, Lviv, 2023*, pp. 1-4. **doi: 10.1109/CSIT61576.2023.10324166**.

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

Стаття надійшла 30.09.2023
Стаття прийнята 29.10.2023

© Балалаєва О. Ю.¹, Чичкар'юв Є.А.², Зінченко О.В.³, Сергієнко А.В.⁴,
Ковальов О.О.⁵

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДОЛОГІЇ РОЗПІЗНАВАННЯ РУКОПИСНИХ СИМВОЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЗГОРТКОВИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

У роботі проведено аналіз можливостей використання нейронних мереж глибокого навчання для реалізації інформаційних систем обробки текстів, обґрунтовано перспективність даної технології та можливості її удосконалення. Розглянуто можливість використання бази рукописних цифр MNIST, а також бази рукописних букв і цифр EMNIST, а саме набору EMNIST Letters. Проведено моделювання об'єкта дослідження в нотаціях IDEF0 та IDEF3 для варіанту «AS-IS». Виявлено, що найбільше питань викликають «Побудова набору даних для навчання моделі» та «Вибір архітектури згорткової нейронної мережі». Запропоновано заходи з реінжинірингу, а саме показано доцільність використання крім відомих наборів EMNIST та MNIST додатково створеного в рамках роботи набору рукописних і курсивних шрифтів, що мають українські гліфи. Для цього обрані сучасні IT-інструменти, такі як бібліотека Pillow, Image Data Generator та пакет Scikit-Learn використано для виділення навчальних та тестових вибірок. Також крім початково запропонованих найпростіших архітектур CNN типу Lenet запропоновано використання більш складних архітектур типу AlexNet та VGG-16. З урахуванням запропонованих заходів з реінжинірингу побудовано діаграми IDEF0 та IDEF3 для варіанту «TO-BE». У роботі докладно проаналізовано результати розпізнавання рукописних українських літер та арабських цифр з використанням різних архітектур CNN з використанням для навчання синтетичного набору даних. Дослідження, представлені в роботі, проведено з використанням програмного додатку, розробленого на мові програмування Python з використанням пакету Scikit Learn, що надає користувачеві можливість розпізнати рукописний текст за допомогою багатозарового перцептрона, що проведено саме з використання розробленої програми. Обґрунтовано, що на протизвагу простим архітектурам типу Lenet доцільніше використовувати більш складні варіанти, а саме архітектуру типу VGG-16. Проведено експериментальні дослідження впливу кількості параметрів CNN різних архітектур на точність розпізнавання та час навчання нейронної мережі. Також проаналізовано результати розпізнавання символів при розпізнаванні зображень, що не належать до навчальної або тестової вибірки.

Ключові слова: розпізнавання рукописного тексту, розпізнавання символів, OCR, згорткові нейронні мережі, CNN, глибоке навчання, обробка зображень.

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1461-4399, balalaevaev@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-4362-5129, influence@meta.ua

³ д-р техн. наук, професор, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-3973-7814, zinchenkoov@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ORCID: 0000-0003-1328-2572, sergienko_a_v@pstu.edu

⁵ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро/Маріуполь, ronin732@gmail.com

O. Balalaieva, Ye. Chychkarov, O. Zinchenko, A. Serhiienko, O. Kovalov. Research and evaluation of the efficiency of handwritten character recognition methods using convolutional neural networks. The paper analyzes the possibilities of using deep learning neural networks for the implementation of text processing information systems, substantiates the prospects of this technology and the possibilities of its improvement. The possibility of using the MNIST database of handwritten digits on, as well as the EMNIST database of handwritten letters and numbers, namely the EMNIST Letters set, was considered. The research object was modelled in IDEF0 and IDEF3 notations for the «AS-IS» option. It was found that «Building a dataset for model training» and «Choosing a convolutional neural network architecture» are the most frequently asked questions. Reengineering measures are proposed, namely, the expediency of using, in addition to the well-known EMNIST and MNIST sets, a set of handwritten and italic fonts with Ukrainian glyphs, additionally created as part of the work, is shown. For this purpose, modern IT tools such as the Pillow library, Image Data Generator and the Scikit-Learn package were used to select training and test samples. Also, in addition to the initially proposed simplest CNN architectures of the Lenet type, the use of more complex architectures of the AlexNet and VGG-16 types is proposed. Taking into account the proposed reengineering measures, IDEF0 and IDEF3 diagrams were constructed for the «TO-BE» option. The paper analyzes in detail the results of recognizing handwritten Ukrainian letters and Arabic numerals using 6 different CNN architectures using a synthetic data set for training. The research presented in the work was carried out using a software application developed in the Python programming language using the Scikit Learn package, which provides the user with the ability to recognize handwritten text using a multilayer perceptron. carried out precisely using the developed program. It is justified that, in contrast to simple Lenet-type architectures, it is more appropriate to use more complex options, namely the VGG-16 type architecture. Experimental studies of the influence of the number of CNN parameters of different architectures on the recognition accuracy and training time of the neural network have been carried out. Also analyzed are the results of character recognition when recognizing images that do not belong to the training or test sample.

Key words: recognition of handwritten text, recognition of characters, OCR, convolutional neural networks, CNN, digital recognition, deep learning, image processing.

Постановка проблеми. Розпізнавання символів (оптичне розпізнавання, OCR) – технологія, яка на сьогоднішній день широко використовується. В основі цієї технології лежить процес класифікації зображень символів, які виділені на вихідному цифровому зображенні, за відповідними зразками [1].

Інформаційні технології, які використовують оптичне розпізнавання, застосовуються для вирішення широкого кола різноманітних практичних завдань: ідентифікація реєстраційних номерів транспортних засобів за зображеннями номерних знаків, що допомагає контролювати рух [2], перетворення друкованих академічних записів у текст для зберігання в електронній базі даних, декодування стародавніх написів та текстів, автоматичне введення даних шляхом оптичного сканування карт, банківських чеків тощо. Використання системи OCR дозволяє суттєво знизити ймовірність виникнення помилок та зменшити витрати часу на рутинну роботу. Найбільш складним завданням досі залишається розпізнавання рукописних написів, що потребує додаткового дослідження та удосконалення наявних методологій та технологій.

Найчастіше робота сучасних OCR ґрунтується на нейронних мережах глибокого навчання [3, 4]. Для обробки зображень широко застосовуються згорткові нейронні мережі (convolutional neural network, CNN). Це один із найпопулярніших типів глибоких нейронних мереж, за його допомогою можна ефективно розпізнавати символи, присутні на зображенні [5].

Метою даної роботи є дослідження можливостей розпізнавання українських рукописних літер та арабських цифр з використанням згорткових нейронних мереж.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Спочатку більшість досліджень була зосереджена на розпізнаванні літер латинського алфавіту, але в останні роки збільшилася частка публікацій, в яких розглядаються методи роботи з кириличними літерами, а також арабськими, казахськими, китайськими та індійськими символами тощо [6-11]. Найчастіше для аналізу методів

та технологій розпізнавання латинських рукописних літер використовує стандартний набір EMNIST [12], а автори робіт пропонують застосування різних архітектур CNN.

Однією з перших успішних спроб використання глибокого навчання для розпізнавання символів стало створення архітектури LeNet-5 [13], що наразі залишається актуальним для комп'ютерів з низькою потужністю. Наприклад, ConvNet [14] має всього 60000 навчальних параметрів, що є значно меншим, ніж у мережі AlexNet (60 млн навчальних параметрів і 650000 нейронів) [15] та мережі GoogleNet (6,8 млн навчальних параметрів) [16].

Для досягнення більш високих показників точності розпізнавання доцільно використовувати більш складні варіанти архітектур нейронних мереж. Наприклад, для БД EMNIST Letters точність більше 95% досягалася при поєднанні марківських моделей випадкових полів та CNN, а для MNIST – при використанні капсульних шарів після згортки [17, 18].

Одним із способів покращення точності розпізнавання зображень є використання моделей складнішої архітектури. Наприклад, у [19] для розпізнавання ізольованих символів запропонована згорткова нейронна мережа, що містить 14 згорткових шарів для представлення ознак символів, два шари MaxPooling для зменшення розміру ознаки або для виділення сильних ознак, один шар softmax і один шар класифікації.

Для забезпечення необхідної швидкості навчання при збільшенні числа параметрів використовують попередньо треновані моделі, хоча такий підхід має свої недоліки, тому автори [20] пропонують навчання з випадковою ініціалізацією, що буде еквівалентним за загальною тривалістю навчання. У роботі [21], розглядаючи проблему розпізнавання арабських символів, демонструються більш високі результати для моделей, створених з нуля, у порівнянні з навченими моделями. При цьому автори роблять висновок про невисоку точність для менш складних архітектур CNN при одночасній перевазі у швидкості класифікації та навчання.

Результати застосування більш складних попередньо навчених архітектур CNN розглянуто у роботі [22] на прикладі класифікації 231 рукописних символів Bangla з використанням БД CMATERdb. Розмір зображень було зменшено до 28×28 пікселів. Ці зображення були використані як вхідні дані для архітектури CNN. Швидкість навчання було встановлено рівної 0,001. У якості функції помилок було використано категоріальну крос-ентропію. Після 50 епох InceptionResNetV2 досягла найкращої точності (96,99%). Високу точність розпізнавання продемонстрували також DenseNet121 (96,55%) та InceptionNetV3 (96,20%). Авторами також показано, що найкраща точність (97,69%) забезпечується комбінуванням навчених архітектур DenseNet121, InceptionResNetV2 та InceptionNetV3. Однак практичне використання вимагає великих обчислювальних потужностей та пам'яті і тому не є оптимальним. Натомість найбільш ефективною моделлю обрано InceptionResNetV2.

Автори [23] провели тестування двох варіантів CNN з різними архітектурями, варіюючи глибину, ширину та кількість параметрів мережі, для розпізнавання символів. Перша модель складалася з трьох згорткових шарів та одного повнозв'язного шару. Друга модель походила від сімейства LeNet і складалася з двох згорткових шарів, за якими йдуть два повнозв'язкові шари. Найкращу точність результат (понад 98%) було отримано при використанні моделі, у складі якої більше згорткових шарів. Аналогічний результат отримано й у роботі [24]. Авторами досліджували три варіанти архітектури мереж CNN: Lenet-5, модифікований варіант Lenet та Alexnet CNN. Останній варіант архітектури нейронної мережі дозволив досягти точності розпізнавання символів деванагарі на рівні 99%.

Авторами [25] проведено експериментальні дослідження ефективності роботи CNN, як ResNet та VGG-16 (з використанням відсівів та аугментації), що показали високі результати точності – 98,57% та 97,14% відповідно.

У роботі [26] також відзначено більш високу досягнуту точність розпізнавання при використанні глибшої архітектури нейронної мережі CNN. З іншого боку, підвищення точності розпізнавання досягається за допомогою використання аугментації вхідних даних. У роботі [27] отримано аналогічні результати на наборі EMNIST, при цьому показано, що GoogleNet демонструє найбільш високу точність, однак використовує у 2,5-3 рази більше ресурсу часу в порівнянні з ResNet18.

Однак слід враховувати, що архітектури нейронних мереж, які використовують попереднє навчання, було створено для класифікації кольорових зображень різних розмірів. Це обумовлює

потребу у зміні розміру зображення та його триразовому копіюванні для отримання триканального зображення для запуску моделі DCNN [27].

У разі використання моделей без завантаження ваг попередньо навченої моделі вхідні дані можуть містити одноканальні зображення, тому архітектура CNN модифікується. При порівнянні варіантів розпізнавання кольорових і монохромних зображень [27] зазначено, що варіанти з розміром вхідного зображення 40×40 пікселів (для набору даних EMNIST зі зміненим розміром) в монохромних версіях з аугментацією обертання і зсуву мають найвищі результати в обох моделях (ResNet18 та GoogleNet).

Для розпізнавання кирилических символів подібні дослідження досить нечисленні. Є досвід використання архітектури MobileNet, яка включала 30 шарів [28] для розпізнавання символів казахської та російської мов. Деякі результати розпізнавання кирилических символів представлені також у [29].

Відомо досить багато досліджень технологій розпізнавання рукописного введення, які ґрунтуються на використанні набору даних EMNIST [17].

Для розпізнавання кирилиці відомий досвід використання різних класифікаторів і нейромережових технологій, однак порівняльні дослідження технологій розпізнавання для них носять фрагментарний характер. Крім того, немає наборів даних, подібних до EMNIST, для українського алфавіту.

Щодо набору даних для розпізнавання українських букв, то відомі поодинокі роботи у цьому напрямі [30, 31]. На думку [30] при створенні набору даних для навчання моделі необхідно розпізнавати великі і малі літери, а також враховувати можливість різного написання однієї і тієї ж літери. Авторами [30] було виділено понад 70 класів, що утворюють повний набір символів української мови (наприклад, враховувалося різне написання малої літери «а»).

Виклад основного матеріалу. Для дослідження методології розпізнавання рукописних символів побудовано відповідну контекстну діаграму IDEF0, спочатку для варіанту «AS-IS». Декомпозицію даної діаграми наведено на рис. 1.

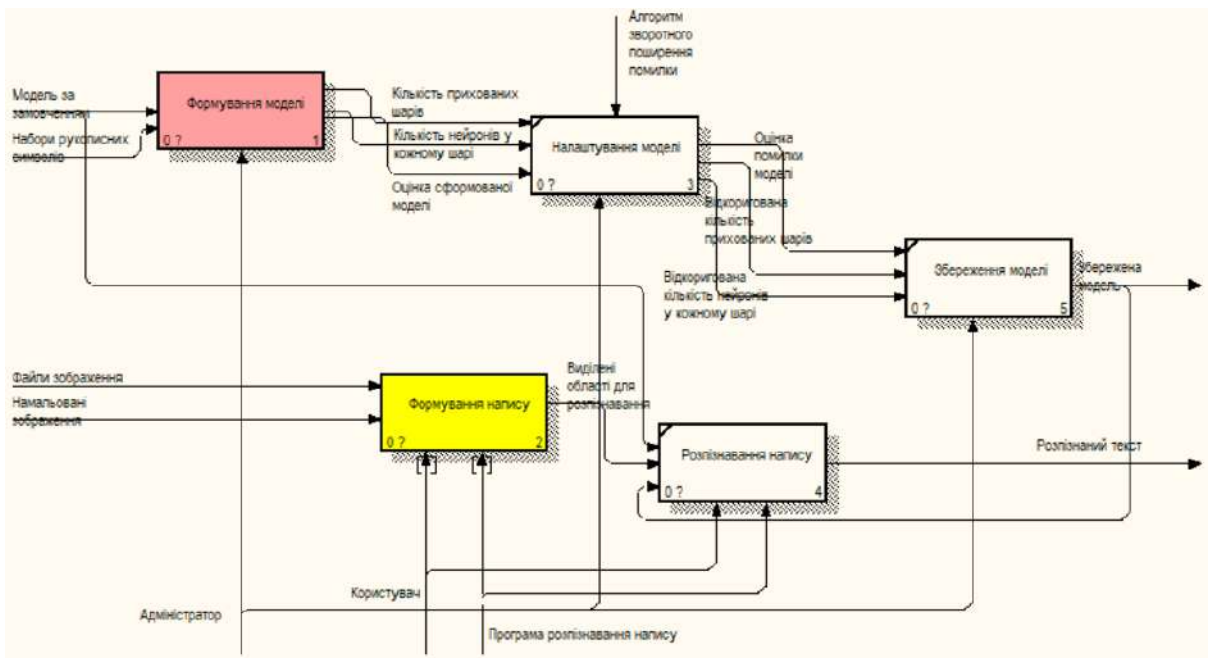


Рис. 1 – Діаграма першого рівня декомпозиції процесу «Методологія розпізнавання рукописних символів» (AS-IS)

У процесі розпізнавання рукописних символів можна виділити наступні підпроцеси:

– формування моделі – результатом підпроцесу є визначена кількість прихованих шарів і кількість нейронів у кожному шарі, виконавцем підпроцесу є адміністратор програми;

- налаштування моделі – виконується налагодження моделі з використанням алгоритму зворотного поширення помилки, за результатами або приймається модель з параметрами за замовчуванням, або коригується кількість прихованих шарів і кількість нейронів у шарі, виконавцем підпроцесу є адміністратор програми;
- збереження моделі – у графічному інтерфейсі користувач задає ім'я файлу, під яким буде збережено модель (її можна буде потім обирати);
- формування напису;
- розпізнавання напису – користувач запускає програму розпізнавання для напису у вікні напису з використанням або моделі за замовченням, або попередньо збереженої та завантаженої моделі.

Найбільший інтерес викликає етап «Формування моделі» (рис. 2). Він включає два важливих підпроцеси: «Побудова набору даних для навчання моделі» та «Вибір архітектури згорткової нейронної мережі».

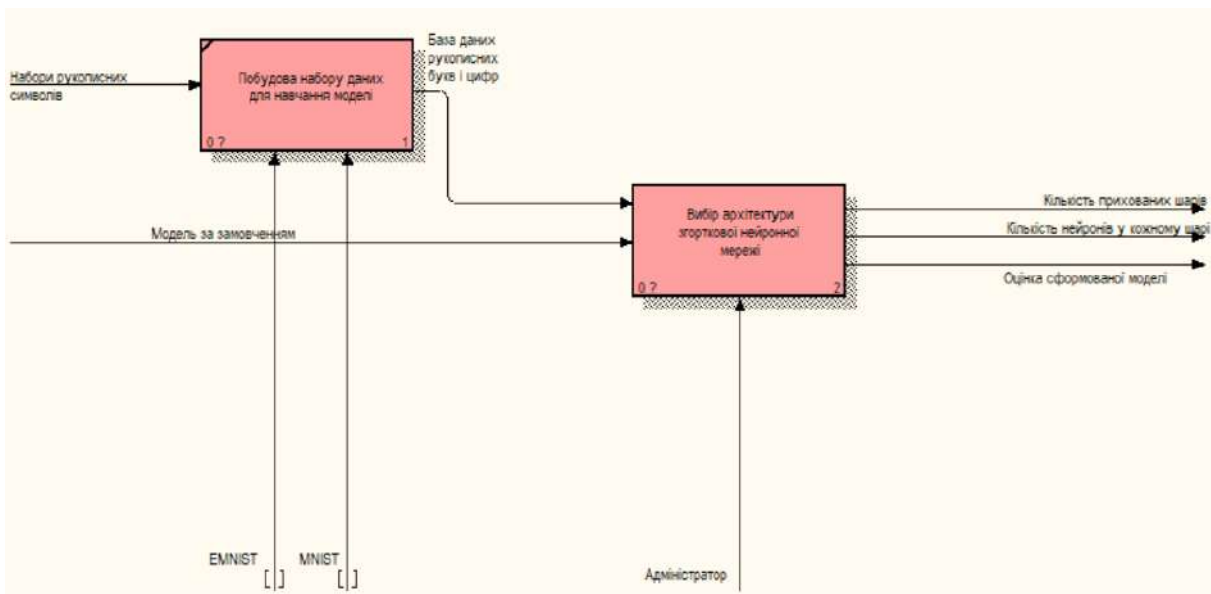


Рис. 2 – Діаграма IDEF0 «Формування моделі» (AS-IS)

Спочатку необхідно побудувати набір даних для навчання моделі. У початковому варіанті використовувалися два набори, позначені стрілками знизу для блоку 1.

Побудова та навчання моделі для розпізнавання арабських цифр здійснювалася з використанням набору MNIST (модифікований NIST) [32-35] – бази даних рукописних цифр, що налічує 70 000 зображень. У базі даних MNIST зображення різних авторів розміщуються в різних частинах для посилення унікальності. Зразки зображень із використаного набору даних MNIST наведено на рис. 3.

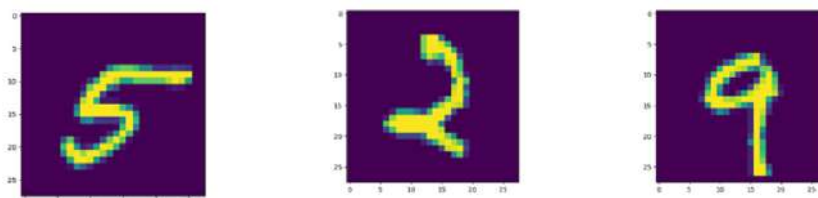


Рис. 3 – Зразки зображень із використовуваного набору даних MNIST

Побудова та навчання моделі для розпізнавання рукописних літер українського алфавіту здійснювалася з використанням набору EMNIST [12, 17] – бази даних рукописних літер та цифр, складається з шести наборів. У даній роботі було обрано саме EMNIST Letters – набір даних, що

містить 124 800 зразків для тренування та 20 800 зразків для випробувань, у тому числі великі та маленькі латинські літери. Деякі експерименти були проведені з класом цифр EMNIST, який містить збалансовану підмножину набору цифр, що містить 28 000 зразків кожної цифри. Зразки зображень із використаного набору даних EMNIST наведено на рис. 4.



Рис. 4 – Зразки зображень із використаного набору даних EMNIST

Далі необхідно вибрати архітектуру CNN. Для початкового варіанту було запропоновано лише 3 архітектури типу LeNet. Розглянемо їх основні характеристики, виконавши декомпозицію блоку 2. На рис. 5 наведено декомпозицію діаграми «Вибір архітектури згорткової нейронної мережі».

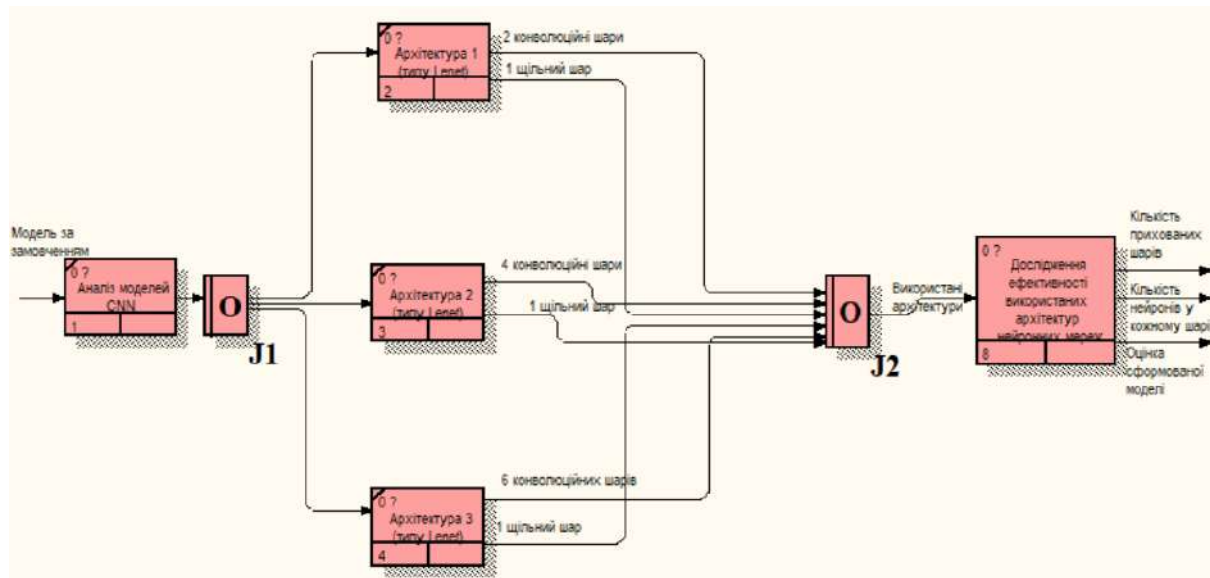


Рис. 5 – Діаграма IDEF3 «Вибір архітектури згорткової нейронної мережі» (AS-IS)

Архітектура 1 включала вхідний шар, один конволюційний блок з 2 шарів, шар підвибірки MaxPooling, шар регуляризації Dropout, 1 щільний шар, шар перетворення розмірності Flatten, ще один шар регуляризації та вихідний шар. Відмінності архітектур 2 та 3 полягали у кількості конволюційних та щільних шарів, адже усі три запропоновані архітектури були аналогами LeNet. Архітектура 2 – 4 конволюційні шари, 1 щільний шар. Архітектура 3 – 6 конволюційних шарів, 1 щільний шар. Усі вище перелічені найпростіші варіанти архітектури згорткових нейронних мереж типу LeNet для розпізнавання зображень символів представлені на рис. 6.

Саме підпроцес «Вибір архітектури згорткової нейронної мережі» буде потребувати реінжинірингу шляхом додавання інших архітектур різних типів для досягнення більшої точності розпізнавання рукописного тексту. Це буде розглянуто при побудові аналогічних діаграм для варіанту TO-BE.

Архітектура 1	Архітектура 2	Архітектура 3
Два конволюційні шари, один щільний шар	Чотири конволюційні шари, один щільний шар	Шість конволюційних шарів, один щільний шар
Input (28x28x1) conv2d, 128 filters conv2d, 128 filters MaxPooling2D Dropout Flatten Dense, 256 filters Dropout Dense (output - 76 classes)	Input (28x28x1) conv2d, 64 filters conv2d, 64 filters MaxPooling2D Dropout conv2d, 128 filters conv2d, 128 filters MaxPooling2D Dropout Flatten Dense, 256 filters Dropout Dense (output – 76 classes)	Input (28x28x1) conv2d, 128 filters conv2d, 128 filters MaxPooling2D Dropout conv2d, 256 filters conv2d, 256 filters MaxPooling2D Dropout conv2d, 512 filters conv2d, 512 filters MaxPooling2D Dropout Flatten Dense, 1024 filters Dropout Dense (output – 76 classes)

Рис. 6 – Найпростіші варіанти архітектури згорткових нейронних мереж типу Lenet

Після того, як для експерименту було обрано одну або декілька архітектур нейронної мережі із запропонованих, треба дослідити ефективність їх використання. Виконаємо декомпозицію цього підпроцесу, що проілюстровано на рис. 7.

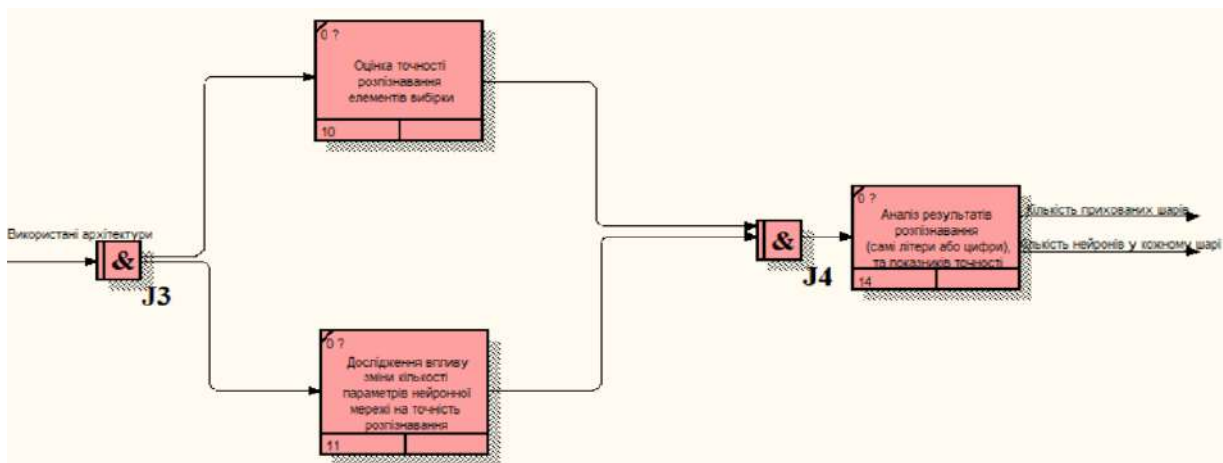


Рис. 7 – Діаграма IDEF3 «Дослідження ефективності використання архітектур нейронних мереж» (AS-IS)

У початковому варіанті планувалося провести наступні дослідження:

- оцінити точність розпізнавання елементів вибірки;
- провести дослідження впливу зміни кількості параметрів нейронної мережі на точність розпізнавання.

У рамках реінжинірингу цього підпроцесу було розширено перелік експериментальних досліджень, які дозволять більш точно оцінити ефективність використання запропонованих архітектур нейронних мереж.

Таким чином, реінжинірингу потребують два процеси – «Формування моделі» та «Формування напису», що буде розглянуто далі.

Враховуючи недоліки процесів та підпроцесів, викладені вище, було побудовано аналогічні діаграми IDEF0 та IDEF3 для варіанту «ТО-ВЕ». Діаграму першого рівня декомпозиції процесу «Методологія розпізнавання рукописних символів» для варіанту «ТО-ВЕ» наведено на рис. 8.

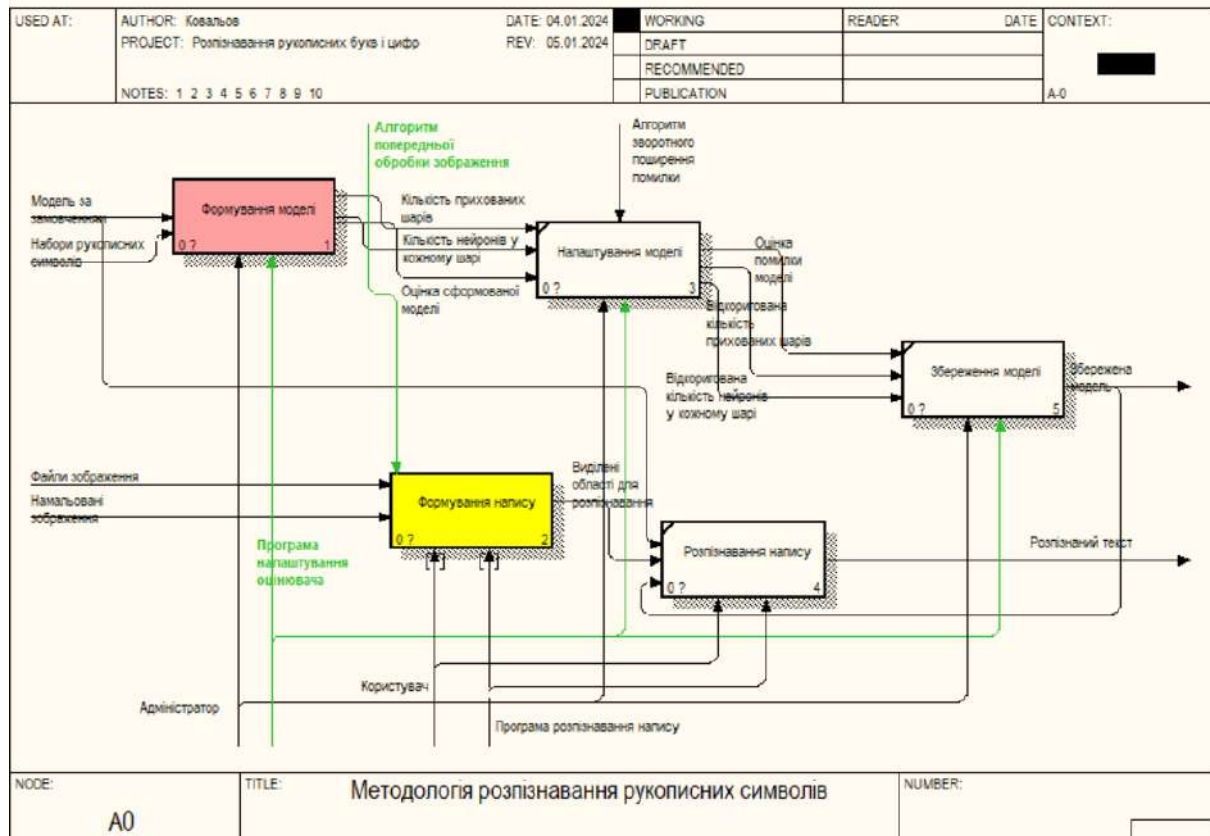


Рис. 8 – Діаграма першого рівня декомпозиції процесу «Методологія розпізнавання рукописних символів» (ТО-ВЕ)

Декомпозиція першого рівня показала, що нову стрілку керуючого впливу «Алгоритм попередньої обробки зображення» буде використано для підпроцесу «Формування напису», а нову стрілку механізму «Програма налаштування оцінювача» – для блоку «Формування моделі».

Спершу розглянемо декомпозицію процесу «Формування моделі» з урахуванням заходів з реінжинірингу, тобто для варіанту «ТО-ВЕ» (рис. 9).

У порівнянні з першим варіантом було додано наступні стрілки механізмів: «Бібліотека Pillow», «Image Data Generator пакету TensorFlow» та «Scikit-Learn» – усе для блоку «Побудова набору даних для навчання моделі», а також «Програма налаштування оцінювача» для блоку «Вибір архітектури згорткової нейронної мережі».

Розглянемо, які зміни буде передбачено для блоку «Побудова набору даних для навчання моделі».

У даній роботі для варіанту TO-VE окрім використання загально застосованих наборів EMNIST та MNIST було запропоновано створити додатковий набір даних, використавши для цього рукописні та курсивні шрифти. У результаті було створено 48 варіацій шрифтів (у тому числі з українськими гліфами). Створений набір містив 66 класів літер (по 33 – великі та маленькі

відповідно) та 10 класів цифр. До отриманих зображень також застосовували різні види деформації (масштабування, обертання та нахил, стискання та розтягування тощо), при цьому для кожного символу було згенеровано до 48 зображень. У результаті отримано набір даних з 99 072 зображень, які було відцентровано та приведено до однакового розміру (28 або 128 пікселів по ширині та висоті). Для реалізації такого підходу було використано бібліотеки Pillow та Image Data Generator з пакету TensorFlow. Пакет Scikit-Learn, а саме метод train_test_split, було використано для виділення навчальних та тестових вибірок.

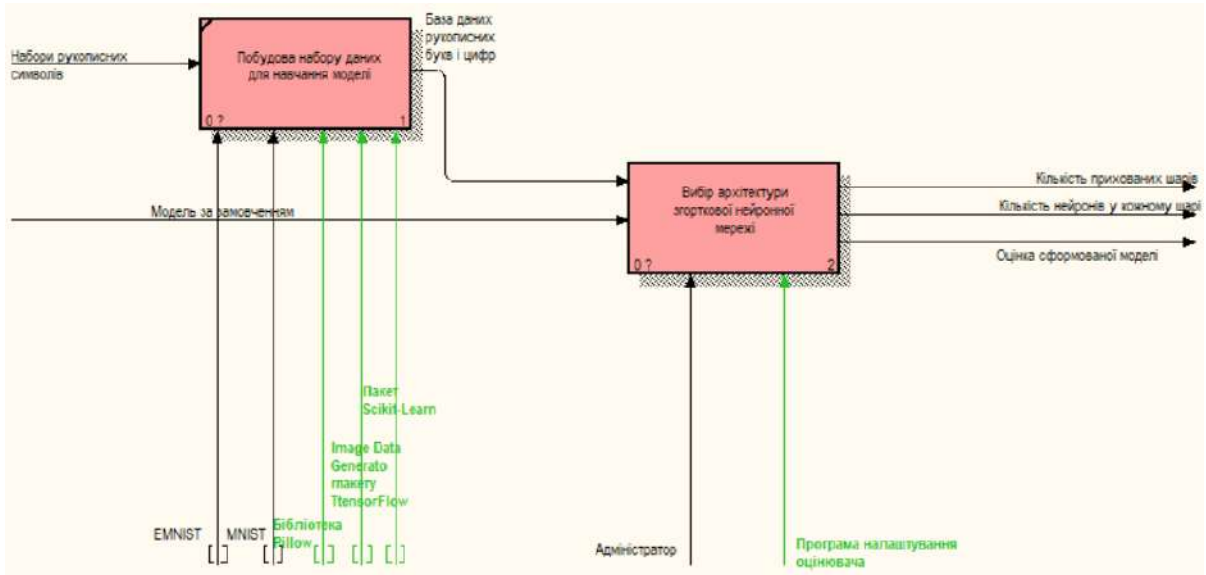


Рис. 9 – Діаграма IDEF0 «Формування моделі» (ТО-ВЕ)

Тепер розглянемо більше детально зміни, що торкнулися блоку «Вибір архітектури згорткової нейронної мережі» (рис. 10).

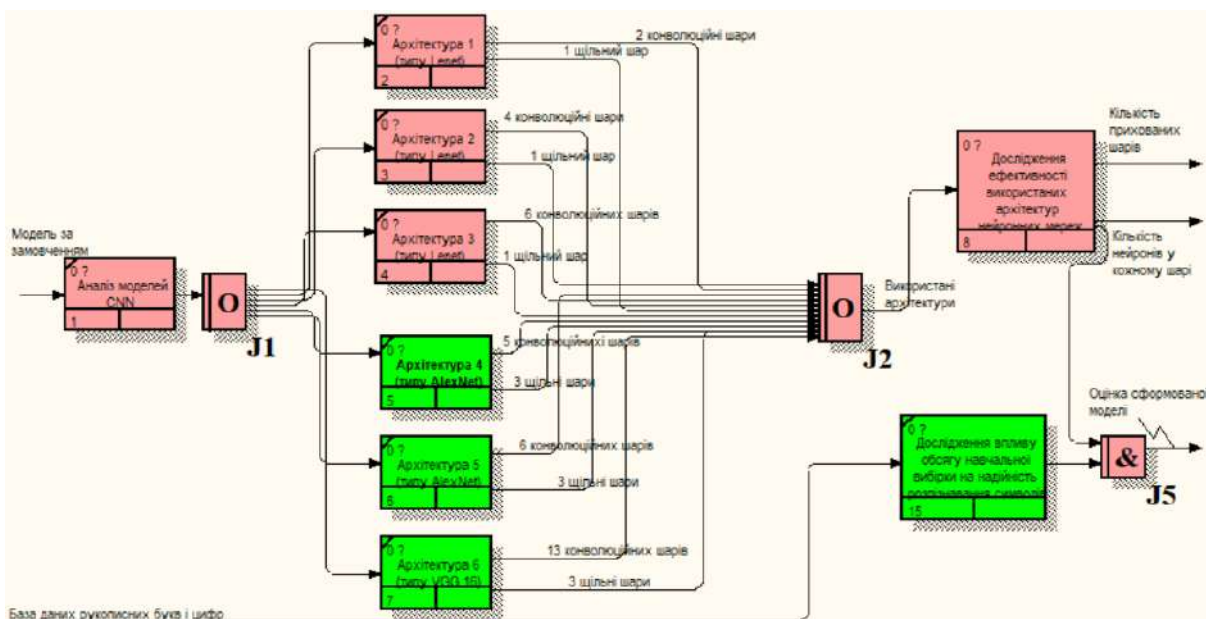


Рис. 10 – Діаграма IDEF3 «Вибір архітектури згорткової нейронної мережі» (ТО-ВЕ)

У рамках заходів з реінжинірингу крім найпростіших архітектур 1-3 типу LeNet було додано ще 3 більш складні архітектури. Розглянемо їх детальніше.

Архітектура 4 має тип AlexNet і включає 5 конволюційних шарів та 3 шари щільності. Архітектура 5 також має тип AlexNet, але включає 6 конволюційних шарів та 3 шари щільності. Архітектура 6 має 13 конволюційних шарів та 3 шари щільності, а також шари MaxPooling та Dropout. Цей варіант архітектури найбільш складний і повторює архітектуру VGG-16 стосовно одноканальних зображень. Більш детально варіанти архітектур згорткових нейронних мереж типу AlexNet та VGG 16 наведено на рис. 11.

Архітектура 4	Архітектура 5	Архітектура 6
П'ять конволюційних шарів, три щільні шари	Шість конволюційних шарів, три щільні шари	Тринадцять конволюційних шарів, три щільні шари
Input (28x28x1) conv2d, 128 filters MaxPooling2D Dropout conv2d, 256 filters MaxPooling2D Dropout conv2d, 512 filters conv2d, 512 filters conv2d, 256 filters MaxPooling2D Dropout Flatten Dense, 4096 filters Dense, 2048 filters Dense, 1024 filters Dropout Dense (output – 76 classes)	Input (28x28x1) conv2d, 128 filters MaxPooling2D Dropout conv2d, 256 filters MaxPooling2D Dropout conv2d, 256 filters MaxPooling2D Dropout conv2d, 512 filters conv2d, 512 filters conv2d, 512 filters MaxPooling2D Dropout Flatten Dense, 4096 filters Dense, 2048 filters Dense, 1024 filters Dropout Dense (output – 76 classes)	Input (28x28x1) conv2d, 64 filters conv2d, 64 filters MaxPooling2D Dropout Flatten Dense, 4096 filters Dense, 4096 filters Dense, 4096 filters Dropout Dense (output - 76 classes) conv2d, 256 filters conv2d, 256 filters conv2d, 256 filters MaxPooling2D Dropout conv2d, 512 filters conv2d, 512 filters conv2d, 512 filters MaxPooling2D Dropout

Рис. 11 – Варіанти архітектури згорткових нейронних мереж типу AlexNet та VGG 16

Також додано новий блок «Дослідження впливу обсягу навчальної вибірки на надійність розпізнавання символів» у порівнянні з першим варіантом. Цей підпроцес включає наступні кроки:

- надати оцінку впливу обсягу навчальної вибірки на надійність розпізнавання символів;
- встановити граничну величину, що забезпечує прийнятну точність розпізнавання при генерації певної кількості зображень на одну літеру або цифру;
- надати оцінку впливу збільшення обсягу вибірки та витрати часу при навчанні моделі.

Архітектура 6, як потім покажуть дослідження, виявиться найкращою за точністю та надійністю розпізнавання тестової вибірки та реальних написів. Для більш повного аналізу результатів розпізнавання в рамках реінжинірингу було внесено зміни у підпроцес «Дослідження ефективності використання архітектур нейронних мереж» (рис. 12).

Після реінжинірингу вирішено було додати ще два пункти дослідження:

- провести дослідження впливу кількості настроюваних параметрів (при порівнянні архітектур 1 і 6 – приблизно порядок) на час навчання нейронної мережі;
- провести дослідження можливості розпізнавання символів при розпізнаванні зображень, що не належать до навчальної або тестової вибірки.

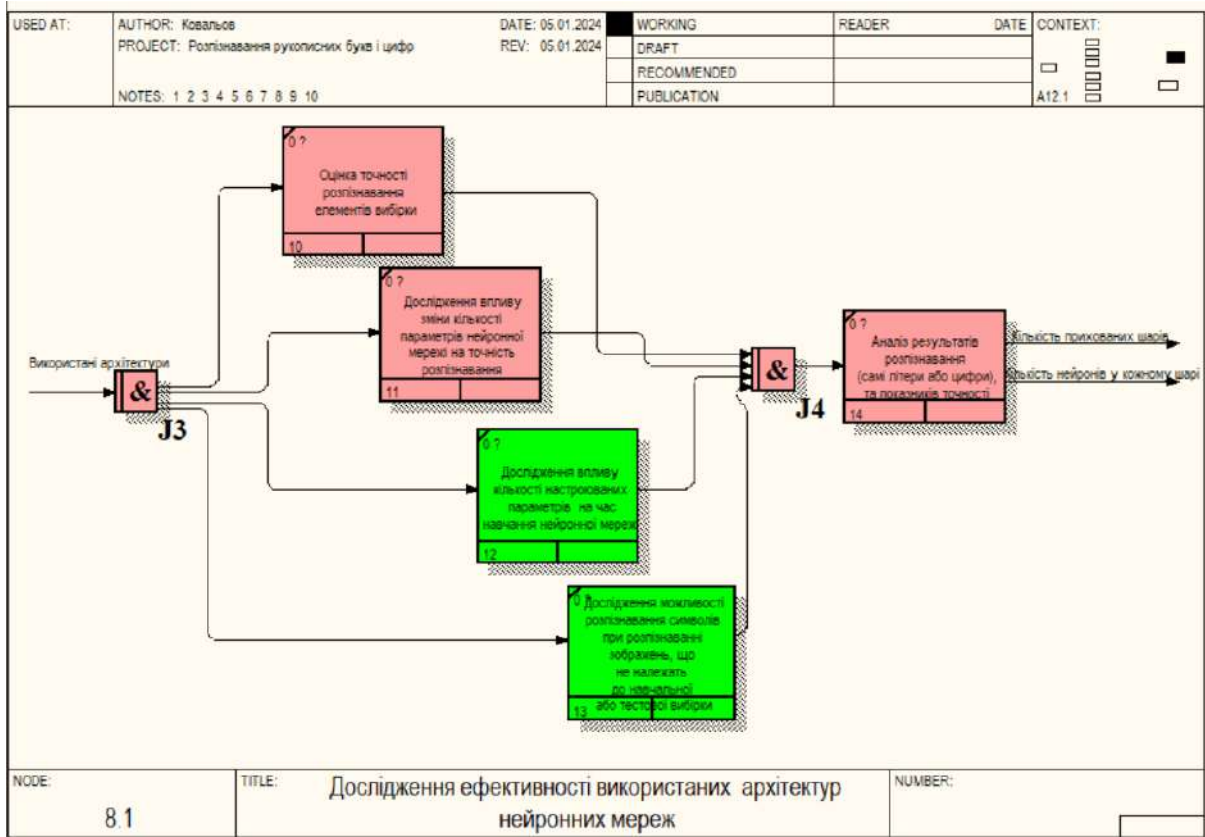


Рис. 12 – Діаграма IDEF3 «Дослідження ефективності використання архітектур нейронних мереж» (ТО-ВЕ)

Після детального розгляду процесу «Формування моделі» для варіанту «ТО-ВЕ» перейдемо до розгляду процесу «Формування напису» після реінжинірингу, в рамках якого пропонується застосування алгоритму попередньої обробки зображення. Такий алгоритм не був передбачений у початковому варіанті, тому було додано ще один рівень декомпозиції підпроцесу «Формування напису» (рис. 13).

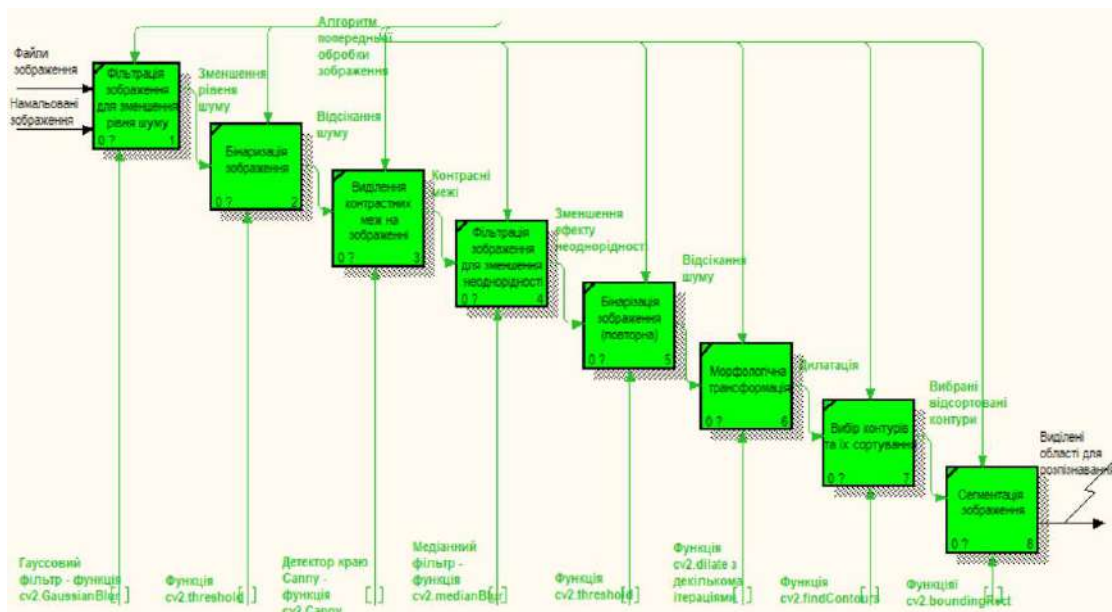


Рис. 13 – Діаграма IDEF0 «Формування напису» (ТО-ВЕ)

У рамках реінжинірингу пропонується застосувати алгоритму попередньої обробки зображення, який покроково наведений на рис. 13.

Таким чином, проведене моделювання об'єкта дослідження з використання методології IDEF для варіантів «AS-IS» та «TO-BE» після реінжинірингу, який стосувався процесів «Формування моделі» та «Формування напису».

Для оцінки ефективності розпізнавання була розроблена тестова програма на Python. За допомогою розрахункових даних, отриманих з програми, було побудовано графіки залежності точності розпізнавання та величини втрат залежно від кількості епох навчання. Результати навчання моделі наведено на рис. 14 для двох варіантів CNN: архітектури 1 – найпростішої моделі типу Lenet, а також архітектури 6 – найбільш складної, аналогу VGG-16.

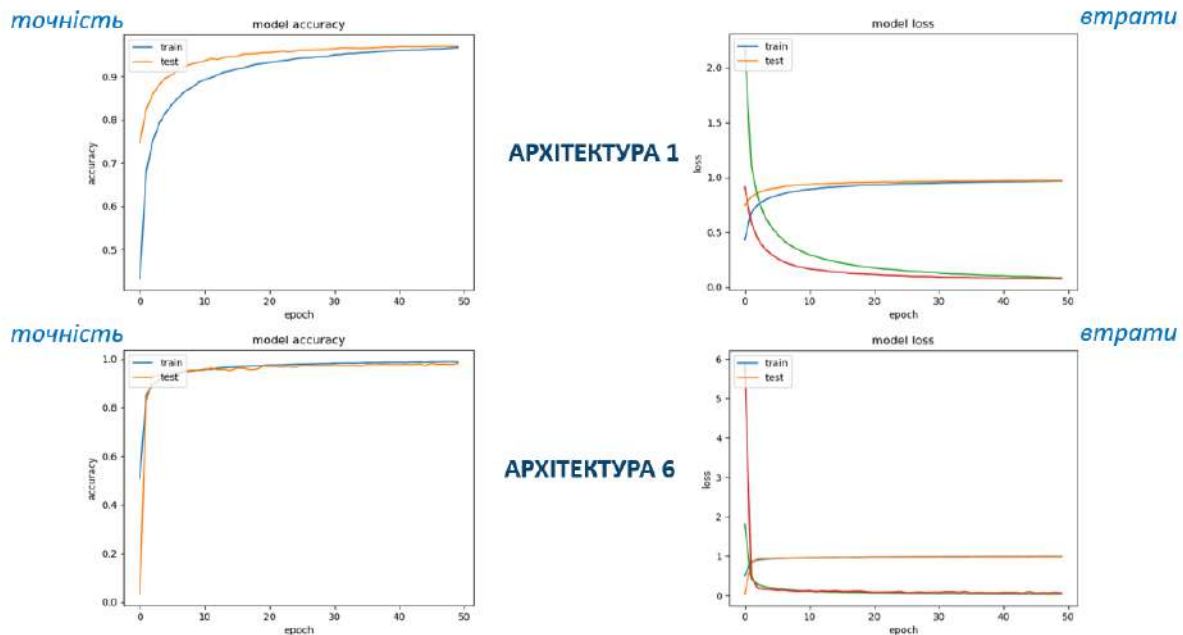


Рис. 14 – Результати точності оцінювання та витрат при навчання моделей типу Lenet (архітектура 1) та типу VGG-16 (архітектура 6)

Експериментальні дослідження показали, що усі 6 архітектур CNN під час навчання на вибірці з максимальним обсягом показують точність розпізнавання на рівні 95-99%. Підвищення точності розпізнавання досягається шляхом збільшення кількості параметрів CNN при використанні нейронних мереж більшої глибини. Час обчислень під час навчання нейронної мережі зростає зі збільшенням кількості настроюваних параметрів (при порівнянні архітектур 1 і 6 – приблизно порядок).

Значна різниця між ефективністю застосування різних архітектур демонструється при розпізнаванні зображень, що не належать до навчальної та тестової вибірки. Характерний приклад розпізнавання напису, що містить літери, наведено в табл. 1. Як видно з отриманих результатів, 100% точності розпізнавання забезпечує архітектура 6.



Спроба розпізнавання напису, що містить лише цифри, дала ще більш виражений результат точності розпізнавання зображення з ізольованими цифрами (табл. 2).

Помилки розпізнавання зустрічалися і під час використання глибоких архітектур. Приклад такої ситуації наведено у табл. 3. Архітектура 6 розпізнала другий символ напису як «Ж», а не як «Щ». Можливі також неточності у розпізнаванні малих та великих літер.

Генерація 116736 зразків для розпізнавання стала граничною величиною, при якій досягається необхідна точність. Зменшення обсягу вибірки веде до суттєвого погіршення точності розпізнавання (наприклад, зменшення вибірки в 4 рази призводить до падіння точності з 100 % до 40-60%), при цьому збільшення обсягу вибірки вимагає значно більшого часу для навчання моделі.



Таблиця 1

Результати розпізнавання напису з літерами

Напис на зображенні	Архітектура CNN	Розпізнано	Оцінка точності
 Напис (АБІІв) _	Архітектура 1	ДБІ6	50%
	Архітектура 2	АБіів	100%
 Виділені символи _	Архітектура 3	ДБіів	80%
	Архітектура 4	ДБіів	80%
	Архітектура 5	АБіів	100%
	Архітектура 6	АБіів	100%



Таблиця 2

Результати розпізнавання напису з цифрами

Напис на зображенні	Архітектура CNN	Розпізнано	Оцінка точності
 Напис (12345)	Архітектура 1	Іг5ц5	20%
	Архітектура 2	Іг3ц5	40%
	Архітектура 3	Іг5ц5	40%
 Виділені символи	Архітектура 4	123ц5	80%
	Архітектура 5	123ц5	80%
	Архітектура 6	12345	100%

Таблиця 3

Результати розпізнавання складного напису

Напис на зображенні	Архітектура CNN	Розпізнано	Оцінка точності
 Напис (ШЩНТ)	Архітектура 1	ЩШнт	50%
	Архітектура 2	ШШнт	75%
	Архітектура 3	ШЩНТ	100%
 Виділені символи	Архітектура 4	ШЖнт	75%
	Архітектура 5	МЖнт	50%
	Архітектура 6	ШЖНТ	75%

Висновки

Таким чином, у статті проаналізовано використання нейронних мереж різних архітектур для розпізнавання ізольованих рукописних символів, а саме українських літер та арабських цифр.

Дослідження ефективності застосування CNN з 6 різними архітектурами, що належать до типів Lenet, AlexNet та VGG-16, показало, що збільшення кількості згорткових шарів дозволяє підвищити надійності розпізнавання у переважній кількості випадків. При цьому найвищі показники точності та надійності розпізнавання досягнуто при використанні CNN найбільш складної архітектури типу VGG-16, яка налічувала 13 згорткових і 3 щільні шари.

Для навчання моделей додатково використано набір даних з 48 варіантів шрифтів (у тому числі з українськими гліфами), побудованих за допомогою набору рукописних і курсивних шрифтів із застосуванням бібліотеки Pillow, Image Data Generator та пакету Scikit-Learn.

Експериментально показано, що використаний у роботі набір даних з 116736 зразків для розпізнавання 76 класів цифр та літер, при цьому зазначений обсяг фактично є граничним, який дозволяє забезпечити необхідну точність розпізнавання. Експериментально доведено, що зменшення обсягу вибірки у 4 рази веде до зменшення точності розпізнавання майже в середньому у 2 рази, однак негативним наслідком збільшення обсягу вибірки є зростання витрат часу на навчання моделі.

Перелік використаних джерел:

1. Studies in fuzziness and soft computing. Springer Cham, 2017. Vol. 352: Optical character recognition systems for different languages with soft computing / Chaudhuri A., Mandaviya K., Badelia P., Ghosh S. 248 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50252-6>.
2. Li H., Wang P., Shen C. Toward end-to-end car license plate detection and recognition with deep neural networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2018. Vol. 20(3). Pp. 1126-1136. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2018.2847291>.
3. Rajavelu A., Musavi M.T., Shirvaikar M.V. A neural network approach to character recognition. *Neural Networks*. 1989. Vol. 2(5). Pp. 387-393. DOI: [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90023-3).
4. Image character recognition using deep convolutional neural network learned from different languages / Bai J., Chen Z., Feng B., Xu B. *2014 IEEE International Conference on Image Processing ICIP 2014*, Paris, France, 27-30 October 2014. Pp. 2560-2564. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIP.2014.7025518>.
5. Maitra D.S., Bhattacharya U., Parui S.K. CNN based common approach to handwritten character recognition of multiple scripts. *3th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, Tunis, Tunisia, 23-26 August 2015. Pp. 1021-1025. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDAR.2015.7333916>.
6. Bilgin Taşdemir E.F. Online Turkish handwriting recognition using synthetic data. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*. 2021. Vol. 32. Pp. 649-656. DOI: <https://doi.org/10.31590/ejosat.1039846>.
7. Handwritten Kazakh and Russian (HKR) database for text recognition / D. Nurseitov, K. Bostanbekov, D. Kurmankhojayev, A. Alimova, A. Abdallah, R. Tolegenov. *Multimedia Tools and Applications*. 2021. Vol. 80. Pp. 33075-33097. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11399-6>.
8. Abdallah A., Hamada M., Nurseitov D. Attention-based fully gated CNN-BGRU for Russian handwritten text. *Journal of Imaging*. 2020. Vol. 6(12). Pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging6120141>.
9. Ullah Z., Jamjoom M. An intelligent approach for Arabic handwritten letter recognition using convolutional neural network. *PeerJ Computer Science*. 2022. Vol. 8. Pp. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.995>.
10. Handwritten letter recognition using artificial intelligence / Jeevitha D., Muthu S., Nila I., Santhoshi V. *International journal for research in applied science and engineering technology*. 2022. Vol. 10. Pp. 2752-2758. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.42949>.
11. An exploratory study on the handwritten allographic features of multi-ethnic population with different educational backgrounds / L. Gannetion, K.Y. Wong, P.Y. Lim, K.H. Chang, A.F.L. Abdallah. *PloS one*. 2022. Vol. 17(10). Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0268756>.
12. EMNIST: Extending MNIST to handwritten letters / Cohen G., Afshar S., Tapson J., Van Schaik A. *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Anchorage, AK, USA, 14-19 May 2017. Pp. 2921-2926. DOI: <https://doi.org/10.48550/arxiv.1702.05373>.
13. Backpropagation applied to handwritten zip code recognition / Y. LeCun et al. *Neural Computation*. 1989. Vol. 1. Iss. 4. Pp. 541-551. DOI: <https://doi.org/10.1162/neco.1989.1.4.541>.
14. Núñez Fernández D., Hosseini S. Real-time handwritten letters recognition on an embedded computer using ConvNets. *IEEE Sciences and Humanities International Research Conference (SHIRCON)*, Lima, Peru, 20-22 November 2018. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1109/SHIRCON.2018.8592981>.

15. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*. 2012. Vol. 60. Iss. 6. Pp. 84-90. DOI: <https://doi.org/10.1145/3065386>.
16. Going deeper with convolutions / C. Szegedy et al. *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Boston, MA, USA, 7-12 June 2015. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>.
17. Baldominos A., Sáez Y., Isasi P. A survey of handwritten character recognition with MNIST and EMNIST. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9(15). Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/app9153169>.
18. Handwritten indic character recognition using capsule networks / B. Mandal, S. Dubey, S. Ghosh, R. Sarkhel, N. Das. *2018 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON)*, Kolkata, India, 07-09 December 2018. Pp. 304-308. DOI: <https://doi.org/10.1109/ASPCON.2018.8748550>.
19. Recognition of isolated characters across different input interfaces using 2D DCNN / K. Yadav, A. Kirupakaran, S. Barlaskar, N. Ahmad, R. Laskar, M. Bhuyan. *2021 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Auckland, New Zealand, 07-10 December 2021. Pp. 504-509. DOI: <https://doi.org/10.1109/TENCON54134.2021.9707451>.
20. He K., Girshick R., Dollár P. Rethinking imagenet pre-training. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, Seoul, Korea (South), 27 October - 02 November 2019. Pp. 4918-4927. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCV.2019.00502>.
21. Albattah W., Albahli S. Intelligent Arabic handwriting recognition using different standalone and hybrid CNN architectures. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. Pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/app121910155>.
22. Performance analysis of state-of-the-art convolutional neural network architectures in bangla handwritten character recognition / T. Ghosh, Min-Ha-Zul Abedin, H. Al Banna, N. Mumenin, M. Abu Yousuf. *Pattern recognition and image analysis*. 2021. Vol. 31. Pp. 60-71. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1054661821010089>.
23. Bhardwaj A., Ravendra Singh R. Handwritten devanagari character recognition using deep learning – convolutional neural network (CNN) model. *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*. 2020. Vol. 17(6). Pp. 7965-7984.
24. Handwritten devanagari character recognition using modified Lenet and Alexnet convolution neural networks / Duddela P., Vasanth Kumar M.R., Ramana K., Vidhyacharan B. *Wireless Personal Communications*. 2022. Vol. 122. Pp. 349-378. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08903-4>.
25. Recognizing arabic handwritten literal amount using convolutional neural networks / A. Korichi, S. Sihem, T. Najiba, Z. Ramzi, A. Oussama. *Artificial Intelligence and Its Applications : Proceeding of the 2nd International Conference, EL-Oued, Algeria, 28-30 September 2021*. Pp. 153-165. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-96311-8_15.
26. A new Arabic handwritten character recognition deep learning system (AHCR-DLS) / Balaha H., Sabry M., Ali H., Badawy M. *Neural Computing and Applications*. 2020. Vol. 33. Pp. 6325-6367. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05397-2>.
27. Samra A., Al Amin G., Hadi O. An optimized deep residual network with a depth concatenated block for handwritten characters classification. *Computers, Materials & Continua*. 2021. Vol. 680. Pp. 1-28. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2021.015318>.
28. Classification of handwritten names of cities and handwritten text recognition using various deep learning models / D. Nurseitov, K. Bostanbekov, M. Kanatov, A. Alimova, A. Abdallah, G. Abdimanap. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ)*. 2021. Vol. 5. Iss. 5. Pp. 934-943. DOI: <https://doi.org/10.25046%2Faj0505114>.
29. Vovchuk O., Kyrychenko M. Recognition of handwritten cyrillic letters using PCA. 2019. 6 p.
30. Economic efficiency of innovative projects of CNN modified architecture application / V. Khavalko, V. Mykhailyshyn, R. Zhelizniak, I. Kovtyk, A. Mazur. *CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2654: Proceedings of the International workshop on cyber hygiene (CybHyg-2019) co-located with 1st International conference on cyber hygiene and conflict management in global information networks (CyberConf 2019)*, Kyiv, Ukraine, 30 November 2019. Pp. 182-193.
31. Розпізнавання рукописних українських літер та цифр з використанням синтетичного набору даних та згорткових нейронних мереж / Є. Чичкарьов, О. Зінченко, О. Балалаєва, А. Сергієнко, О. Ковальов. *Grail of Science*. 2023. Vol. 23. Pp. 241-253. DOI: <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.23.12.2022.36>.

32. Study and observation of the variations of accuracies for handwritten digits recognition with various hidden layers and epochs using convolutional neural network / Arif R.B., Siddique M.A.B., Khan M.M.R., Oishe M.R. *4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT)*, Dhaka, Bangladesh, 13-15 September 2018. Pp. 112-117. DOI: <https://doi.org/10.1109/CEEICT.2018.8628078>.
33. Siddique F., Sakib S., Siddique M.A.B. Handwritten digit recognition using convolutional neural network in python with tensorflow and observe the variation of accuracies for various hidden layers. *Preprints*. 2019. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.20944/preprints201903.0039.v1>.
34. LeCun Y., Cortes C., Burges C.J.C. The MNIST database of handwritten digits. URL: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist> (дата звернення: 30.05.2023).
35. Grother P.J. NIST special database 19 – handprinted forms and characters database. National Institute of Standards and Technology (NIST), Tech. Rep., 1995. DOI: <http://doi.org/10.18434/T4H01C>.

References:

1. A. Chaudhuri, K. Mandaviya, P. Badelia, and S. Ghosh, «Optical character recognition systems for different languages with soft computing», in *Studies in fuzziness and soft computing* (vol. 352), Springer Cham Publ., 2017. doi: **10.1007/978-3-319-50252-6**.
2. H. Li, P. Wang, and C. Shen, «Toward end-to-end car license plate detection and recognition with deep neural networks», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 20(3), pp. 1126-1136, 2018. doi: **10.1109/TITS.2018.2847291**.
3. A. Rajavelu, M.T. Musavi, and M.V. Shirvaikar, «A neural network approach to character recognition», *Neural Networks*, vol. 2(5), pp. 387-393, 1989. doi: **10.1016/0893-6080(89)90023-3**.
4. J. Bai, Z. Chen, B. Feng, and B. Xu, «Image character recognition using deep convolutional neural network learned from different languages», in *2014 IEEE International Conference on Image Processing ICIP 2014*, Paris, France, 2014, pp. 2560-2564. doi: **10.1109/ICIP.2014.7025518**.
5. D.S. Maitra, U. Bhattacharya, and S.K. Parui, «CNN based common approach to handwritten character recognition of multiple scripts», in *3th International Conference on Document Analysis and Recognition (ICDAR)*, Tunis, Tunisia, 2015, pp. 1021-1025. doi: **10.1109/icdar.2015.7333916**.
6. E.F. Bilgin Taşdemir, «Online Turkish Handwriting Recognition Using Synthetic Data», *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, vol. 32, pp. 649-656, 2021. doi: **10.31590/ejosat.1039846**.
7. D. Nurseitov, K. Bostanbekov, D. Kurmankhojayev, A. Alimova, A. Abdallah, and R. Tolegenov, «Handwritten Kazakh and Russian (HKR) database for text recognition», *Multimedia tools and applications*, vol. 80, pp. 33075-33097, 2021. doi: **10.1007/s11042-021-11399-6**.
8. A. Abdallah, M. Hamada, and D. Nurseitov, «Attention-Based Fully Gated CNN-BGRU for Russian Handwritten Text», *Journal of Imaging*, vol. 6(12), pp. 1-23, 2020. doi: **10.3390/jimaging6120141**.
9. Z. Ullah, and M. Jamjoom, «An intelligent approach for Arabic handwritten letter recognition using convolutional neural network», *PeerJ Computer Science*, vol. 8, pp. 1-22, 2022. doi: **10.7717/peerj-cs.995**.
10. D. Jeevitha, S. Muthu, I. Nila, and V. Santhoshi, «Handwritten letter recognition using artificial intelligence», *International journal for research in applied science and engineering technology*, vol. 10, pp. 2752-2758, 2022. doi: **10.22214/ijraset.2022.42949**.
11. L. Gannetion, K.Y. Wong, P.Y. Lim, K.H. Chang, and A.F.L. Abdullah, «An exploratory study on the handwritten allographic features of multi-ethnic population with different educational backgrounds», *PloS one*, vol. 17(10), pp. 1-16, 2022. doi: **10.1371/journal.pone.0268756**.
12. G. Cohen, S. Afshar, J. Tapson, and A. Van Schaik, «EMNIST: Extending MNIST to handwritten letters», in *2017 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Anchorage, AK, USA, 2017, pp. 2921-2926. doi: **10.48550/arxiv.1702.05373**.
13. Y. LeCun et al., «Backpropagation applied to handwritten zip code recognition», *Neural Computation*, vol. 1, iss. 4, pp. 541-551, 1989. doi: **10.1162/neco.1989.1.4.541**.
14. D. Núñez Fernández, and S. Hosseini, «Real-time handwritten letters recognition on an embedded computer using ConvNets», in *IEEE Sciences and Humanities International Research Conference (SHIRCON)*, Lima, Peru, 2018, pp. 1-4. doi: **10.1109/SHIRCON.2018.8592981**.
15. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. Hinton, «ImageNet classification with deep convolutional neural networks», *Communications of the ACM*, vol. 60, iss. 6, pp. 84-90, 2012. doi: **10.1145/3065386**.

16. C. Szegedy et al., «Going deeper with convolutions», in 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Boston, MA, USA, 2015, pp. 1-9. doi: **10.1109/CVPR.2015.7298594**.
17. A. Baldominos, Y. Sáez, and P. Isasi, «A survey of handwritten character recognition with MNIST and EMNIST», *Applied Sciences*, vol. 9(15), pp. 1-16, 2019. doi: **10.3390/app9153169**.
18. B. Mandal, S. Dubey, S. Ghosh, R. Sarkhel, and N. Das, «Handwritten indic character recognition using capsule networks», in 2018 IEEE Applied Signal Processing Conference (ASPCON), Kolkata, India, 2018, pp. 304-308. doi: **10.1109/ASPCON.2018.8748550**.
19. K. Yadav, A. Kirupakaran, S. Barlaskar, N. Ahmad, R. Laskar, and M. Bhuyan, «Recognition of isolated characters across different input interfaces using 2D DCNN», in 2021 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Auckland, New Zealand, 2021, pp. 504-509. doi: **10.1109/TENCON54134.2021.9707451**.
20. K. He, R. Girshick, and P. Dollár, «Rethinking imagenet pre-training», in Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, Seoul, Korea (South), 2019, pp. 4918-4927. doi: **10.1109/ICCV.2019.00502**.
21. W. Albattah, and S. Albahli, «Intelligent Arabic Handwriting Recognition Using Different Standalone and Hybrid CNN Architectures», *Applied Sciences*, vol. 12, pp. 1-23, 2022. doi: **10.3390/app121910155**.
22. T. Ghosh, Min-Ha-Zul Abedin, H. Al Banna, N. Mumenin, and M. Abu Yousuf, «Performance analysis of state of the art convolutional neural network architectures in bangla handwritten character recognition», *Pattern recognition and image analysis*, vol. 31, pp. 60-71, 2021. doi: **10.1134/S1054661821010089**.
23. A. Bhardwaj, and R. Ravendra Singh, «Handwritten devanagari character recognition using deep learning – convolutional neural network (CNN) model», *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt/Egyptology*, vol. 17(6), pp. 7965-7984, 2020.
24. P. Duddela, M.R. Vasanth Kumar, K. Ramana, and B. Vidhyacharan, «Handwritten Devanagari Character Recognition Using Modified Lenet and Alexnet Convolution Neural Networks», *Wireless Personal Communications*, vol. 122, pp. 349-378, 2022. doi: **10.1007/s11277-021-08903-4**.
25. A. Korichi, S. Sihem, T. Najiba, Z. Ramzi, and A. Oussama, «Recognizing arabic handwritten literal amount using convolutional neural networks», in Proceeding of the 2nd International Conference Artificial Intelligence and Its Applications, EL-Oued, Algeria, 2021, pp. 153-165. doi: **10.1007/978-3-030-96311-8_15**.
26. H. Balaha, M. Sabry, H. Ali, and M. Badawy, «A new Arabic handwritten character recognition deep learning system (AHCR-DLS)», *Neural Computing and Applications*, vol. 33, pp. 6325-6367, 2020. doi: **10.1007/s00521-020-05397-2**.
27. A. Samra, G. Al Amin, and O. Hadi, «An optimized deep residual network with a depth concatenated block for handwritten characters classification», *Computers, Materials & Continua*, vol. 680, pp. 1-28, 2021. doi: **10.32604/cmc.2021.015318**.
28. D. Nurseitov, K. Bostanbekov, M. Kanatov, A. Alimova, A. Abdallah, and G. Abdimanap, «Classification of handwritten names of cities and handwritten text recognition using various deep learning models», *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal (ASTESJ)*, vol. 5, iss. 5, pp. 934-943, 2021. doi: **10.25046/2Faj0505114**.
29. O. Vovchuk, and M. Kyrychenko, *Recognition of handwritten cyrillic letters using PCA*. 2019.
30. V. Khavalko, V. Mykhailyshyn, R. Zhelizniak, I. Kovtyk, and A. Mazur, «Economic efficiency of innovative projects of CNN modified architecture application», in CEUR Workshop Proceedings. Vol. 2654: Proceedings of the International workshop on cyber hygiene (CybHyg-2019) co-located with 1st International conference on cyber hygiene and conflict management in global information networks (CyberConf 2019), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 182-193.
31. Ye. Chychkarov, O. Zinchenko, O. Balalaieva, A. Serhienko, and O. Kovalov, «Rozpiznavannia rukopysnykh ukrainskykh liter ta tsyfr z vykorystanniam syntetychnoho naboru danykh ta zghortkovykh neironnykh merezh» [«Recognition of handwritten Ukrainian letters and numbers using a synthetic dataset and convolutional neural networks»], *Grail of Science*, vol. 23, pp. 241-253, 2023. doi: **10.36074/grail-of-science.23.12.2022.36**. (Ukr.)
32. R.B. Arif, M.A.B. Siddique, M.M.R. Khan, and M.R. Oishe, «Study and observation of the variations of accuracies for handwritten digits recognition with various hidden layers and epochs using

- convolutional neural network», in 4th International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology (iCEEICT), Dhaka, Bangladesh, 2018, pp. 112-117. doi: **10.1109/CEEICT.2018.8628078**.
33. F. Siddique, S. Sakib, and M.A.B. Siddique, «Handwritten digit recognition using convolutional neural network in python with tensorflow and observe the variation of accuracies for various hidden layers», *Preprints*, pp. 1-6, 2019. doi: **10.20944/preprints201903.0039.v1**.
34. Y. LeCun, C. Cortes, and C.J.C. Burges, The MNIST database of handwritten digits [Online]. Available: <http://yann.lecun.com/exdb/mnist>. Accessed on: May 30, 2023.
35. P.J. Grother, *NIST special database 19 – handprinted forms and characters database*, National Institute of Standards and Technology (NIST), Tech. Rep. Publ., 1995. doi: **10.18434/T4H01C**.

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

Стаття надійшла 01.10.2023

Стаття прийнята 05.11.2023

УДК 004.896

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.299990

© Сергієнко А.В.¹, Єфімов П.С.², Обиденний Є.О.³, Бешта Л.В.⁴

ВИКОРИСТАННЯ ХМАРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОЇ РОЗСИЛКИ ПОВІДОМЛЕНЬ В TELEGRAM

В статті розглянуто питання автоматизації розповсюдження повідомлень в месенджері Telegram за допомогою хмарних технологій. Описано загальну проблему розсилки повідомлень декількома каналами. Зроблений огляд останніх досліджень та публікацій сучасних технологій обміну повідомленнями в Telegram, проаналізовані бібліотеки, фреймворки та сучасні патерни. Запропоновано методикою використання потужностей AWS EC2 для створення масштабованого та надійного рішення для автоматизованої розсилки повідомлень. Детально описаний процес створення програми за запропонованою методикою. Описано її архітектуру та взаємодію модулів. Архітектура структурована таким чином, щоб інкапсулювати різні функції, кожна з яких служить певній меті в ширшому контексті автоматизованого розповсюдження повідомлень на платформі Telegram. Наводяться характеристики обраного сервісу AWS, обраної операційної системи, мови програмування та використаних бібліотек. Продемонстровано використання автоматичного масштабування в AWS, що автоматизує налаштування ресурсів на основі попередньо визначених критеріїв та забезпечує ефективне рішення для обробки коливань попиту та підтримки оптимальної продуктивності системи. Використані мова програмування Python та бібліотека Telethon. Показано взаємодію AWS EC2 з API Telegram та використання модуля Asynchronous Message Forwarding для організації обробки декількох каналів одночасно. Описані можливості програми – налаштування облікових записів Telegram, пошук повідомлень, автоматизована переадресація на кілька каналів та інші дії. Показані результати проведених тестувань розробленої програми, що показують, що автоматизація процесу пересилки повідомлень збільшує швидкість їх доставки у велику кількість чатів на 120 секунд, а це ефективніше в 40 разів, а її

¹ канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-1328-2572, sergienko_a_v@pstu.edu

² магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, efor1999@gmail.com

³ асистент, НТУ «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-9065-6369, Obydennyi.Ye.O@nmu.one

⁴ асистент, НТУ «Дніпровська політехніка», ORCID: 0000-0003-1461-4399, Beshta.l.v@nmu.one

ресурсомісткість менша, ніж ресурсомісткість звичайного телеграм клієнту в 5 разів.

Ключові слова: хмарне середовище, AWS EC2, екземпляр, розсилка повідомлень, API Telegram, Python, автоматизація, Telethon.

A.V. Serhiienko, P.S. Yefimov, E.O. Obydennyi, L.V. Beshta. *Using of a cloud technologies for automatic sending of notifications in Telegram.* The article discusses the issue of automating the distribution of messages in the Telegram messenger using cloud technologies. The general problem of sending messages through several channels is described. An overview of the latest research and publications of modern messaging technologies in Telegram was made, libraries, frameworks and modern patterns were analyzed. A method of using the capabilities of AWS EC2 to create a scalable and reliable solution for automated message distribution is proposed. The process of creating a program according to the proposed method is described in detail. Its architecture and interaction of modules are described. The architecture is structured to encapsulate different functions, each of which serves a specific purpose in the larger context of automated message distribution on the Telegram platform. The characteristics of the selected AWS service, the selected operating system, the programming language and the used libraries are given. The use of automatic scaling in AWS is demonstrated, which automates the configuration of resources based on predefined criteria and provides an effective solution for handling demand fluctuations and maintaining optimal system performance. Python programming language and Telethon library are used. The interaction of AWS EC2 with the Telegram API and the use of the Asynchronous Message Forwarding module to organize the processing of several channels at the same time are shown. The features of the program are described – setting up Telegram accounts, searching for messages, automated forwarding to several channels and other actions. The results of tests of the developed program are shown, which show that the automation of the process of sending messages increases the speed of their delivery to a large number of chats by 120 seconds, which is 40 times more effective, and its resource consumption is less than the resource consumption of ordinary client telegrams in 5 times.

Key words: cloud environment, AWS EC2, instance, messaging, Telegram API, Python, automation, Telethon.

Постановка проблеми. У цьому науковому дослідженні ми вирішуємо нагальну проблему оптимізації комунікаційних процесів на платформі Telegram за допомогою автоматизованої програми Python. Зростаюча база користувачів Telegram зумовила необхідність більш ефективних методів розповсюдження повідомлень, зокрема для розповсюдження інформації кількома каналами. Сучасна практика часто передбачає пересилання вручну, що призводить до неефективності та обмежень у часі. Усвідомлюючи цю гостроту, наше дослідження має на меті розробити автоматизоване рішення, яке використовує AWS EC2, API Telegram і програмування на Python для покращення робочих процесів спілкування [1].

Фундаментальна проблема полягає у відсутності уніфікованого та автоматизованого підходу до розповсюдження повідомлень, що перешкоджає масштабованості та ефективності комунікаційних стратегій у Telegram. Пересилання вручну не тільки споживає дорогий час і ресурси, але й створює ризик помилок і невідповідностей. Це дослідження спрямоване на вирішення цієї проблеми шляхом розробки складної програми на Python, яка здатна асинхронно пересилати повідомлення, забезпечуючи своєчасне та точне розповсюдження інформації різними каналами.

Крім того, відсутність комплексного інструменту, який легко інтегрується з хмарними технологіями та API Telegram, перешкоджає адаптації поточних практик спілкування. Мета полягає в тому, щоб подолати цей розрив, запропонувавши програму, яка використовує потужність AWS EC2 для створення масштабованого та надійного рішення. Приступаючи до цієї роботи, ми очікуємо, що наше дослідження зробить значний внесок у дискусію щодо оптимізації комунікаційних процесів в екосистемі Telegram [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В контексті розробки додатку для автоматичної розсилки повідомлень в Telegram з використанням хмарних технологій AWS EC2, вибір методів для вирішення поставленої задачі є ключовим. Було проаналізовано останні дослідження та публікації, що описують різні методології та підходи для вирішення поставлених завдань дослідження.

Одним з основних методів є реалізація механізмів асинхронного обміну повідомленнями. Асинхронне програмування дозволяє відправляти повідомлення незалежно від інших завдань, підвищуючи швидкість реакції та ефективність системи. Вибір асинхронних бібліотек, фреймворків та патернів буде проаналізовано для визначення найбільш підходящого підходу.

Telegram API – це потужний інструмент, який дозволяє розробникам програмно взаємодіяти з платформою обміну повідомленнями Telegram. Пропонуючи широкий набір функціональних можливостей, він дозволяє бездоганно інтегрувати функції Telegram у зовнішні програми [3]. Розробники можуть використовувати API для надсилання повідомлень, створення ботів, керування групами та доступу до даних користувачів. API Telegram, відомий своєю простотою та універсальністю, підтримує кілька мов програмування, сприяючи різноманітному спектру програм. Його наскрізне шифрування забезпечує безпечне спілкування, що робить його кращим вибором для розробників, які прагнуть включити надійні можливості обміну повідомленнями у свої програмні рішення [4].

Amazon Elastic Compute Cloud (AWS EC2) є ключовим компонентом сучасних хмарних обчислень, що забезпечує масштабовані віртуальні сервери в хмарі. За допомогою AWS EC2 користувачі можуть розгортати віртуальні сервери та керувати ними для розміщення програм і обробки різноманітних робочих навантажень. Його еластичність дозволяє його легко масштабувати, регулюючи обчислювальну потужність відповідно до потреб. Ця гнучкість у поєднанні з різними попередньо налаштованими образами машин сприяє швидкому розгортанню різноманітних програм. Крім того, екземпляри EC2 створені для забезпечення надійності та безпеки, пропонуючи комплексне рішення для підприємств, яким потрібні економічно ефективні та безпечні хмарні обчислювальні ресурси.

Проведення тестування продуктивності має важливе значення для оцінки ефективності різних методів. Навантажувальне тестування, стрес-тестування та бенчмаркінг будуть використовуватися для оцінки здатності програми обробляти різні робочі навантаження та взаємодію з користувачами.

Впровадження надійних методів безпеки, включаючи шифрування, автентифікацію та авторизацію, має вирішальне значення при роботі з конфіденційними даними повідомлень. Механізми управління ідентифікацією та доступом (IAM) і шифрування AWS будуть перевірені на предмет їхньої ефективності в забезпеченні цілісності та конфіденційності даних.

Для оцінки переваг і недоліків різних методів буде використано метод порівняльного аналізу. Це включає порівняння синхронних та асинхронних підходів до відправки повідомлень, фреймворків для розробки ботів та конфігурацій AWS EC2 [5].

Масштабування є критично важливим аспектом архітектури системи, що забезпечує адаптивність до різних навантажень і вимог користувачів. У контексті хмарних обчислень масштабування передбачає динамічне налаштування ресурсів для оптимізації продуктивності. Вертикальне масштабування передбачає збільшення потужності наявного обладнання, а горизонтальне масштабування розподіляє навантаження між кількома машинами. Це підвищує стійкість, покращує час відгуку та враховує зростаючу базу користувачів. Ефективні стратегії масштабування, такі як автоматичне масштабування в AWS, автоматизують налаштування ресурсів на основі попередньо визначених критеріїв, забезпечуючи ефективне рішення для обробки коливань попиту та підтримки оптимальної продуктивності системи [6].

Метою даної роботи є проведення поглибленого дослідження технології, яка використовується для розробки програми для автоматичної розсилки повідомлень, використовуючи можливості хмарної технології Amazon Web Services (AWS) EC2. Дослідження охоплює комплексне дослідження різних аспектів життєвого циклу розробки програми, включаючи архітектурний дизайн, реалізацію та розгортання в інфраструктурі AWS EC2. Дослідження спрямоване на виявлення тонкощів розробки надійної та масштабованої програми, яка автоматизує розсилку повідомлень, враховуючи динамічну та розподілену природу AWS EC2.

Виклад основного матеріалу. Основні функції системи зосереджуватимуться на безперебійній відправці повідомлень на платформі Telegram. Ці функції включають реєстрацію користувача, авторизацію, перегляд списків продуктів. Важливим елементом є розширення цих функціональних можливостей для користувачів-адміністраторів, дозволяючи їм переглядати, редагувати та створювати продукти, отримувати доступ до профілів користувачів і деталей облікового запису, завершувати сеанси користувачів і переглядати історію транзакцій [7].

Оскільки для забезпечення роботи програми необхідно, щоб програма працювала постійно, було обрано сервіс AWS. Було обрано Instance формату t2.micro з характеристиками центрального процесору, зображеного рис. 1.

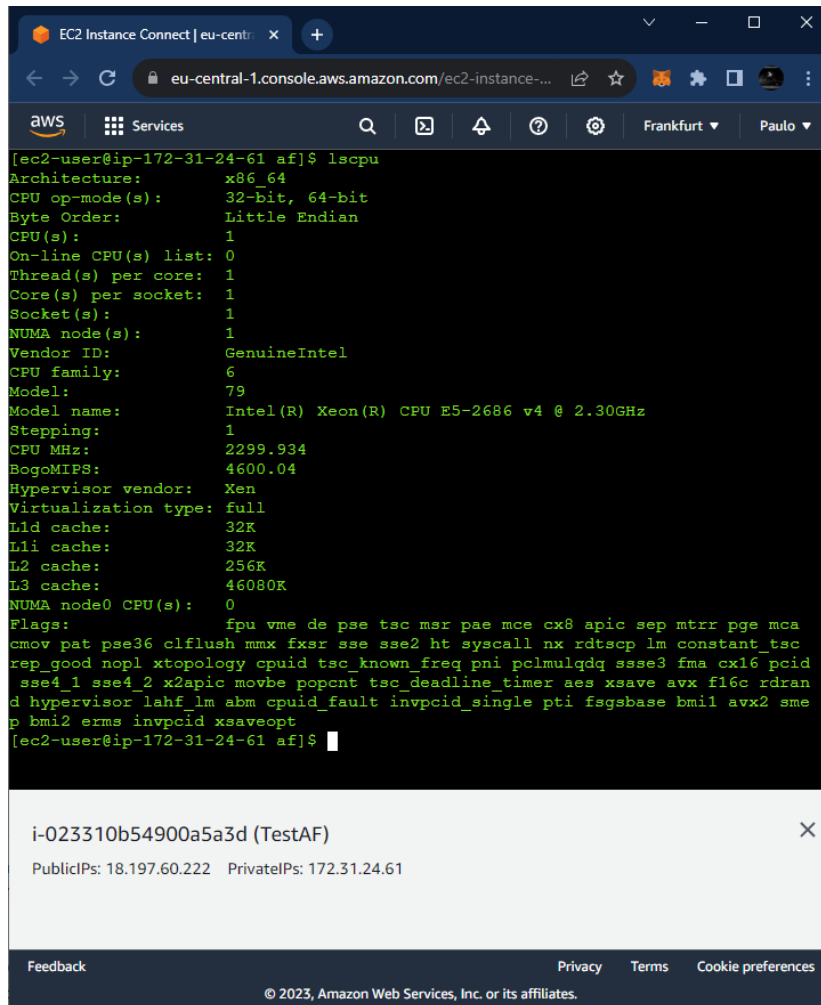


Рис. 1 – Характеристики CPU

Обов’язково повинно бути забезпечення стабільним інтернетом, дані про швидкість мережі Інтернет зображено за допомогою моніторингових служб AWS на рис. 2.

Програма повинна мати пакет програмного забезпечення, щоб працювати. Таблиця 1 містить перелік програмного забезпечення. Для підключення необхідний комп’ютер, оснащений мережевим адаптером і підключений до мережі Інтернет.

Таблиця 1

Програмне забезпечення	
Назва програмного забезпечення	Версія (не нижче)
версія ядра Linux	5.10.186-179.751.amzn2.x86_64
Python 2.7.18	2.7.18
tmux	3.a

В описаній системі ядро Linux слугує фундаментальним рівнем, забезпечуючи основні функції операційної системи. Python, версія 2.7.18, виступає основною мовою програмування для скрипту автоматизації Telegram. Універсальність і простота використання Python робить її ідеальним вибором для взаємодії з API Telegram. Крім того, наявність tmux версії 3.а покращує виконання скрипту, полегшуючи мультиплексування терміналів, що дозволяє одночасно керувати кількома сесіями терміналів. Ці програмні компоненти формують надійне середовище, що забезпечує надійне виконання інструменту автоматизації Telegram на зазначеній системі.

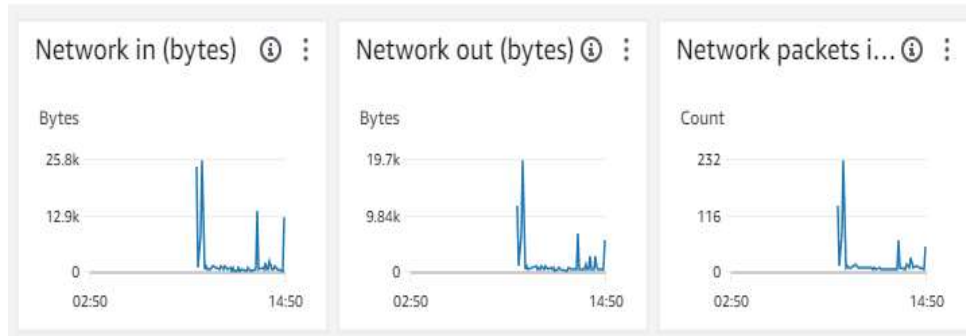


Рис. 2 – Швидкість мережі

В основі програми Python лежить її ретельно розроблена модульна архітектура, критичний аспект, що сприяє її універсальності та масштабованості. Архітектура структурована таким чином, щоб інкапсулювати різні функції, кожна з яких служить певній меті в ширшому контексті автоматизованого розповсюдження повідомлень на платформі Telegram.

Програма починає свою роботу з модуля налаштування облікового запису, що дозволяє користувачам легко налаштувати свої облікові дані Telegram. Цей модуль розроблено зі зручним інтерфейсом, який збирає важливу інформацію, таку як ідентифікатор API, хеш API та номер телефону. Бібліотека Telethon забезпечує безпечну взаємодію з API Telegram, забезпечуючи цілісність процесу налаштування облікового запису користувача.

Після налаштування облікового запису в роботу вступає модуль отримання повідомлень. Цей модуль використовує асинхронні механізми для ефективного отримання повідомлень із визначених каналів. Використовуючи потужність бібліотеки Telethon, програма взаємодіє з API Telegram для отримання повідомлень на основі визначених користувачем параметрів, забезпечуючи динамічний і адаптований підхід до отримання повідомлень [8].

Наріжним каменем функціональності програми є модуль Asynchronous Message Forwarding. Асинхронна робота дозволяє програмі обробляти декілька каналів одночасно без шкоди для продуктивності. Цей модуль використовує асинхронну бібліотеку Python, забезпечуючи оптимальне використання ресурсів і оперативність. Повідомлення, отримані з модуля отримання повідомлень, плавно пересилаються на кілька каналів, підвищуючи ефективність зв'язку за різними каналами.

Основним елементом модульної архітектури є бездоганна інтеграція з бібліотекою Telethon. Створений для взаємодії з Telegram, Telethon діє як міст між програмою Python і API Telegram. Його широкий функціонал спрощує складні операції, такі як пересилання повідомлень і взаємодія з об'єктами Telegram. Модульна архітектура гарантує, що кожен модуль ефективно використовує бібліотеку Telethon, сприяючи згуртованому та спрощеному процесу розробки [9].

Модульний дизайн не тільки підвищує ефективність програми, але й сприяє її адаптивності. Користувачі можуть вибірково розгортати конкретні модулі відповідно до своїх вимог, забезпечуючи адаптоване та ресурсоефективне виконання. Цей модульний підхід закладає основу для майбутніх удосконалень і доповнень, гарантуючи, що програма може розвиватися в тандемі з динамічним ландшафтом Telegram і вимогами користувачів.

Створюємо сесію «tmux» для того, щоб код працював постійно, за допомогою команди «tmux new-session -s autoforward» рис. 3 [10].

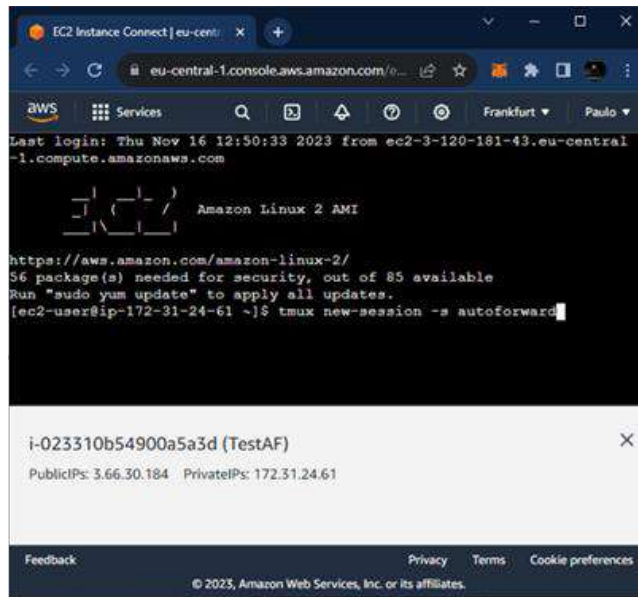


Рис. 3 – Створення сесії з назвою «autoforward»

Тепер запускаємо програму за допомогою «python3 main.py», обираємо почати пересилку «2: Start Forwarding». Вводимо «Channel ID» та «ID MESSAGE» і програма успішно запущена, відображаються ID каналів, куди було відправлено повідомлення (рис. 4).

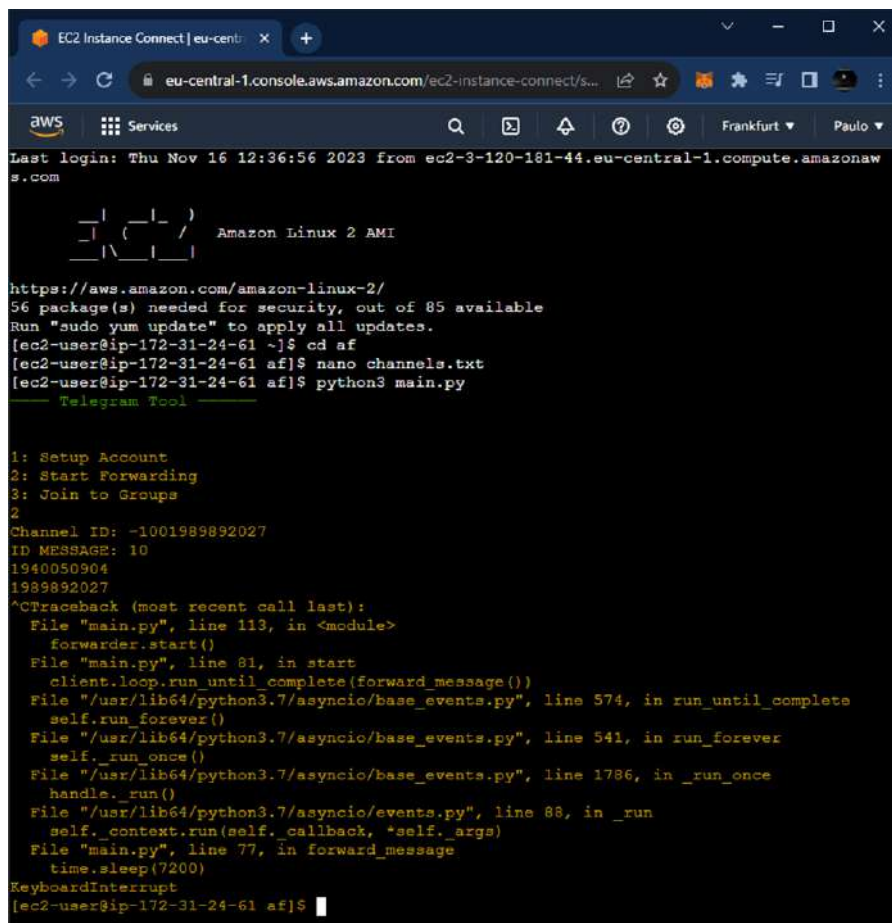


Рис. 4 – Знімок екрана, коли пересилка повідомлень відбулась

Таймер встановлений пересилати це повідомлення через кожні дві години, це вказано в коді програми «time.sleep(7200)». Перевіримо чати в самому телеграмі, перший та другий чати зображені відповідно на рис. 5 а) та рис. 5 б).

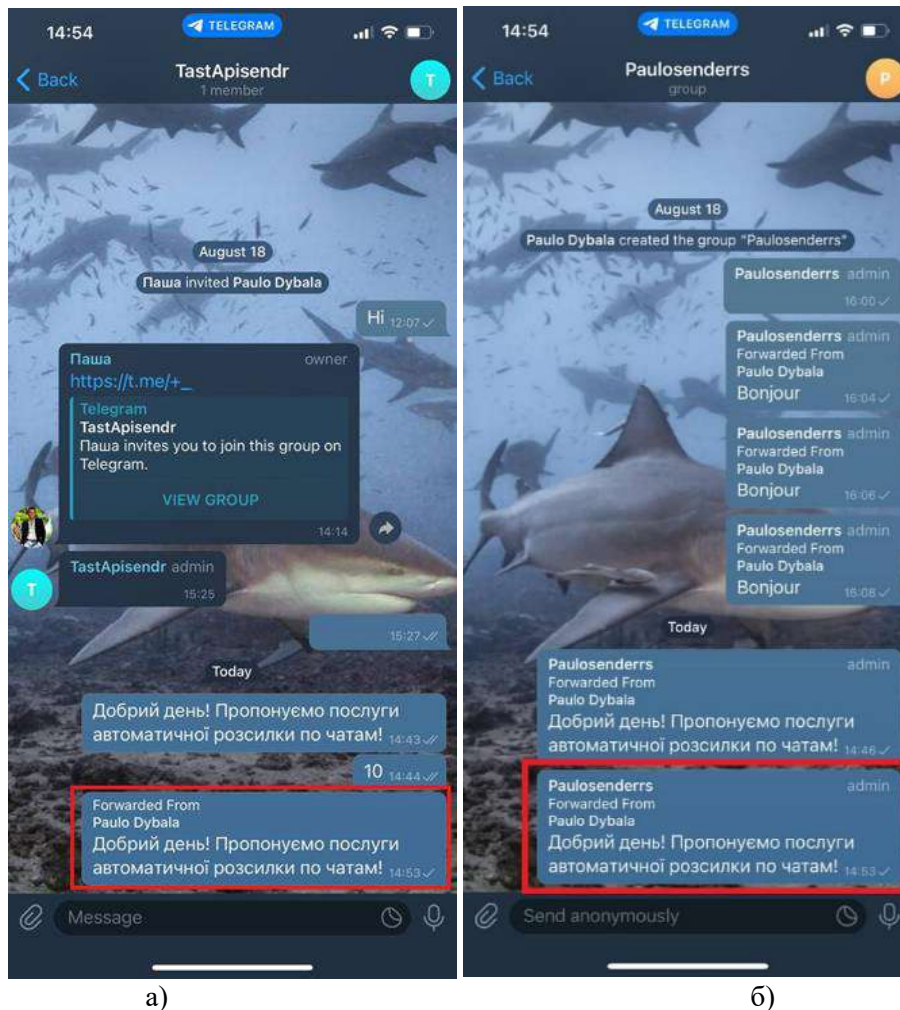


Рис. 5 – Успішна пересилка повідомлення: а) – в першому чаті; б) – в другому чаті

В рамках експериментальних досліджень інструмент Telegram пройшов ретельне тестування для перевірки його надійності, функціональності та відповідності визначеним вимогам. Особливістю інструменту є можливість асинхронного пересилання повідомлень, що забезпечує автоматичне та ефективне розповсюдження інформації кількома каналами.

Модульна структура інструменту складається з різних програмних модулів, включаючи ядро Linux версії 5.10.186-179.751.amzn2.x86_64, Python 2.7.18 та tmux 3.a. Ці модулі в сукупності сприяють безперебійній роботі інструменту. AWS EC2 Instance слугує хостинговою платформою, що відповідає найкращим галузевим практикам масштабованості, безпеки та надійності.

Висновки

В рамках даної роботи було проведено дослідження предметної області, аналіз потенційних методів вирішення завдання. Були визначені вимоги до інформаційної системи, її функцій, складено технічне завдання. Проведені експериментальні дослідження розробленої інформаційної системи, що показують, що автоматизація процесу пересилки повідомлень збільшує швидкість їх доставки у велику кількість чатів на 120 секунд, а це ефективніше в 40 разів.

Було проведено дослідження, що дозволяє зробити висновок, що розроблена за запропонованою технологією програма має меншу в 5 разів ресурсомісткість, ніж звичайний телеграм клієнт. Програма протестована у реальних умовах та доводить її надійність та безпеку

використання. Програма задовольняє виявлений ринковий попит на автоматизацію, але й має продуманий дизайн, пріоритети користувацького досвіду та дотримується найкращих практик у програмуванні на Python та хмарній інфраструктурі.

Перелік використаних джерел:

1. Liu K., Dong L.-J. Research on cloud data storage technology and its architecture implementation. *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 29. Pp. 133-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.12.682>.
2. Amazon Web Services. AWS Elastic Compute Cloud (EC2): Documentation and User Guides. 2021. URL: <https://aws.amazon.com/ec2/documentation/> (дата звернення: 18.04.2023).
3. What is Telegram Messenger. 2018. URL: <https://medium.com/@telegramguide/what-is-telegram-messenger-c079418e1f10> (дата звернення: 25.04.2023).
4. TelegramClient. URL: <https://doc.esdoc.org/github.com/dot-build/telegram-js/class/src/telegram-client.js~TelegramClient.html> (дата звернення: 05.02.2023).
5. amazon.aws.ec2_instance module – Create & manage EC2 instances. AWS Documentation. URL: https://docs.ansible.com/ansible/latest/collections/amazon/aws/ec2_instance_module.html (дата звернення: 23.04.2023).
6. Artificial intelligence in information systems research: A systematic literature review and research agenda / Collins C., Dennehy D., Conboy K., Mikalef P. *International Journal of Information Management*. 2021. Vol. 60. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2021.102383>.
7. Faisandier A., Roedler G., Adcock R. System Architecture. SEBoK. URL: https://sebokwiki.org/wiki/System_Architecture (дата звернення: 30.04.2023).
8. Telethon's Documentation. URL: <https://docs.telethon.dev/en/stable> (дата звернення: 07.05.2023).
9. Python Standard Library. Python 3.12.2 documentation. URL: <https://docs.python.org/3/library/> (дата звернення: 07.05.2023).
10. Tmux. Ubuntuusers. URL: <https://wiki.ubuntuusers.de/tmux/> (дата звернення: 15.05.2023).

References:

1. K. Liu, and L.-J. Dong, «Research on cloud data storage technology and its architecture implementation», *Procedia Engineering*, vol. 29, pp. 133-137, 2012. doi: 10.1016/j.proeng.2011.12.682.
2. Amazon Web Services. AWS Elastic Compute Cloud (EC2): Documentation and User Guides, 2021 [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/ec2/documentation/>. Accessed on: April 18, 2023.
3. What is Telegram Messenger, 2018 [Online]. Available: <https://medium.com/@telegramguide/what-is-telegram-messenger-c079418e1f10>. Accessed on: April 25, 2023.
4. TelegramClient [Online]. Available: <https://doc.esdoc.org/github.com/dot-build/telegram-js/class/src/telegram-client.js~TelegramClient.html>. Accessed on: May 5, 2023.
5. amazon.aws.ec2_instance module – Create & manage EC2 instances. AWS Documentation [Online]. Available: https://docs.ansible.com/ansible/latest/collections/amazon/aws/ec2_instance_module.html. Accessed on: April 23, 2023.
6. C. Collins, D. Dennehy, K. Conboy, and P. Mikalef, «Artificial intelligence in information systems research: A systematic literature review and research agenda», *International Journal of Information Management*, vol. 60, pp. 1-17, 2021. doi: 10.1016/j.ijinfomgt.2021.102383.
7. Faisandier A., Roedler G., Adcock R. System Architecture. SEBoK [Online]. Available: https://sebokwiki.org/wiki/System_Architecture. Accessed on: April 30, 2023.
8. Telethon's Documentation [Online]. Available: <https://docs.telethon.dev/en/stable>. Accessed on: May 7, 2023.
9. Python Standard Library. Python 3.12.2 documentation [Online]. Available: <https://docs.python.org/3/library/>. Accessed on: May 7, 2023.
10. Tmux. Ubuntuusers [Online]. Available: <https://wiki.ubuntuusers.de/tmux>. Accessed on: May 15, 2023.

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

Стаття надійшла 13.09.2023
Стаття прийнята 17.10.2023

131 ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

УДК 624.072,3:64.066:316

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.299991

© Волошин В.С.*

СТІНА. УНІКАЛЬНІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ

Вперше звертається увага на дуже поширений елемент багатьох будівельних та інших споруд, що позначається словом «стіна», з точки зору її функціональності і ролі в розвитку інженерної думки, її фундаментальності як технічної споруди в розвитку людини і всього суспільства, а також унікальних властивостей цього елемента, що характерні не тільки для зведення будівель, але і для інших суміжних систем, зокрема, для визначення сфер, призначених для реалізації функцій і потреб людини. Систематизовані основні функції, що виконує стіна на користь людини, і які роблять її соціально корисним об'єктом. Відзначено властивість стіни структурувати житловий простір людини відповідно до виконуваних функцій, яка мало вивчена в сучасній літературі. У такому аспекті елемент будівель і споруд – стіна – відповідає не тільки вимогам життєзабезпечення або безпеки людини, а й представлений як фактор, що має соціально-економічне значення, зокрема, сприяє розвитку землеробства, ремісництва, освіти. Технічні характеристики узагальненої конструкції – стіни – представлені в порівнянні з відомими технічними закономірностями функціонування інших фундаментальних винаходів – важеля, колеса, вогнища тощо. У статті представлено узагальнюючі властивості, які роблять ці об'єкти надзвичайно актуальними для суспільства, тому ж вони і стали поворотними точками в розвитку людства. Показані основні функції, які забезпечує такий елемент, як стіна, для багатьох систем, деякі з них є унікальними і єдино можливими, завдяки конструкції жорсткої вертикальної площини в житловому просторі для людини. Представлені залежності, що описують умови енергетичного обміну, завдяки яким виконуються основні функції стіни – захист від зовнішніх джерел енергії – теплової, акустичної, кліматичної, інформаційної та ін., а також збереження внутрішньої енергії в системі «стіна-житло». Робота має перспективи розвитку, виглядаючи з того, що сучасні конструкції стіни отримують істотні зміни в напрямку їх подальшої уніфікації, розширення функціональної спрямованості на користь людини.

Ключові слова: стіна, важіль, колесо, вогнище, функції, екосистема «людина-житло», структурування житлового простору, безпека людини.

V.S. Voloshin. Wall. Unique functional properties. For the first time, attention is drawn to a very common element of many building and other structures designated by the word «wall». Its functions and role in the development of engineering are shown. Its fundamentality as a technical structure in the development of a person and the whole society is shown. We paid attention to the unique properties of this element. They are not only characteristic of the construction of buildings. They make it possible to identify areas intended for the implementation of human functions and needs. The property of the wall to structure the living space of a person according to the functions performed, which has been little studied in the literature, has been noted earlier. In this aspect, an element of buildings and structures – a wall – meets not only the requirements of human life support or safety, but is presented as a factor of socio-economic significance. Представлены технические характеристики обобщенного сооружения – стены. They are compared with the well-known technical regularities of the functioning of other fundamental inventions, such as

* д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-9922-5618

the lever, the wheel, the hearth, etc. The paper presents the generalizing properties that make these objects extremely relevant for society. They were turning points in its development. The main functions that are provided by such an element as a wall for many systems are presented. Some of these functions are unique and the only possible ones, thanks to the design of a rigid vertical plane in the living space for a person. Dependencies describing the conditions of energy metabolism are presented. Thanks to these dependencies, the main functions of the wall are fulfilled – protection from external energy sources – thermal, acoustic, climatic, informational, etc., as well as the preservation of internal energy in the «wall-dwelling» system. The possibilities and prospects for the development of the wall in modern society are shown.

Key words: wall, lever, wheel, hearth, functions, «man-dwelling» ecosystem, structuring of living space, human safety.

Постановка проблеми. Екосистеми, в яких живе людина, зазнають постійних змін, які є основою розвитку суспільства. Найчастіше корінними факторами таких ключових змін є так звані «глобальні винаходи» людства, які сприяють розвитку продуктивних сил, суспільним відносинам і технічному прогресу. До таких нововведень можна віднести багато технічних систем, таких як комп'ютер, інтернет, а раніше, послідовно, парову машину і телеграф, а ще раніше – колесо, вогнище, гроші. Розширення цього переліку дає можливість по-іншому ставитися до форм розвитку людини і його оточення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Серед відомих і незаперечних винаходів, які відкривали і супроводжували цілі епохи в розвитку людства, таких як важіль, колесо, вогонь у вогнищі, слово і буква, має знаходитися місце для такого винаходу, як стіна. Звичайна стіна, властивості і функції якої відігравали величезну роль в історії людства в усі часи його існування [1-3].

Для пізнього палеоліту таке явище в людському існуванні, як відмова від печерного житла на користь штучного, означало відхід від прив'язки лише до певних місцевостей і виникнення можливості заселення і створення житла у будь-якому місці земної поверхні, задля занять землеробством, а не збиральництвом, скотарством, а не тільки полюванням, і, нарешті, ремеслами на більш високому рівні, а не примітивною обробкою кам'яних виробів. У майбутньому це буде обробка заліза, скульптурне та образотворче мистецтво, а не примітивні наскальні малюнки. Все це стало допустимим завдяки зведенню стінових конструкцій як основи житла.

Поява штучної стіни означала величезний крок у зміні типу житла для людини. В епоху неоліту з'явилися перші штучні споруди, що звільняють людину від територіальної прив'язаності до печер, збіднілих кам'яних територій, розширюють площі його проживання, головним чином заради землеробства і професійних ремесл. Перші будинки з'явилися приблизно одинадцять тисячоліть тому на Близькому Сході [4]. Це були примітивні стіни в вигляді покладених на підлогу кам'яних плит, річкових валунів, як це було в горах Загрос. Це могли бути перегородки, гілки, конструкції з кісток, шкури великих тварин. Пізніше стіни були покриті зовнішніми перекриттями найпростішої форми. Все це забезпечувало захист від погодних умов і проникнення ззовні в житло.

Для доантичного світу і пізніше створення стінових будівель означало не більше і не менше, як виникнення цілих міст, коли житла великої кількості неродинних людей розташовувалися неподалік від місця застосування їх праці, що сприяло подальшому розвитку землеробства, виникненню вузькоспеціалізованих професій, зародженню ремесл і т. д., становленню і послідовному розвитку суспільства. Майстерність, в цілому, зобов'язана своїм розвитком саме містам з їх типовою стінною конструкцією житла. Крім того, стіна будинку сприяла відходу від племінного, родового поселення на користь сімейного, розвитку соціальності.

Далі з'ясувалося, що античний світ і Середньовіччя не могли існувати без міцних фортечних стін, які захищали міста від пограбування та руйнування [4]. Стіни господарських будівель ставали захистом для домашніх тварин, приручаючи їх до єдиного місця проживання. Стіна в'язниці стає бар'єром для злочинців і неугодних людей. Функціональність стін була значно розширена.

Мета роботи – визначити місце узагальненої технічної споруди – стіни, як одного з фундаментальних елементів системи «людина-навколишнє середовище», що забезпечило можливість соціально-економічного розвитку людського суспільства.

Виклад основного матеріалу. У найпростішому вигляді *стіна* – це штучна, жорстка, вертикальна, плоска або наближена до площини, технічна конструкція, призначена для просторового поділу території людського існування на окремі зони за функціональними ознаками. Цим формулюванням ми підкреслюємо *функціональну особливість* стіни, що робить її унікальним винаходом, нарівні з іншими, які зробили значний вплив на розвиток людства.

Але стіна існує і як частина більш загального поняття «дім». Вона є складовою фундаментальної потреби людини у виживанні, забезпеченні особистої безпеки, захисту від недуг, хвороб, стихійних лих. Пізніше вона стає фактором гідності людини, що мешкає тут, її захищеності, статусу в суспільстві. У цьому сенсі слід розглядати систему «стіна-житло». Синоніми до терміну «стіна»: паркан, огорода, вигоронок, частокіл, парапет, амбразура, палісадник, тин, дюваль, брадмауер. До стін належать перегородки, вали, фасадні поверхні тощо.

Нижче наведені функції та особливості, пов'язані з поняттям «стіна» (табл. 1). Очевидні фундаментальні властивості цих споруд, які зіграли вирішальну соціальну роль в історії розвитку людства на планеті Земля. Перелік таких функцій дає уявлення про значимість цього винаходу, ставлячи його в один ряд з іншими подібними епохальними винаходами людства, такими як, наприклад, колесо або писемність.

Таблиця 1

Функціональність стіни, її особливості та опис функцій

№.№	Функція стіни	Опис, приклади
1	Територіальна варіабельність (на відміну від печерного житла)	1.1. Можливість установки стіни в будь-якому необхідному місці поселення людини
		1.2. Наближення дому до місця професійної діяльності
		1.3. Підвищення активності землеробства та ремесл
		1.4. Створення умов для торговельної діяльності
		1.5. Один із способів досягнення осілості
2	Значення просторового розділення	2.1. Структурування простору на окремі осередки для соціальних та індивідуальних цілей
		2.2. Захист від припливу зовнішньої енергії різного типу і потужності
		2.3. Захист від впливу непотрібної інформації
3	Обособлення території	3.1. Розподіл функціонального призначення території в залежності від потреб людини (кухня, спальня, сарай, хлів, аудиторія)
		3.2. Перешкода для обміну інформацією між просторами, розділеними стіною. Житло, яке обнесене стіною, захищене від зовнішнього спостереження. Тюремна стіна не дозволяє ув'язненому контактувати із зовнішнім середовищем
		3.3. Прикордонний поділ території (Корейська стіна, Іспано-марокканська стіна, Індійсько-Кашмірська стіна, Нікосійська (Кіпрська) стіна, Іудео-Самарійська стіна Ізраїлю, Берлінська стіна, Стіна Адріана в Північній Англії та ін.)
4	Конструктивні функції	4.1. Опора, несуча конструкція
		4.2. Наявність допоміжних конструктивних елементів, що підвищують функціональність стіни
		4.3. Аеродинамічний опір
		4.4. Механічна міцність
		4.5. Естетична площина

Продовження таблиці 1

№№	Функція стіни	Опис, приклади
5	Технологічні функції	5.1. Акустичний, світловий, тепловий захист
		5.2. Захист від попадання вибухових речовин або твердих балістичних предметів (міські стіни)
6	Гігієнічні функції	6.1. Захист від погодних умов, вітру, опадів, зовнішньої температури та ультрафіолетових впливів
7	Обмежувальні функції	7.1. Обмеження природного доступу всередину приміщення
		7.2. Обмеження доступу зсередини назовні, включаючи всі типи суден, в'язниць, темниць.
		7.3. Забезпечення організованого доступу в приміщення або місто через двері, ворота в стіні
		7.4. Утримання ворога поза зони доступу до міської стіни
		7.5. Перешкода для міграції народів і товарів між країнами. За останні 20 років між державами світу було зведено 56 прикордонних стін, що запобігають нелегальній імміграції, тероризму та транзиту заборонених товарів. Загальна протяжність таких стін на сьогоднішній день становить понад 24 000 км. Для порівняння, Велика Китайська стіна має довжину 8 800 км
8	Естетичні функції	8.1. Декоративний або естетичний дизайн простору
		8.2. Розміщення картин на стіні для перегляду
9	Психологічні функції	9.1. Почуття безпеки, яке не збігається з реальною небезпекою
		9.2. Поділ за ступенем комфорту, предмети оздоблення стін
10	Символізм як властивість стіни	9.1. Культове призначення стіни, ритуали, звичаї (вівтар, Стіна плачу, стіна Цоя)
		10.2. Символ порога, перешкода, подолання якої є способом переходу від зовнішнього і буденного до символічного і стоїчного
		10.3. Алегоричність характеру терміну (в літературі: стіна – р оз'єднання, мости - об'єднання)

Всі надані показники, як і багато інших, пов'язаних з предметом дослідження – стіною, можна співвідносити з декількома універсальними функціями стіни. Перша з них несе в собі одне з фундаментальних значень для розвитку людини на етапі переходу від збиральництва і полювання до землеробства, скотарства та ремесл, а саме територіально пов'язує житло і місце професійної діяльності: будинок і поле, житло і ремесло, культ і натовп. І однією з головних функцій тут є просторовий поділ території проживання або зони існування людини за допомогою стіни. Таким чином, стіна стала технічним забезпеченням для організації саме осмисленого людського побуту в цьому світі. Особливість, яка і на цей час повністю себе виправдовує.

Під цією функцією мається на увазі структурування території, на яку претендує людина. Наприклад, житло повинно мати зони, де готується і споживається їжа. І ця територія повинна бути відокремлена від території для професійної діяльності або для сну. Таким чином, стіни дозволяють структурувати житло, будинок, передбачивши приміщення для кухні, кабінету, вітальні, спальні тощо. Але стіни дозволили структурувати й інші потреби людини, зокрема, потреби соціального, професійного, економічного чи військового характеру. Зокрема, міські оборонні стіни, культові споруди тощо. Структурування території людського існування не обмежується лише стінами житла чи міста. Структурування здійснюється і в русі, коли людина використовує

в поході повозку, автомобіль, купе вагона, каюту пароплава, намет і т. д. Все це забезпечується людиною стінами або їх функціональними аналогами.

Структурування за допомогою стін здійснюється за певними ознаками, наприклад, потреби людини, його безпека, умовності присутності, обзорність території. Стіна дає можливість уніфікувати функції людини, просторово розділити їх на ті, які відрізняються інформативністю, особливою значимістю і обладнанням, видами виконуваних робіт або відпочинку, наявністю поруч інших людей і т. д. Це своєрідні стільники, осередки, що призначені для локалізації окремих людей та їх групи в певній місцевості, яка виявилася зручною для життєзабезпечення та виконання певних, в тому числі професійних і соціальних, функцій.

Друга основна функція стіни полягає в наступному. Для житлового приміщення стіна виступає способом локалізації енергії та організації теплопостачання для людини. Стіна (зрозуміло, разом з підлогою та верхньою стелею приміщення) бере участь в організації теплообміну, не дозволяє теплу виходити з приміщення. При цьому стіна прогрівається і стає другорядним джерелом акумульованого тепла, підтримуючи мікрокліматичний режим цього приміщення. Селянська хата, яранга, чум, кибитка, вігвам, дерев'яний, глинобитний або цегляний будинок – всі вони мають специфічні особливості для збереження внутрішнього тепла і забезпечення потрібного для людини мікроклімату житла.

Ще одна частина цієї важливої функції стіни пов'язана із захистом від проникнення зовнішньої енергії (прямих сонячних променів, світла, звуку, тепла тощо) всередину приміщення. У тому числі, із захистом від проникнення сторонніх, що забезпечує прояв індивідуальності життєвого простору для людини.

Але було б неправильно ототожнювати стіни тільки з житлом людини. Функції стіни набагато ширші. Просте перерахування творів рук людських, які дозволили їй піднятися на сучасний рівень розвитку, і пов'язані з використанням стін у найрізноманітніших варіаціях, змусить ставитися до стіни, цього творіння, з великою повагою. Універсальність самого феномена «стіни» підтверджується широким охопленням найрізноманітніших сторін людського життя, в яких вона бере участь. Ось деякі з цих прикладів.

1. Одомашнення тварин як етап переходу від мисливсько-збірницького до повного або часткового осілого життя було неможливим без будівництва загонів (прообразів стінових конструкцій), корівників для утримання худоби та захисту її від негоди. Потрібні були несучі, огорожувальні та ізоляційні стіни. Далі – більше.

2. Стінки в резервуарах будь-якого розміру і конструкції для зберігання продуктів харчування, води, вина, масл та інших рідин, зерна, корисних копалин дозволили в довгостроковій перспективі зберігати продукти і товари і транспортувати їх, не припускаючи їх висипання.

3. Гребля на річці – це також стіна, яка перешкоджає стоку води і призначена для зміни гідравлічного режиму річок. Здатність такої стінки обмежувати потік води призводить до збільшення її гідравлічного напору та засвоєнню потенціалу падаючої води, тобто енергії.

4. Саме стінам люди зобов'язані виникненням цілої індустрії конструкцій, що функціонально виконують роль тимчасового порушення цілісності стіни, а саме:

- для проходу людини через стіну (двері, петлі, ручки);
- для забезпечення можливості зовнішнього спостереження через існуючу стіну (вікна, рами, скляні конструкції);
- для підтримки замкнутості площини стіни з тимчасовим відкриванням дверей (замки, затвори, жалюзі, тріскачки).

5. Більшість стародавніх і сучасних культових споруд не відбулися б за своєю функціональністю, якби не було стінових конструкцій. Знову ж таки, можливості стіни дозволяли людині будувати культові споруди відповідно до своїх територіальних потреб, наприклад, в містах або, навпаки, в далеких монастирях.

6. Стіна – це обмежувач вільного пересування людини, насильницьке обмеження її волі. В'язниці та темниці неможливі без міцних стін. Ця функція стіни використовувалася у всі століття аж до нашого часу та є однією з найактуальніших для обслуговування будь-якого державного устрою. Тут стіна виступає фізичним і моральним стабілізатором громадянських обов'язків і прав кожного з людей, будучи інструментом насильницького обмеження свободи пересування для порушників державних правил і законів на певний визначений час.

7. Житла людей піддавалися постійним руйнуванням. Від старості, але частіше від воєн. Загальне правило для будь-якого віку: якщо ще є стіни, будинок можна відреставрувати. Якщо стіни зруйновані, будинок відбудовують, починаючи від фундаменту, і частіше, в іншому місці, але це буде вже інший будинок. Така роль стіни в будь-якій будівлі.

Список прикладів, які стосуються предмета вивчення, стіни, нескінченний. Всі вони підкреслюють різноманіття конструкцій і спільність функціональності стін, їх нескінченну потребу в призначенні, незалежно від епох, форм соціальної організації життя, соціальної системи або формації, технологічного укладу, в якому живуть люди. Перелічимо закони або закономірності, що лежать в основі подібних «доленосних винаходів» для людини (табл. 2).

Таблиця 2

Закони і закономірності, що лежать в основі деяких класичних «винаходів» людини

№№ п/п	Тип винаходу	Закони, що лежать в основі Дії	Параметри за- безпечення
1	Важіль	Закон рівноваги двох плечей F – сила, що прикладена; r – плече прикладення сили	$F_1/F_2 = r_2/r_1$
2	Колесо	Гіроскопічний ефект і умови тертя кочення та ковзання. \vec{M} – момент сили; \vec{L} – момент імпульсу; $\vec{\omega}$ – кутова швидкість	$\vec{M} = [\vec{\omega} \times \vec{L}]$
3	Вогнище	Закони спрямованого теплообміну. u – щільність теплового потоку; a – коефіцієнт Фур'є	$du/d\tau = a^2 \Delta u = f(r, \tau)^*$
4	Мова, слово	Закони соціального та біологічного напрямку права спілкування	-
5	Писемність	Впорядковане співставлення позначок і звуків (слів, зображень)	-
...

* - стосується закону теплопровідності Фур'є, але тут також можуть знаходитися рівняння конвективного теплообміну і закон Кірхгофа.

Стіна в цьому ряду також повинна відповідати основним законам, за якими вона може виконувати свої універсальні функції. Беручи до уваги, що однією з основних функцій стіни є ізоляція двох різних частин простору від зовнішніх джерел енергії та інформації, правильно показати, що основою її функціональної діяльності є закони збереження енергії. Не виключаючи при цьому її міцнісних якостей тощо.

Однією з найважливіших структурних і технологічних властивостей стіни є її відношення до зовнішньої енергії та інформації, які можуть проходити крізь стіну і для якої вона є штучною перешкодою.

Енергією, яка може бути заблокована стіною (див. табл. 1), найчастіше є енергія вітру (п. 4.3), енергія звуку або світлової хвилі (п. 5.1), атмосферні опади (п. 4.4), зовнішнє тепло сонця (п. 6.1) або внутрішнє тепло, що використовується для обігріву житла (пп. 4 і 6). Для міських стін – це кінетична енергія каменів, бомб і снарядів і т. д. (п. 5.2) В якості інформації може йти річ про запобігання проникненню звукових сигналів різного призначення, обмеження прямої видимості інтер'єру приміщення в системі «стіна-житло», зовнішнього освітлення (п. 3.2) і т. д.

Припустимо, що в існуючому наборі структурних типів стін X , що складаються з декількох підмножин $x_k \subset X$ за матеріалами та формами (бетон, камінь, глина, дерево, плоский, складної конфігурації, ...), кожен з яких, в свою чергу, включає в себе параметричний ряд a_{kj} із j – значень, що відповідають фізичним параметрам, для захисту від яких конструкція призначена. При цьому в кожній підмножині x_k існує, як мінімум, один параметр переваги a_{kj}^* , який є основним, заради якого ця стіна була зведена. Такий параметр переваги відноситься до власного розподілу енергії, від якого в основному «захищає» ця стіна, не пропускаючи її, або, навпаки, не випускаючи назовні. Та частина енергії, з якою «впоралася» стіна, – це енергія, що розсіюється, підвищуючи певну частку ентропії системи «стіна-житло». І ця ж характеристика визначає якість стіни, тобто її резистентність до проникаючої енергії, її механічні, теплозахисні, акустичні та

інші властивості, кожна з яких, найчастіше, залежить від лінійних розмірів стіни: її висоти, товщини, довжини по відношенню до потоку енергії. По відношенню до сумарного потоку енергії лінійні параметри стіни є найбільш важливими і використовуваними (табл. 3). Наявність інших фізичних параметрів стіни робить її більш функціональною і універсальною.

Таблиця 3

Опосередковані параметри енергетичного впливу на конструкцію типу «стіна»

№№ п/п	Вид енергії	Найменування параметра M_j	Деякі формули для позначення $M(\Delta L)$	Одиниця вимірювання
1	Механічна	Коефіцієнт вигину μ , міцність на вигін, щільність ρ .	$\mu = -\frac{\Delta d}{d} \frac{l}{\Delta l}$ $\rho = \frac{M}{v}$	МПа кг/см ² кг/см ³
2	Теплова	Коефіцієнт теплопровідності λ	$\lambda = \lambda_0(1 - b(T - T_0))$	Дж/(м·с·К)
3	Акустична	Коефіцієнт звукопоглинання α і щільність ρ	$\alpha = E_{\text{пр}}/E_{\text{пад}};$ $\rho = M/v$	Безрозмірна д. від 0 до 1; кг/м ³
4	Енергія вітру	Коефіцієнт аеродинамічного опору	$X = C_x \frac{\rho V^2}{2} S$	Безрозмірна величина
5	Волога	Коефіцієнт дифузії води	$\frac{dM}{dt} = -DC \frac{dC}{dx}$	см ² /с
6	Інформація	Коефіцієнт доступності	$\varepsilon = I_{\text{пр}}/I_{\text{пад}}$	Безрозмірна од. від 0 до 1

Потік енергії i -го типу e_i , що падає на стіну, приведений до одиниці її площини (кДж/м²), поділяється на ту його частину $e_i^{(1)}$, яка проникає через конструкцію на протилежну поверхню стіни, ту частину $e_i^{(2)}$, яка відбивається від стіни і повертається назовні, проти вектора основного потоку енергії, і ту його частину $e_i^{(3)}$, яка поглинається матеріалом стіни таким чином, що $e_i = e_i^{(1)} + e_i^{(2)} + e_i^{(3)}$.

З точки зору функціональності стіни енергія $e_i^{(1)}$ є найбільш негативною, проникнення якої ззовні в житло стіна, як захисна споруда, не змогла запобігти. Тому її масштабоване одиничне відношення до загальної падаючої енергії $\frac{e_i^{(1)}}{e_i}$ є своєрідним показником проникності стіни по відношенню до i -го джерела енергії, а в співвідношенні $k_i = 1 - \frac{e_i^{(1)}}{e_i} = \frac{e_i^{(2)} + e_i^{(3)}}{e_i}$ – коефіцієнтом енергетичної ефективності стіни по відношенню до енергетичного потоку e_i , що падає на неї. Але цей же коефіцієнт (вимірюється в долях одиниці від 0 до 1,0) дає уявлення про те, яка частина енергії ($e_i^{(2)} + e_i^{(3)}$), не проникаючи через стіну, втрачається у вигляді розсіяної енергії i -го роду, що падає на стіну. Ця енергія розсіюється в просторі і опосередковано відноситься до ентропії системи «стіна-навколишнє середовище». Коефіцієнт k_i дає можливість оцінити розподільні якості такої споруди, як стіна, приймаючи до уваги позитивні процеси зовнішнього розсіювання будь-якого виду енергії від стіни (одна з її основних функціональностей) і пов'язаних з цим явищ зростання ентропії для частини енергії $e_i^{(3)}$, що розсіюється в системі «стіна-навколишнє середовище». До цього слід додати, що енергія, що проникає через стіну, стає пов'язаною з мінімальною ентропією для того ж енергетичного потоку e_i з внутрішньої сторони стіни. У динаміці це представляється як мінімізація ентропії всередині житла і її зростання за його межами.

Для потоку теплової енергії e_T , яка генерується всередині приміщення, обмеженого стінами, наприклад, для його обігріву, ця пропорція витримується у вигляді $e_T = e_T^{(1)} + e_T^{(2)} + e_T^{(3)}$ (кДж/м²). У цьому випадку коефіцієнт енергетичної ефективності теплового потоку, що нас

цікавить, розраховується як $k_T = (e_T^{(1)} + e_T^{(3)})/e_T$. Ми маємо справу з процесами теплообміну, та й взагалі, з процесами обміну енергією в системі «стіна-середовище», які сформульовані як основні закони, що лежать в основі функціонування стіни. І тут узагальнююча ентропія системи пов'язана з втратою енергії чи за однією, чи за іншою сторонами стіни, в залежності від її функціональності.

Зміна узагальненої ентропії, що включає в себе її енергетичну та інформаційну складові, має вигляд $\Delta S_{\text{заг},i} = \sum \Delta S_{e,i} + \sum \Delta H_{и,i}$.

З точки зору ентропії системи «стіна-житло» енергія $e_i^{(1)}$ будь-якого виду, в тому числі інформаційна, проникаючи ззовні в приміщення, є похідною такого конструктивного елемента, як стіна, і є зайвою або шкідливою для людини. Чим її більше, тим нижче якість стіни. Тому в першому наближенні коефіцієнт k_i опосередковано характеризує зміну ентропії системи «стіна-житло» ΔS_i як міру її неупорядкованості по відношенню до основної функції – захисту житла.

Те ж можна підкреслити і до інших енергетичних потоків, що впливають на стінові конструкції, в залежності від їх призначення.

Енергетичний обмін через стіну, як одна з її головних функцій, в даний час зазнає значних перетворень, пов'язаних з розширенням властивостей і можливостей цього унікального винаходу. Стіни сучасних споруд стають менш несучими, більш енергозахисними в плані функцій, максимально естетичними і мінімально матеріалосьмними. Їх функціональний спектр і матеріальне наповнення постійно розширюються. Вони, в свою чергу, вимагають поглибленого дослідження і систематизації.

Висновки

Подібні дослідження лише підтверджують, що стіну і як структурну споруду, і як об'єкт соціальних, військових, політичних та економічних амбіцій, необхідно розглядати з найрізноманітніших позицій величезного впливу на умови життя людини в усі періоди її існування і розвитку. Дивно, але невидима узагальнена стіна поряд з колесом та іншими епохальними винаходами пережила тисячоліття, зазнала нескінченних трансформацій заради епох і стилів, і до сих пір не втратила, а навпаки, розширила діапазон своєї необхідності для людини і вимагає свого більшого визнання. Такий підхід завжди дозволяв і надалі буде дозволяти не тільки розвивати конструктивні особливості цього винаходу, а й суттєво підвищити його функціональність для людини.

Перелік використаних джерел:

1. Breeze D.J. *Hadrian's Wall: A Study in Archaeological Exploration and Interpretation*. Oxford : Archaeopress Publishing Ltd, 2019. 174 p.
2. Adams A. *The Evolution of Urban Society: Early Mesopotamia and Prehispanic Mexico*. Chicago, 1966. 231 p. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781315131900>.
3. Yuval Noah Harari. *Sapiens: A Brief History of Humankind*. Dvir Publishing House Ltd, 2011. 570 p.
4. Rybczynski W. *Home: A Short History of An Idea*. London : Penguin, 1987. 272 p.

References:

1. D.J. Breeze, *Hadrian's Wall: A Study in Archaeological Exploration and Interpretation*. Oxford, UK: Archaeopress Publishing Ltd, 2019.
2. A. Adams, *The Evolution of Urban Society: Early Mesopotamia and Prehispanic Mexico*. Chicago, 1966. doi: 10.4324/9781315131900.
3. Yuval Noah Harari, *Sapiens: A Brief History of Humankind*. Dvir Publishing House Ltd, 2011.
4. W. Rybczynski, *Home: A Short History of An Idea*. London, UK: Penguin Publ., 1987.

Рецензент: В.В. Суглобов
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 10.07.2023
Стаття прийнята 28.08.2023

133 ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.875.56

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300052

© Суглобов В.В.¹, Лаврик В.П.², Шишкін В.В.³**СИЛОВИЙ РОЗРАХУНОК КЛІЩОВОГО ЗАХОПЛЮВАЧА
І НОВА КОНСТРУКЦІЯ КЕРНІВ КОЛОДЯЗНОГО КРАНУ**

В прокатних цехах металургійних підприємств, пов'язаних з переробкою сталевих злитків у заготівлі (слябінгах, блюмінгах), застосовуються колодязні крани з кліщовими захоплювачами. Такі крани працюють у відділеннях нагрівальних колодязів, де використовуються, насамперед, для посадки зливків у колодязі і видачі їх у прокатку після нагрівання. Крім того, крани можуть застосовуватись для здійснення допоміжних операцій з обслуговування колодязів і ремонту обладнання. При конструкторському опрацюванні кліщових захоплювачів таких кранів виникає необхідність у визначенні зусиль затискання зливка, які в даному захоплюючому пристрої пов'язані з вагою самого зливка і вагою кліщів крана. Крім того, велике значення мають конструктивні особливості самої зони затискання, тобто конструкція деталей, які передають затискні зусилля на зливочок. Ці деталі зветься кернами. Зрозуміло, що зусилля затискання і конструкція кернів повинні гарантувати надійне утримання та безпечне переміщення зливка. В процесі експлуатації крана керни зазнають широкого спектру навантажень: ударні, стискаючі, зминаючі навантаження від удару. При цьому, перебуваючи у контакті з розігрітим зливком, вони ж самі розігріваються до цієї ж температури. А через те, що їх періодично охолоджують у баках з водою, вони працюють ще й в умовах циклічних тепловмінь. Конструкція і фізичний стан кернів мають велике значення для надійності роботи кліщового захоплювача. Несвоєчасна заміна кернів може призвести до негативних наслідків під час утримання зливка, стати причиною його обриву з руйнуванням колодязя, пошкодженням підлогового обладнання і небезпекою для обслуговуючого персоналу. В роботі на основі виконаного силового розрахунку кліщового захоплювача і аналізу переваг і недоліків сучасних конструкцій кернів запропоновані кілька варіантів нових, більш ефективних конструкцій. Авторами була створена математична модель взаємодії керна і зливка для перевірки глибини проникнення керна в тіло зливка і порівняно її з показниками відомих кернів. Встановлено, що при температурах видачі зливків маємо глибину проникнення в тіло зливка для кернів нової конструкції в 4 рази менше, а ніж для звичайних конусних кернів. Використання цих конструкцій дозволить забезпечити надійність роботи захоплювача при одночасному покращенні якості заготовки за рахунок зменшення кількості тріщин і закатів, пов'язаних з пошкодженням граней зливка від глибокого вдавлювання кернів.

Ключові слова: колодязний кран, кліщовий захоплювач, затискні зусилля, керни кліщовин, форма кернів, надмірне вдавлювання, гарантоване захоплювання.

V.V. Suglobov, V.P. Lavryk, V.V. Shishkin. Force calculation and new design of the grip unit pliers metallurgical crane. In the rolling shops of metallurgical enterprises connected with the processing of steel ingots in the preparation (slabbing, blooming) well taps with pincer grabbers are used. Such cranes work in the sections of heating wells, where they

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

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, vplavrik@gmail.com

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

are used, first of all, for planting ingots in the well and issuing them for rolling after heating. In addition, cranes can be used to perform auxiliary operations for well maintenance and equipment repair. During the design processing of tong grippers of such cranes, there is a need to determine the ingot clamping forces, which in this gripping device are related to the weight of the ingot itself and the weight of the tongs of the crane. In addition, the design features of the clamping zone itself are of great importance, that is, the design of the parts that transfer the clamping forces to the ingot. These parts are called cores. It is clear that the clamping force and the design of the cores must guarantee reliable retention and safe movement of the ingot. During the operation of the crane, the cores are subjected to a wide range of loads: shock, compressive, crushing loads from impact. At the same time, being in contact with the heated ingot, they themselves heat up to the same temperature. And because they are periodically cooled in tanks with water, they work even in conditions of cyclic heat changes. The design and physical condition of the cores are of great importance for the reliability of the tick gripper. Untimely replacement of cores can lead to negative consequences during ingot retention, cause it to break off with the destruction of the circle, damage to floor equipment and danger to service personnel. Several options for new, more effective designs are proposed in the work based on the force calculation of the pincer gripper and the analysis of the advantages and disadvantages of modern core designs. The authors created a mathematical model of the interaction between the core and the ingot to check the depth of penetration of the core into the body of the ingot and compared it with the indicators of known cores. It was found that at the ingot release temperatures, the depth of penetration into the body of the ingot for cores of the new design is 4 times less than for conventional conical cores. The use of these designs will ensure the reliability of the gripping device while simultaneously improving the quality of the workpiece by reducing the number of cracks and dips associated with damage to the faces of the ingot from deep indentation of the cores.

Key words: well crane, tong grip, clamping forces, tong cores, core shape, excessive penetration, guaranteed grip.

Постановка проблеми. Одним з найбільш навантажених та відповідальних вузлів кліщових металургійних кранів є вантажозахоплювальні кліщі, тобто пристрій для захоплення та утримання зливка під час його підйому та транспортування. Надійність роботи кліщового захоплювача впливає на продуктивність крана, а разом з нею – на продуктивність технологічного процесу прокатки. Ще більш значущим є фактор безпеки та безаварійності експлуатації крана, оскільки вага злиwkів, що підіймаються і транспортуються, обчислюється десятками тон.

Надійна роботи кліщового захоплювача забезпечується, насамперед, спроможністю пристрою створювати необхідні затискні зусилля. Це головна умова. Крім того, вкрай важливим є конструктивне оформлення вузла затискання і застосовані при цьому матеріали. Якщо обмежитись розглядом конструкцій, а також аналізом впливів цих конструкцій на надійність утримання зливка і відсутність пошкоджень від утримання, можна зазначити наступне.

Важливими конструктивними елементами зони затиску кліщового захоплювача, які в значній мірі визначають надійність і якість утримання зливка, є керни – деталі, що в момент роботи пристрою безпосередньо контактують з гарячим зливком. Керни випробовують значні і повторювальні термо-механічні навантаження, які є причиною їх руйнації і зносу, що призводить до погіршення умов затиску і утримання зливка кліщами. Для відновлення якості роботи захоплювача керни мають замінюватись досить часто. Лише за одну робочу зміну операція заміни кернів для кожного працюючого крану може виконуватись до 6-7 разів. Одним з факторів, що впливає на знос і періодичність заміни кернів, є конструктивні особливості самих кернів. Від конструкції кернів також залежить стан поверхні зливка, що спрямовується на прокатку, а це є важливим з точки зору якості поверхні майбутньої заготовки.

З вищезазначеного виходить, що конструкція кернів має значення в питаннях надійності утримання зливка, інтенсивності зносу, періодичності заміни і ремонтпридатності кернів, якості заготовки після прокатки зливка. Тому дослідження, спрямовані на визначення ефективних конструкцій кернів вантажопідйомних захоплювачів, зокрема колодязних кранів, наразі є важливими і актуальними.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналізу конструкцій та силовим розрахункам промислових кранів і вантажозахоплювальних пристроїв присвячено багато класичних робіт, зокрема [1-4]. Більш детально питання вибору конструкцій вантажозахоплювальних пристроїв, їх проектування та силового аналізу розглянуто у роботах [5, 6]. У роботі [7] надано рекомендації щодо експертної оцінки технічного стану вантажозахоплювальних пристроїв, у тому числі кранів металургійного виробництва. Метод силового розрахунку затискних механізмів і вантажозахоплювальних пристроїв з використанням принципу можливих переміщень теоретичної механіки викладено в роботі [8]. Низка публікацій [9, 10] присвячена огляду та вибору конструкцій затискних та захоплювальних пристроїв. При цьому, в огляді конструкцій, крім книг і статейних публікацій, застосовано патентну літературу. Техніко-економічні показники використання кернів в кліщових захоплювачах колодязних кранів наведені в [11]. В [12] приводяться дані щодо впливу відбитків від вдавлювання кернів у зливок на якість отриманої прокаткою заготовки. Перспективні конструкції кернів кліщового захоплювача колодязного крана запропоновані в роботі [13].

Мета статті – виконати огляд існуючих конструкцій кернів колодязних кранів і проаналізувати їх переваги та недоліки. На підставі виконаного силового розрахунку кліщового захоплювача колодязного крана запропонувати нові, більш ефективні конструкції кернів і дати рекомендації щодо їх застосування.

Виклад основного матеріалу. В прокатних цехах металургійних підприємств, пов'язаних з переробкою сталевих зливків у заготівлі (слябінгах, блюмінгах), використовуються колодязні крани з кліщовими захоплювачами. Такі крани працюють у відділеннях нагрівальних колодязів, зазвичай, у кількості не менше трьох кранів на кожній стороні (при двосторонньому розташуванні колодязів). Вони застосовуються для технологічних операцій посадки зливків у колодязі (рис. 1) для подальшого їх нагрівання, видачі нагрітих зливків у прокат (рис. 2) та допоміжних операцій з обслуговування колодязів (заправка колодязів заправним матеріалом, обробка поду «лопатою») та обслуговування ремонтних робіт в зоні дії кранів.



Рис. 1 – Робота колодязного крану під час посадки зливків у колодязі



Рис. 2 – Робота колодязного крану під час видачі зливків до прокатки

Конструкція, робота і умови експлуатації кліщового захоплювача.

На рис. 3-4 представлені схеми побудови і принципу роботи кліщового захоплювача колодязного крана, що експлуатувався в цеху Слябінг-1150 Маріупольського МК ім. Ілліча.

Кранова підвіска складається з корпусу 1 (рис. 3), який підвішено вертикально з можливістю виконувати два рухи: поступальний рух вздовж осі підвісу (забезпечується механізмом головного підйому) і обертальний рух навколо осі підвісу (забезпечує механізм обертання кліщів). На осі підвісу розташовано шток 2, який може рухатись вертикально (завдяки механізму допоміжного підйому). Шток 2 має упорний елемент 3. В корпусі 1 виконані напрямні отвори 4, орієнтовані під гострим кутом α до осі підвісу. В отвори 4 встановлені упорні ролики 5 кліщовин 6. Кліщовини 6 змонтовані на спільній траверсі 7 і мають можливість повороту навколо горизонтальних пальців 8. Рухи корпусу 1 і траверси 7 в напрямі осі підвісу є незалежними і керуються окремими механізмами. При цьому, підйом траверси 7 при нерухомому корпусі 1 призводить до переміщення роликів 5 до верхньої частини отворів 4 і повороту кліщовин навколо пальців 8 в

бік розкриття зіву кліщів. І, навпаки, опускання траверси 7 при нерухомому корпусі 1 призводить до переміщення роликів 5 в нижню частину отворів 4 з відповідним поворотом кліщовин в інший бік і зменшенням зіву кліщів. У контактній зоні кліщового захоплювача встановлені керни 9, що забезпечують утримання зливка 10.

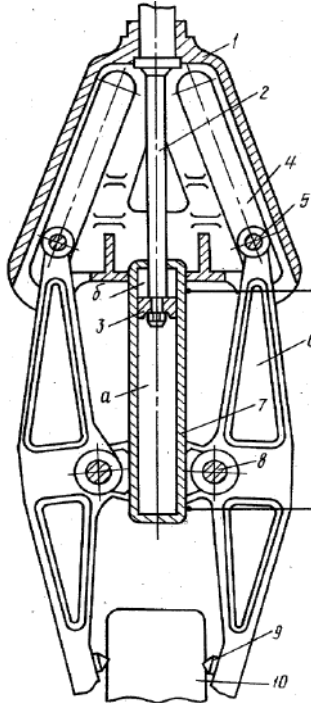


Рис. 3 – Схема кліщового захоплювача колодязного крану

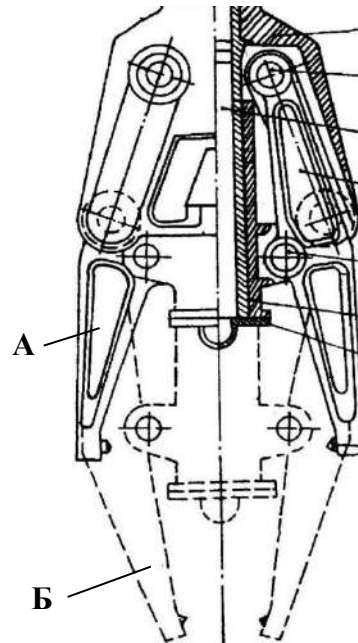


Рис. 4 – Зміна розкриття кліщів при переміщенні траверси механізмом допоміжного підйому

Кранова підвіска працює наступним чином (рис. 3-4). Переміщенням моста і візка крана кліщовий захоплювач розташовують над зливком. При цьому траверса 7 кліщового захоплювача знаходиться у піднятому положенні (рис. 4, Положення А), що відповідає максимально широкому зіву кліщів. За допомогою механізму головного підйому захоплювач опускають на рівень затискання головної частини зливка. Далі, механізмом допоміжного підйому траверсу 7 опускають (рис. 4, Положення Б), що супроводжується поворотом кліщовин 6 і зведенням нижньої частини кліщів, аж до моменту торкання кернами 9 поверхні зливка 10. Після цього, канат механізму допоміжного підйому ослаблюється, що призводить до затискання зливка кернами 9. Підйом захоплювача разом зі зливком забезпечується механізмом головного підйому. При цьому обидві маси стають нібито підвішеними на роликах 5, а похиле розташування напрямних отворів 4 в корпусі 1 захоплювача забезпечує необхідне для надійного утримання зливка 10 зусилля затиску.

Для визначення масштабу механічних та термічних навантажень, що діють на кліщі, наведемо конкретні дані. Вага слябових зливків з кип'ячої марки сталі, що відлиті у виливницю К-3 (без прибуткової частини), складає 18 т. Вага зливків зі спокійної або низьколегованої марок сталі, відлитих у виливницю ВС-24 (з прибутковою частиною), становить 24 т. При цьому температура зливка при видачі його в прокатку повинна бути не менше 1250-1280°C. Технологія передбачає багаторазове повторення даних термомеханічних навантажень у часі, що відповідає вимогам режиму роботи крана А7-А8.

Технологією також передбачено, що при видачі металу з колодязя злиток витягується краном з печі і поміщається в колицу зливковозу, який під час видачі повинен знаходитись поряд з краном і потім по рейкам рухатись у бік приймального рольгангу. Тобто транспортування зливка до приймального рольгангу має здійснюватися зливковозом. У цьому випадку час контакту захоплювального пристрою з гарячим зливком є мінімальним. Однак, на практиці, особливо при видачі металу з віддалених груп колодязів або прокатці кількох зливків одночасно (для економії

машинного часу), забезпечити своєчасність доставки зливків на приймальний рольганг силами тільки зливководу стає неможливим. В цьому випадку частина виданих зливків доставляється до приймального рольгангу самим краном, що набагато збільшує час контакту захоплюючого пристрою зі зливком і посилює знос кернів. Тому, після кількох видач зливків, з метою зменшення пластичних деформацій і зносу кернів, кліщі занурюють у ванну з водою.

Силовий аналіз кліщового захоплювача.

Як згадувалося раніше, головним фактором надійної роботи кліщового захоплювача колодязного крану є створення необхідних зусиль затиску зливка. Тому при конструкторському опрацюванні кранів обов'язково виникає потреба у визначенні цих зусиль, які в даному захоплюючому пристрої пов'язані з вагою самого зливка і вагою кліщів крана. Зрозуміло, що отримані зусилля затиску повинні гарантувати надійне утримання та безпечне переміщення зливка.

Силовий розрахунок пристрою з визначенням зусилля затискання \bar{T} зливка можна здійснити за принципом можливих переміщень аналітичної механіки [8].

Згідно до нього (рис. 5):

$$\bar{F} \cdot \bar{V}_A + \bar{G}_K \cdot \bar{V}_B + \bar{R} \cdot \bar{V}_C = 0, \tag{1}$$

де $\bar{R} = \bar{R}_N + \frac{\bar{G}}{2}$ – сила, з якою зливок діє на кліщовину;

$\bar{R}_N = -\bar{T}$ – нормальна реакція з боку зливка;

\bar{T} – сила затискання злитка.

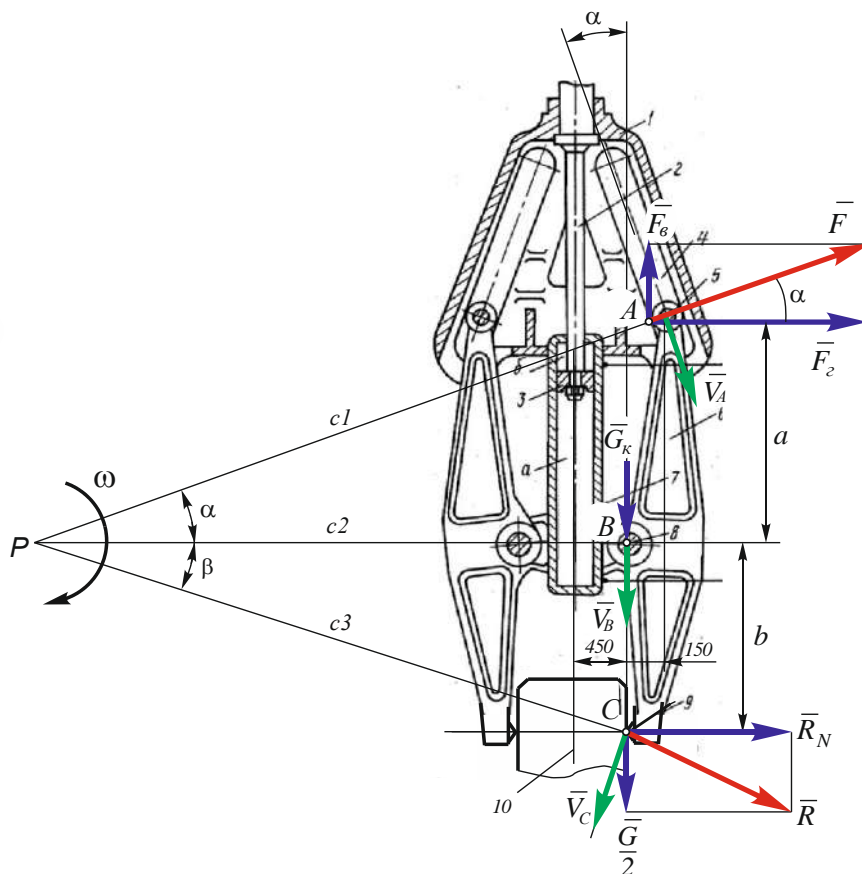


Рис. 5 – Схема кліщового захоплювача з силами, що діють на кліщовину

Перша з складових дорівнює нулеві, бо $\vec{F} \perp \vec{V}_A$. Потрібне зусилля затискання \vec{R}_N повинно відповідати умові $F_T > G$, де G – вага зливка; F_T – сила тертя між кернами захоплювача і поверхнею зливка ($F_T = R_N \cdot f$, де f – коефіцієнт тертя).

Якщо швидкості точок прикладання сил виразити через швидкість будь-якої точки (наприклад, через V_B), єдиною невідомою в рівнянні (1) становиться зусилля \vec{R}_N . Зв'язок між швидкостями зручно знаходити через миттєвий центр швидкостей P .

Розрахунки, виконані для вихідних даних: $G = 180 \text{ кН}$, $G_k = 10 \text{ кН}$, $\alpha = 13,5^\circ$, $a = 950 \text{ мм}$, $b = 650 \text{ мм}$, $f = 0,2$ і дають наступні результати.

Геометричні параметри:

$$x = \frac{a}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{950}{\operatorname{tg} 13,5^\circ} = 3957 \text{ мм}; d = 3957 - 450 - 150 = 3357 \text{ мм}; c_2 = 3357 + 450 = 3807 \text{ мм};$$

$$c_1 = \sqrt{3957^2 + 950^2} = 4069 \text{ мм}; c_3 = \sqrt{3807^2 + 650^2} = 3862 \text{ мм}; \beta = \operatorname{arctg} \frac{650}{3807} = 9,69^\circ.$$

Силкові співвідношення:

$$\operatorname{tg} 13,5^\circ = \frac{F_e}{F_c}; F_e = \frac{G}{2} + G_k = \frac{180}{2} + 10 = 100 \text{ кН}; F_c = \frac{100}{\operatorname{tg} 13,5^\circ} = 416 \text{ кН}.$$

Залежності між швидкостями:

$$V_A = V_B \cdot \frac{4069}{3807} = 1,069 \cdot V_B; V_C = V_B \cdot \frac{3862}{3807} = 1,014 \cdot V_B; V_B = V_A \cdot \frac{3807}{4069} = V_C \cdot \frac{3807}{3862};$$

$$V_C = V_A \cdot \frac{3862}{4069} = 0,949 \cdot V_A.$$

Після підстановки у рівняння:

$$(-100 \cdot \cos 13,5^\circ + 416 \cdot \sin 13,5^\circ) \cdot V_A + (100 \cdot \cos 9,69^\circ - R_N \cdot \sin 9,69^\circ) \cdot V_C = 0;$$

$$-0,1237 \cdot V_A + 0,949 \cdot 98,573 \cdot V_A - 0,949 \cdot 0,1683 \cdot V_A \cdot R_N = 0;$$

$$R_N = \frac{93,546 - 0,1237}{0,1597} = 585 \text{ кН};$$

$$T = R_N = 585 \text{ кН}.$$

При цьому, потрібне зусилля складає $T = \frac{G/2}{f} = \frac{90}{0,2} = 450 \text{ кН}$. Тобто захоплювач буде пра-

цювати з коефіцієнтом запасу $K_3 = \frac{585}{450} = 1,3$. Рекомендована величина K_3 складає $K_3 = 1,2$.

Тому умови надійної роботи захоплювача є забезпеченими.

Примітка. Розрахунок виконано, але обчислення здійснені за умови утримання зливка виключно силами тертя, що пов'язані із зусиллям затиску. Ця умова є правильною у разі роботи з холодними або «напівгарячими» зливками (наприклад, зливками з рідкою серцевиною і твердою поверхнею при гарячому посаді у колодязі), коли керни вантажозахоплювального засобу не вдавлюються в тіло зливка. Тобто пластична деформація зливка не відбувається, або мінімальна.

Під час видачі гарячого металу умови контакту кернів і зливка є іншими. Нагрітий під прокатку зливки є пластичним і не може при визначених зусиллях спричинити опір проникненню кернів в своє тіло. Часто це відбувається на повну глибину кернів. Іноді, особливо при перевищенні температури нагріву, значній вазі зливка та за високої пластичності і низької міцності сталі, керни залишають на тілі зливку не тільки заглиблення, а навіть вертикальні борозни. Але, так чи інакше, існування вдавлення і заглиблення кернів у зливки є додатковим фактором, що гарантує надійне утримання зливка при його захопленні кліщами. Інша справа, що ці поглиблення пошкоджують грані зливку і можуть привести до появи дефектів вже в заготовці. Ці дефекти часто утворюються під час прокатки (тріщини, закати). Тобто конструкція кернів повинна бути такою, щоб мінімізувати цей недолік.

Далі розглянемо види кернів, що застосовуються зараз у сучасному металургійному виробництві, основні причини виходу кернів з ладу, конструкції кернів, що пропонуються як більш ефективні, і математичне обґрунтування цього.

Про удосконалення конструкції і вибір кернів для кліщового захоплювача колодязевого крану.

Раніше стверджувалось, що конструкція і фізичний стан кернів мають велике значення для надійності роботи кліщового захоплювача і спроможності крана виконувати технічні завдання. Так, несвоєчасна заміна кернів може призвести до труднощів під час утримання зливку і стати причиною його обриву з руйнуванням колодязя, пошкодження підлогового обладнання і, найголовніше, небезпекою для обслуговуючого персоналу. В той же час, занадто часта заміна кернів збільшує простій крану, негативно впливає на динаміку видачі злиwkів і погіршує економічні показники собівартості виробництва [12]. Крім того, захоплювачі можуть залишати на зливку відбитки від кернів, глибина яких може досягати 30 мм, що при подальшій прокатці призводить до появи тріщин в металі, а згодом, до відбракування значних ділянок прокату [12]. Тому при виборі конструкції кернів кліщового захоплювача дуже важливо досягти максимального балансу властивостей цієї деталі, тобто добитися гарантованого утримання зливка захоплювачем при максимальній працездатності і терміні служби кернів, мінімальній травмованості і пошкодженнях зливка від вдавлювання кернів в його тіло.

Метою дослідження є розроблення удосконаленої конструкції керна колодязного крана, що дозволить підвищити надійність утримання зливка, збільшити термін служби керна і забезпечити мінімально можливу деформацію контактної зони зливка при його підйомі і транспортуванні.

Для досягнення цієї мети виконаємо наступні завдання:

- проаналізуємо причини виходу кернів з ладу;
- виконаємо огляд конструкцій кернів, що застосовувались або застосовуються зараз, з визначенням їх переваг і недоліків;
- зважаючи на умови експлуатації кліщового пристрою колодязного крана і недоліки сучасних конструкцій кернів, запропонувати нову удосконалену конструкцію керна;
- провести перевірку роботи запропонованої конструкції керна шляхом математичного моделювання.

Аналіз причин виходу кернів з ладу.

Керни – це деталі кліщових захоплювальних пристроїв колодязних кранів, які використовують для покращення умов затискання і гарантованого утримання зливка під час виконання краном робочих операцій, а саме: посадки сталевих злиwkів у колодязні нагрівальні печі, наступної їх виїмки після нагріву для установки на візок зливковозу або самостійного транспортування зливка до приймального рольгангу. Керни виробляються із сталі 45 і їх маса становить близько 1,5-3,0 кг. Вони закріплюються по одному в кожній з двох кліщовин. Утримання керна в кліщовині здійснюється за рахунок сил тертя по конічній поверхні хвостовика керна.

В процесі експлуатації крана керни зазнають широкого спектру навантажень: ударні, стискаючі, зминаючі. При цьому, динамічні і ударні механічні навантаження супроводжуються нагрівом кернів до високих температур. Так, перебуваючи у контакті з розігрітим до температури 800-1250°C зливком від 30 секунд до декількох хвилин і маючи незначну вагу, самі керни розігріваються до цієї ж температури. Наслідком цього є зменшення твердості їх поверхні. Тому, для підтримання механічних властивостей після періодичного нагрівання кернів, їх також періодично охолоджують у баках з водою, тобто вони працюють ще й в умовах циклічних тепломінів.

Слід зазначити, що тривалість роботи кернів вимірюється годинами, але ж їх замінюють досить часто (6-7 штук у зміну) [10]. Середньомісячна витрата кернів в процесі експлуатації колодязних кранів обтискного цеху становить близько 1200 штук [11].

Статистичними дослідженнями авторів встановлено, що основними причинами виходу кернів з ладу і подальшої їх заміни є:

- 1) спрацювання робочої частини керна за рахунок зминання, затуплення, зносу (рис. 6);
- 2) поява тріщин і відколів в робочій частині кернів (рис. 7).

Наявність або відсутність дефектних ознак виявляються при огляді крана. При виявленні означених вище дефектів, керни підлягають негайній заміні на нові або реставровані. Нормою для відбракування і заміни керна по ознаці «спрацювання робочої поверхні» є втрата керном

понад 25% свого початкового розміру. Роботи щодо заміни керн проводяться під час планових та позапланових зупинок крана.

Огляд конструкцій кернів з визначенням їх переваг і недоліків.

Літературним і патентним оглядом конструкцій встановлено існування кернів кількох типів.

Відома конструкція керна (рис. 8) з конусною робочою частиною і сферичною ділянкою на вершині конуса [10, 11]. Керни такої конструкції застосовуються в обтискних цехах сортопрокатного виробництва, де маса зливоків відносно мала і навантаження на керн незначні.

Недоліками цього керна є: низька зносостійкість робочої поверхні (сферичної ділянки на вершині конуса), необхідність частої заміни кернів через їх спрацювання (6-7 кернів протягом 8-мигодинної робочої зміни), велика глибина проникнення керна у зливков (до 30 мм) через концентрацію стискаючого зусилля з боку кліщів на малій площі поверхні зливка. Спостерігається негативний вплив на якість заготовки (після прокатки заглиблення від кернів трансформуються в поверхневі тріщини завглибшки 3-5 мм і довжиною до 0,5-1,5 м), ненадійність утримання зливку при спрацюванні вершини конуса або його відколі (при малій контактній площі тертя може призвести до обриву зливка), неможливість використання кернів такої конструкції для слябінгів, де маси зливоків і навантаження значно більші.

Відома інша конструкція керна (рис. 9), де для підвищення зносостійкості робочої частини керна застосована твердосплавна вставка. Керн пропонується відливати зі Сталі 45, вставку – зі сталі 3Х2В8. Зносостійка вставка встановлюється в керн у гарячому стані. Керн такої конструкції був виготовлений і пройшов випробування.

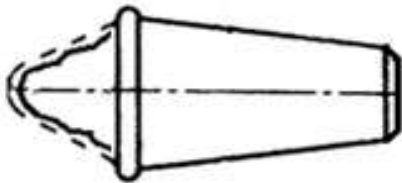


Рис. 6 – Спрацювання робочої частини керна



Рис. 7 – Відкол на робочій частині керна

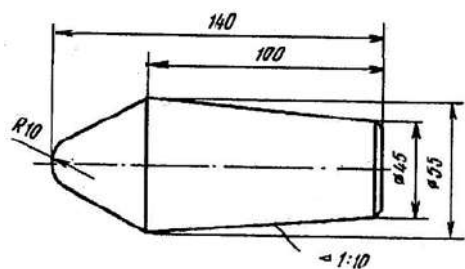


Рис. 8 – Керн з конусною робочою частиною і сферичним контактним кінцем

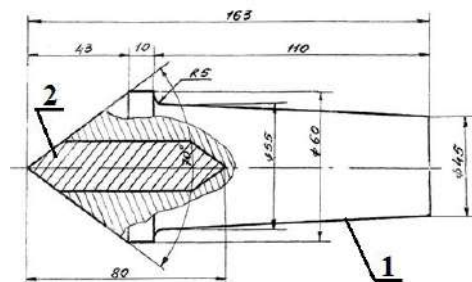


Рис. 9 – Схема керна, армованого високоміцною вставкою

Недоліками цього керна є: ускладнена конструкція, що призводить до значних витрат при виготовленні, велика глибина проникнення керна у зливки і тому – негативний вплив на якість заготовки, неможливість використання кернів такої конструкції для слябінгів, де маси зливок і навантаження значно більші.

Наступним аналогом є kern кліщового захоплювача колодезного крану, що використовується при виробництві слябів [11]. Робоча частина цього керну (рис. 10) виконана у формі двохилої піраміди, яка встановлюється в кліщовину пристрою в положенні, коли схили піраміди перетинаються по горизонтальній лінії як на рисунку. У порівнянні з попередніми конструкціями, цей kern може випробовувати значно більші навантаження і гарантовано утримувати більші зливки.

Недоліками цього керна є: велика глибина проникнення керна у зливку, що негативно впливає на якісні показники прокатоної заготовки. Крім того, зміна орієнтації зливка, що знаходиться в кліщах у затиснутому стані (наприклад, підйом зливка з підлоги кліщами, тобто перевід його з горизонтального положення у вертикальне) призводить до повороту зливка і змінання пірамідальної частини керн, що через деякий час робить ці керна подібними конусним з усіма їх недоліками.

Ще одним можливим технічним рішенням є конструкція керна (рис. 11) з робочою поверхнею у формі кільця [11, 12].

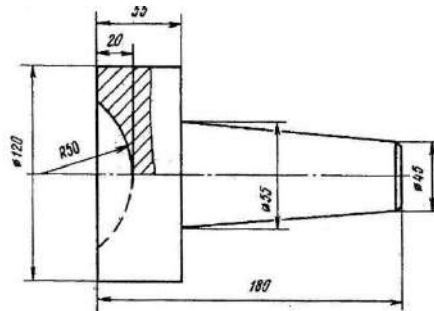
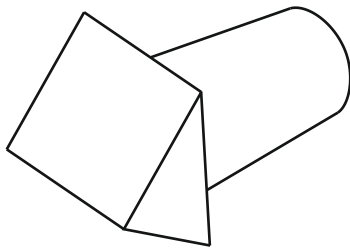


Рис. 10 – Kern з робочою частиною у формі двохилої піраміди

Рис. 11 – Kern з контактною поверхнею кільцевої форми

Цей kern утримує зливку практично тільки за рахунок сил тертя і має наступні недоліки: малу контактну площу тертя між керном і зливком, дуже незначне проникнення кільцевої поверхні керна у зливку (1-2 мм), нестабільність сил тертя в контактній зоні затискання через наявність відшарованої окалини, що не може осипатись в першу мить контакту з керном і залишається під кільцем, тобто між керном і поверхнею зливка. В цьому разі, для створення якісного утримування зливка зусилля затиску мають бути збільшеними.

Розробка нової конструкції керна.

Підвищення працездатності кернів можна досягти шляхом удосконалення їх конструкції.

Для більш надійного утримування зливка керни роблять з загостреною робочою частиною, з умовно точковим (рис. 8 і 9) або умовно лінійним (рис. 10) контактом. При цьому, надійність забезпечується заглибленням керна в тіло зливка, що при певній силі стискання створює гарантію безпечного пересування і неможливість обриву вантажу. Крім того, при такій конструкції керна окалина на поверхні зливка вільно відшаровується і при дотику керна обсипається на підлогу печі, тобто не заважає створенню надійного контакту з кліщами захоплювача.

У той же час, надмірне заглиблення в тіло зливка вважається недоліком кернів. За результатами кількох досліджень проникнення кернів у зливку досягає 15-20 мм, іноді 50-80 мм. В цьому разі на тілі зливка від контакту з кернами створюються глибокі відбитки. При прокатці такого зливка на поверхні заготовки можуть з'являтися тріщини завглибшки 3-5 мм і довжиною до 0,5-1,5 м [12]. Для усунення цього дефекту доводиться збільшувати обрізь заготовки або застосовувати трудомісткі операції з видалення поверхневих дефектів. В обох випадках маємо підвищення собівартості виробу.

На підставі наведених вище тез була виконана спроба збалансувати переваги і недоліки відомих конструкцій кернів і розробити більш ефективну нову конструкцію. Пропонована конструкція повинна надійно утримувати зливку, мати збільшений відносно відомих конструкцій термін служби керна і забезпечувати оптимальний (не досить великий) рівень заглиблення в тіло гарячого зливка.

Для вирішення поставленої задачі у керні вантажозахоплювального кліщового пристрою (рис. 12), що містить хвостовик 1 і головку 2, відповідно до корисної моделі, на робочій поверхні головки виконані зубці 3 з похилими боковими поверхнями і плоскою вершиною, що розташовані рядами. При цьому головка має форму диска. Крім того, керн може бути виконано цілісним (рис. 12, а, б) або складовим (рис. 12, в), тобто містити змінну зносостійку вставку 4, на якій розташовані зубці.

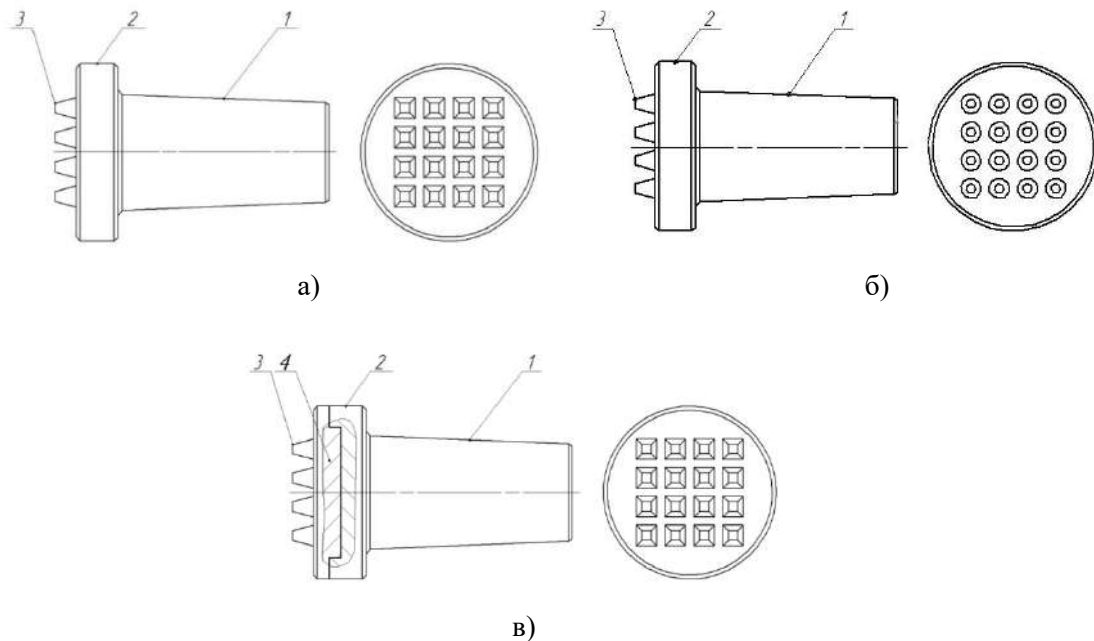


Рис. 12 – Конструкції кернів, що пропонуються: а) цілісні керни з пірамідальними зубцями; б) цілісні керни з конічними зубцями; в) складові керни з зубчастою зносостійкою вставкою

Наявність на робочій поверхні керна кількох зубців, виконаних, наприклад, у формі пірамід, квадрата, усіченого конуса, з циліндричною, конусною поверхнею, з невеликими плоскими поверхнями контакту зі зливком, забезпечує зменшення зносу вершин зубців через розподіл зусилля притиснення на декілька контактних поверхонь, що зменшує контактні напруги. При цьому очікується оптимальна глибина проникнення вершин зубців у зливку (4-6 мм) за рахунок того, що сумарна контактна поверхня всіх зубців більша, ніж у звичайного конусного керна, і менша, ніж у кільцевого керна. Крім того, збільшується надійність утримання зливку при сколі або спрацюванні одного або декількох зубців. Також виключається вплив окалини на сили тертя і зусилля утримання зливку, тому що при контакті керна з кількома зубцями відбувається сколювання і падіння окалини та утримання зливку забезпечується за рахунок спільної дії факторів, а саме: проникнення вершин зубців у зливку і сил тертя. Застосування складеного керна дозволяє знизити витрату високоцінного металу і спростити операцію заміни та ремонту керна.

Висота зубців і ступінь притушення їх вершин (площі плоскої поверхні) можуть варіюватися при виготовленні кернів для досягнення оптимального проникнення зубців у виливницю в залежності від її пластичних властивостей.

Таким чином застосування запропонованої конструкції керну дозволить забезпечити досягнення наступних корисних ефектів:

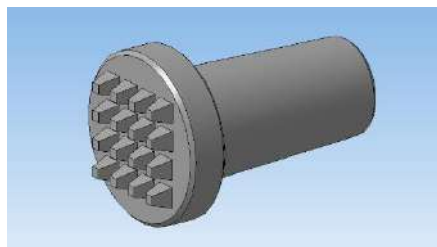
- зменшення зносу вершин зубців через розподіл зусилля затиску на декілька контактних поверхонь, що зменшує контактні напруги;
- забезпечення оптимальної глибини проникнення вершин зубців у виливницю (4-6 мм) за рахунок того, що сумарна контактна поверхня всіх зубців більша, ніж у звичайного конусного керна і менша, ніж у кільцевого керна;
- досягнення надійності утримання зливку при сколі або спрацюванні одного або декількох зубців;
- виключення впливу окалини на сили тертя і зусилля утримання зливку, тому що при накладенні керна відбувається сколювання окалини;
- забезпечення надійного утримання зливку за рахунок сил тертя і проникнення вершин зубців в тіло зливку;
- зниження витрат високоміцного металу за рахунок застосування складеної конструкції;
- спрощення процесу заміни та ремонту керна.

Запропонована конструкція керна захищена патентом України на корисну модель [13].

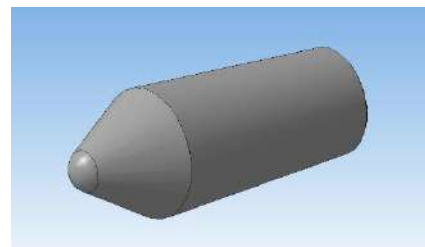
Перевірка роботи запропонованої конструкції шляхом математичного моделювання.

Однією з переваг розробленої конструкції керна є мале пошкодження зливку кернами за рахунок зменшення глибини вдавлення.

Для перевірки глибини проникнення керна в тіло зливку і порівняння її з показником відомих кернів було створено математичну модель взаємодії керна і зливка. На рис. 13 представлені 3D моделі кернів нової і відомої (базової) конструкцій.



а)



б)

Рис. 13 – 3D моделі кернів нової (а) і базової (б) конструкцій

Розрахунок проводився за допомогою сучасної САПР системи CAD System – Computer Aided Design System, пакету SolidWorks®, програми COSMOSWorks. Остання програма може виконувати розрахунки з міцності і жорсткості деталей і конструкцій, які реалізуються за допомогою метода кінцевих елементів (МКЕ). COSMOSWorks дозволяє отримати параметри НДС і переміщення, що відбувається в контакті між керном і зливком.

Результати обчислень за створеними математичними моделями взаємодії зливка з кернами базової і нової конструкції представлені на рис. 14.

Розрахунки свідчать, що при температурах видачі зливків (1250-1300°C) маємо глибину проникнення в тіло зливка для кернів нової конструкції в 4 рази менше, ніж для звичайних конусних кернів.

Тобто можна зробити висновок про теоретичне підтвердження одного з поставлених завдань при розробці нових керн, а саме – отримання меншої деформації і, відповідно, меншого пошкодження зливку від вдавлення кернів.

Таким чином, застосування кернів нової конструкції дозволить збільшити надійність утримання зливку, підвищити безпеку роботи крана, зменшити спрацювання кернів, збільшити термін їх служби, зменшити пошкодження зливку кернами, тобто підвищити якість прокатої заготовки.

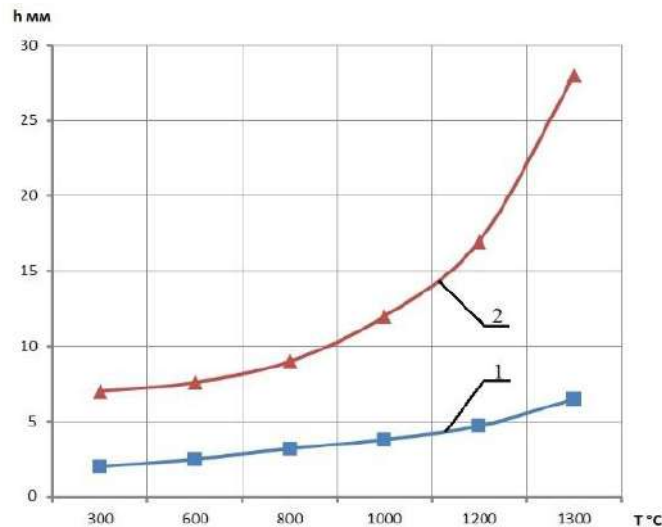


Рис. 14 – Залежність глибини вдавлювання кернів нової (1) і базової (2) конструкцій при заданих температурах зливка

Висновки

1. Надано приклад розрахунку щодо визначення зусиль затискання зливку кліщовим захоплювачем колодязного крана. Обчислення виконані за принципом можливих переміщень аналітичної механіки.

2. Проаналізовано умови роботи кернів кліщових захоплювачів колодязних кранів, визначені основні фактори і причини виходу кернів з ладу, виявлений вплив конструкції кернів на якість отриманої катаної заготовки.

3. На базі аналізу існуючих конструкцій кернів запропонована нова конструкція керна, що захищена патентом України. Нова конструкція дозволяє збільшити надійність утримання зливку, зменшити спрацювання кернів, збільшити термін їх служби, зменшити пошкодження зливку кернами, тобто підвищити якість прокатої заготовки.

4. Переваги кернів нової конструкції в сенсі зменшення вдавлювання керна у зливку підтверджені теоретичним аналізом математичної моделі.

Перелік використаних джерел:

1. Мартовицький Л.М., Глушко В.І. Крани спеціальні: навчальний посібник. Запоріжжя : Національний університет «Запорізька політехніка», 2023. 396 с.
2. Технічне обслуговування металургійного обладнання: навчальний посібник / Жук А.Я., Малишев Г.П., Жедабіна Н.К., Таратута К.В. Київ : Видавничий дім «Когдар», 2017. 288 с.
3. Гребеник В.М., Іванченко Ф.К., Ширяев В.І. Розрахунок металургічних машин и механізмів. Київ : Вища школа, Головне вид-во, 1988. 448 с.
4. Моделювання навантаженості та аналіз напружено-деформованого стану елементів траверси ливарного крана / Сагіров Ю.Г., Суглобов В.В., Кухар В.В., Резніков О.О. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*. 2019. Вип. 83. С. 5-10. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2019.84.0.5>.
5. Іванченко Ф.К. Підйомно-транспортні машини. Київ : Вища школа, 2008. 413 с.
6. Сагіров Ю.Г., Суглобов В.В. Застосування топологічної оптимізації на прикладі елементів підвіски ливарного крану. *Наука та виробництво*. 2019. Вип. 21. С. 95-106. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990212019187276>.
7. Белогуров В.Д., Суглобов В.В., Сагіров Ю.Г. Оценка технического состояния грузоподъемных кранов. *Подъемно-транспортная техника*. 2003. № 2. С. 38-43.
8. Шишкін В.В., Карпенко Т.М., Глова А.О. Визначення зусиль затискання в кліщах колодязного крана методами аналітичної механіки. *Університетська наука – 2023 : тези доповідей Міжнар. науково-техн. конф., м. Дніпро, 25-26 травня 2023 р. Дніпро : ДВНЗ «ПДТУ», 2023. Том 1. С. 95-98.*

9. Лаврик В.П., Суглобов В.В., Жижкін С.В. Аналіз причин виходу з ладу кернів колодязного крану. *Університетська наука – 2020* : тези доповідей Міжнар. науково-техн. конф., м. Маріуполь, 19-20 травня 2020 р. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2020. Том 2. С. 100-102.
10. Лаврик В.П., Суглобов В.В., Жижкін С.В. Розробка оптимальних методів відновлення і зміцнення кернів колодязного крану. *Університетська наука – 2020* : тези доповідей Міжнар. науково-техн. конф., м. Маріуполь, 19-20 травня 2020 р. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2020. Том 2. С. 102-103.
11. Слободян Н.М., Пономарчук І.А. Вантажопідйомні машини: навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2020. 87 с.
12. Похилько Л.К., Коваль І.Ю. До вибору раціональної форми кернів кліщових захоплювачів. *Теорія і практика металургії*. 2010. № 1-2. С. 10-14.
13. Керн вантажозахоплювального кліщового пристрою: пат. на кор. мод. 79961 Україна: МПК В66С 1/00, В66С 1/22. № 201212357; заявл. 29.10.2012; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. 5 с.

References:

1. L.M. Martovytskyi, and V.I. Hlushko, *Krany spetsialni: navchalnyi posibnyk* [Special cranes: tutorial]. Zaporizhia, Ukraine: Zaporizhzhia Polytechnic National University Publ., 2023. (Ukr.)
2. A.Ia. Zhuk, H.P. Malyshev, N.K. Zhediabina, and K.V. Taratuta, *Tekhnichne obsluhovuvannia metalurhiinoho obladnannia: navchalnyi posibnyk* [Maintenance of metallurgical equipment: tutorial]. Kyiv, Ukraine: Kogdar Publishing House, 2017. (Ukr.)
3. V.M. Hrebenyk, F.K. Ivanchenko, and V.I. Shyriaev, *Rozrakhunok metalurhichnykh mashyn y mekhanizmiv* [Calculation of metallurgical machines and mechanisms]. Kyiv, Ukraine: Vyshcha shkola, Main publishing house, 1988. (Ukr.)
4. Yu.H. Sahirov, V.V. Suglobov, V.V. Kukhar, and O.O. Reznikov, «Modeliuvannia navantazhenosti ta analiz napruzhenno-deformovanoho stanu elementiv traversy lyvarnoho kрана» [«Load simulation and analysis of the stress-strain state of the elements of a casting crane travers»], *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету – Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, vol. 83, pp. 5-10, 2019. doi: 10.30977/BUL.2219-5548.2019.84.0.5. (Ukr.)
5. F.K. Ivanchenko, *Pidomno-transportni mashyny* [Lifting and transport machines]. Kyiv, Ukraine: Vyshcha shkola Publ., 2008. (Ukr.)
6. Yu.H. Sahirov, and V.V. Suglobov, «Zastosuvannia topologichnoi optymizatsii na prykladi elementiv pidvisky lyvarnoho kрана» [«Application of topological optimization on the example of elements of casting crane traverse»], *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, vol. 21, pp. 95-106, 2019. doi: 10.31498/2522-9990212019187276. (Ukr.)
7. V.D. Belohurov, V.V. Suglobov, and Yu.H. Sahirov, «Otsenka tekhnicheskogo sostoiannya hruzopodemnykh kрана» [«Assessment of the technical condition of lifting cranes»], *Pod'emno-transportnaia tekhnika – Hoisting and conveying equipment*, № 2, pp. 38-43, 2003. (Rus.)
8. V.V. Shyshkin, T.M. Karpenko, and A.O. Hlova, «Vyznachennia zysyl zatyskannia v klishchakh kolodiazevoho kрана metodamy analitychnoi mekhaniky» [«Determining the clamping forces in the tongs of a well tap by the methods of analytical mechanics»], in Proc. Int. Sci.-Techn. Conf. University science – 2023, Dnipro, 2023, vol. 1, pp. 95-98. (Ukr.)
9. V.P. Lavryk, V.V. Suhlobov, and S.V. Zhyzhkin, «Analiz prychnyn vykhodu z ladu kerniv kolodiaznoho kрана» [«Analysis of the causes of the failure of well crane cores»], in Proc. Int. Sci.-Techn. Conf. University science – 2020, Mariupol, 2020, vol. 2, pp. 100-102. (Ukr.)
10. V.P. Lavryk, V.V. Suhlobov, and S.V. Zhyzhkin, «Rozrobka optymalykh metodiv vidnovlennia i zmitsnennia kerniv kolodiaznoho kрана» [«Development of optimal methods of restoration and strengthening of well crane cores»], in Proc. Int. Sci.-Techn. Conf. University science – 2020, Mariupol, 2020, vol. 2, pp. 102-103. (Ukr.)
11. N.M. Slobodian, and I.A. Ponomarchuk, *Vantazhopidiomni mashyny: navchalnyi posibnyk* [Lifting machines: tutorial]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2020. (Ukr.)
12. L.K. Pokhylko, and Y.Iu. Koval, «Do vyboru ratsionalnoi formy kerniv klishchovykh zakhopliuvachiv» [«To the choice of a rational shape of the cores of tick grabbers»], *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, № 1-2, pp. 10-14, 2010. (Ukr.)

13. V.V. Suglobov, V.A. Mikhieev, V.P. Lavryk, and O.O. Vedmedenko, «Kern vanta-zhozakhopliuvalnoho klishchovoho prystroiu» [«The core of the load-grabbing pincer device»], *UA Patent 79961*, May 13, 2013.

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

Стаття надійшла 03.06.2023
Стаття прийнята 20.07.2023

УДК 621.91

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300053

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

ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ СКЛАДОВИХ РЕАКЦІЙ В ПІДШИПНИКАХ ДИСКОВОГО ВАЛУ РОТОРНИХ ПИЛ (ПОВІДОМЛЕННЯ 1)

Для сучасного прокатного виробництва актуальним є питання міцності та надійності конструкцій роторних пил, які призначені для різання металопрокату. Метою даної роботи є визначення уточнених значень сил реакцій опорних підшипників дискового валу. Як відомо, при тривалій експлуатації об'єкту місце для посадки ріжучого диску на планшайбі 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. 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. Спроеціювавши векторні формули принципу та теорем на осі координат, отримані системи алгебраїчних рівнянь, з яких визначаються горизонтальні та вертикальні складові сил реакцій в підшипниках як при холостому режимі, так і при різанні. Через те, що вектор відцентрової Даламберової сили інерції диску змінює свій напрям, отримані формули сил реакцій при різних положеннях центру ваги диску. За результатами чисельного аналізу задачі, який планується, можна побудувати графіки залежностей горизонтальних та вертикальних складових сил тиску на підшипники від: величини ексцентриситету, вертикальної та горизонтальної складових сил різання, кутової швидкості та положення диску.

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 1). A distinctive feature of rotary saws is the process of cutting the workpiece, which takes a very short time. For example, a workpiece with a diameter of 200 mm is cut in 0.2 seconds, while traditional designs of sliding and pendulum saws perform this operation in 10-20 seconds or more. This effect is achieved due to the high speeds of feeding the disc to the cut,

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

exceeding traditional modes by 20 or more times. However, due to the specific cutting conditions, weak links were identified in these designs that require further improvement. One of the factors that reduces the reliability of the saw is the insufficient durability of the bearings of the high-speed disk shaft, which perceives the cutting force. Until now, the reliability issues of rotary saw structures remained unresolved. One of the factors that reduces the reliability of the saw is the insufficient durability of the bearings of the high-speed disk shaft, 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 of all, as it turned out, during operation, the saw blade has radial runout, possibly due to an error when cutting the teeth of the blade and the eccentric landing of the blade on the seat when replacing it. For modern rolling mill production, the issue of strength and reliability of rotary saw designs, which are intended for cutting rolled metal, is relevant. The purpose of this work is to determine the precise values of the reaction forces of the support bearings of the disc shaft. 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 disk. The presence of this eccentricity is taken into account in the work when determining the required forces using D'Alembert's principle of conditional balancing of forces. 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 impact dynamics theorems: the momentum theorem and the kinetic momentum change theorem. By projecting the vector formulas of the principle and theorems on the coordinate axis, the systems of algebraic equations are obtained, from which the horizontal and vertical components of the reaction forces in the bearings are determined both in idle mode and during cutting. Due to the fact that the vector of the centrifugal D'Alembert force of inertia of the disk changes its direction, the formulas of the reaction forces at different positions of the center of gravity of the disk were obtained. According to the results of the planned numerical analysis of the problem, graphs of the dependences of the horizontal and vertical components of the pressure forces on the bearings can be drawn from: the eccentricity value, the vertical and horizontal components of the cutting forces, the angular velocity and the position of the disk.

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

Постановка проблеми. До теперішнього часу залишалися невирішеними питання надійності конструкцій роторних пил. Одним з факторів, який знижує надійність пили, є недостатня довговічність підшипників високошвидкісного дискового валу, що сприймає зусилля різання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно розрахунок міцності підшипників дискового валу роторних пилок проводиться методами статyki, враховуючи вагу шківів ремінної передачі, маховика планшайб з ріжучим диском і зусилля різання [1-4]. Також зусилля різання дисковими пилами, зазвичай, визначались за допомогою питомої роботи різання [1, 3-4]. Однак, в області режимів різання роторними пилами, тобто при товщині зрізу 0,05...2 мм, застосування цієї методики потребує проведення комплексу дослідницьких робіт з метою розширення сфери її застосування [5, 7-8].

Мета дослідження – визначення реакцій підшипникових вузлів з врахуванням ексцентриситету ріжучого диска:

- при холостому ході;
- при відомій силі різання.

Виклад основного матеріалу. Практика показує, що застосовані методи розрахунку на міцність опорних підшипників не дозволяють враховувати всі можливі фактори, які впливають на надійність підшипників в процесі різання. Перш за все, як виявилось, під час роботи пильний диск має радіальне биття, можливо, через похибку при нарізанні зубів диска та ексцентричною посадкою диска на посадкове місце при його заміні. Це може бути пов'язано з виробкою посадкового місця під диск на планшайбі, на якому він встановлюється, або можливою похибкою при проточці внутрішнього отвору для посадки диску. В зв'язку з наявністю такого радіального биття

необхідно врахувати його вплив на міцність підшипників. Крім того, має місце коротка тривалість самого процесу різання. Як відомо, особливістю роторних пил є процес різання заготовки, який займає дуже короткий час. Наприклад, заготовка діаметром 200 мм розрізається за 0,2 секунди, в той час як традиційні конструкції салазкових та маятникових пил виконують цю операцію за 10-20 та більше секунд. Цей ефект досягається за рахунок високих швидкостей подачі диска на різ, які перевищують традиційні режими в 20 та більше разів.

На рис. 1 зображена схема активних сил, які діють на об'єкт, і складові реакції підшипників А та В при холостому ході. Вихідними даними для визначення реакцій підшипникових вузлів з врахуванням ексцентриситету ріжучого диска є наступні величини:

\vec{G}_1 – вага ріжучого диска, \vec{G}_2 – вага планшайби, \vec{G}_3 – вага шківів, \vec{G}_4 – вага маховика;

L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 – розміри ділянок валу, D – діаметр ріжучого диска;

$OC_1 = e$ – величина ексцентриситету центру ваги диска;

$I_{C1z} = \frac{GD^2}{4 \cdot g}$ – момент інерції диска відносно центральної осі;

\vec{F}_x^P, \vec{F}_y^P – складові сили різання; τ – час різання.

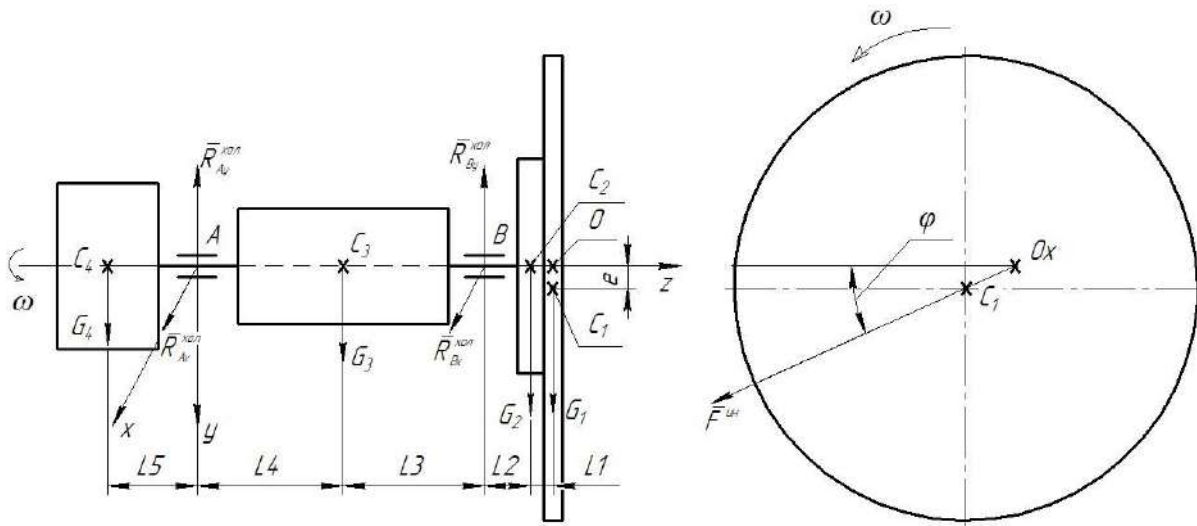


Рис. 1 – Розрахункова схема сил при холостому ході

Для визначення реакцій в опорах застосуємо принцип Д'Аламбера [6]: «В довільний момент часу система сил, що діють на вільний об'єкт і Д'Аламберові сили інерції утворюють зрівноважену систему сил». Головний вектор сил інерції диску спрямований по вектору OC_1 , який обертається з кутовою швидкістю валу ω , і дорівнює:

$$\vec{F}^{in} = \frac{G_1}{g} \cdot \omega^2 \cdot e. \quad (1)$$

Тому, якщо кут повороту валу, який рівномірно обертається, дорівнює $\varphi = \omega \cdot t$, маємо складові головного вектору сил інерції: $F_x^{in} = F^{in} \cdot \cos \varphi, F_y^{in} = F^{in} \cdot \sin \varphi$.

1. *Визначення опорних реакцій підшипників у випадку холостого ходу.*

Для визначення опорних реакцій при холостому ході сили реакцій в підшипниках А і В розкладаємо на складові:

$$\vec{R}_A^{хол} = \vec{R}_{Ax}^{хол} + \vec{R}_{Ay}^{хол}, \vec{R}_B^{хол} = \vec{R}_{Bx}^{хол} + \vec{R}_{By}^{хол}. \quad (2)$$

Вибираємо систему координат Ахуз. Відлік кута повороту починаємо з горизонтального положення вектору OC_1 , тобто коли $\varphi = 0$. З додатного напрямку осі Az бачимо обертання валу проти ходу годинникової стрілки.

Згідно принципу Д'Аламбера, маємо:

$$\begin{cases} R_{Ax}^{xол} + R_{Bx}^{xол} + F^{ін} \cdot \cos \varphi = 0 \\ -R_{Ay}^{xол} - R_{By}^{xол} + G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + F^{ін} \cdot \sin \varphi = 0 \\ G_4 \cdot AC_4 - G_3 \cdot AC_3 - G_2 \cdot AC_2 - (G_1 + F^{ін} \cdot \sin \varphi) \cdot AO + R_{By}^{xол} \cdot AB = 0 \\ R_{Bx}^{xол} \cdot AB + F^{ін} \cdot \cos \varphi \cdot AO = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (3), отримаємо:

$$\begin{aligned} R_{Bx}^{xол} &= -F^{ін} \cdot \cos \varphi \cdot \frac{AO}{AB} \\ R_{Ax}^{xол} &= F^{ін} \cdot \cos \varphi \cdot \frac{BO}{AB} \\ R_{By}^{xол} &= \frac{1}{AB} [G_2 \cdot AC_2 + G_3 \cdot AC_3 - G_4 \cdot AC_4 + (G_1 + F^{ін} \cdot \sin \varphi) \cdot AC_1] \\ R_{Ay}^{xол} &= G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + F^{ін} \cdot \sin \varphi - \frac{1}{AB} [G_2 \cdot AC_2 + G_3 \cdot AC_3 - G_4 \cdot AC_4 + (G_1 + F^{ін} \cdot \sin \varphi) \cdot AC_1] \end{aligned}$$

Для конкретних положень центру ваги ріжучого диска, можна отримати складові реакцій підшипників в цих положеннях. Маємо значення сил $R_{Ax}^x, R_{Ay}^x, R_{Bx}^x, R_{By}^x$ для вертикальних и горизонтальних положень вектора OC_1 при холостому ході диску:

- при $\varphi = \frac{\pi}{2}$: $R_{By}^{xол} = \frac{1}{AB} [G_2 \cdot AC_2 + G_3 \cdot AC_3 - G_4 \cdot AC_4 + (G_1 + F^{ін}) \cdot AC_1]$

$$R_{Ay}^{xол} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 + F^{ін} - \frac{1}{AB} [G_2 \cdot AC_2 + G_3 \cdot AC_3 + (G_1 + F^{ін}) \cdot AC_1 - G_4 \cdot AC_4]$$

- при $\varphi = \frac{3\pi}{2}$: $R_{By}^{xол} = \frac{1}{AB} [G_2 \cdot AC_2 + G_3 \cdot AC_3 - G_4 \cdot AC_4 + (G_1 - F^{ін}) \cdot AC_1]$

$$R_{Ay}^{xол} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 - F^{ін} - \frac{1}{AB} [G_2 \cdot AC_2 + G_3 \cdot AC_3 + (G_1 - F^{ін}) \cdot AC_1 - G_4 \cdot AC_4]$$

$$R_{Ax}^{xол} = 0; R_{Bx}^{xол} = 0$$

- при $\varphi = 0^\circ; \varphi = \pi$:

$$R_{By}^{xол} = \frac{1}{AB} [G_1 \cdot AC_1 + G_2 \cdot AC_2 + G_3 \cdot AC_3 - G_4 \cdot AC_4]$$

$$R_{Ay}^{xол} = G_1 + G_2 + G_3 + G_4 - \frac{1}{AB} [G_1 \cdot AC_1 + G_2 \cdot AC_2 + G_3 \cdot AC_3 - G_4 \cdot AC_4]$$

- при $\varphi = 0^\circ$: $R_{Ax}^{xол} = F^{ін} \cdot \frac{OB}{AB}; R_{Bx}^{xол} = -F^{ін} \cdot \frac{AO}{AB}$

- при $\varphi = \pi$: $R_{Ax}^{xол} = -F^{ін} \cdot \frac{OB}{AB}; R_{Bx}^{xол} = F^{ін} \cdot \frac{AO}{AB}$

2. *Визначення опорних реакцій підшипників, які виникають під дією тільки сил різання.*

Щоб визначити складові опорних реакцій, які виникають під дією тільки сил різання (нормальної \vec{F}_y^p та дотичної \vec{F}_x^p), на рис. 2 зобразимо складові сили різання та складові опорних реакцій $\vec{R}_{Ax}^p, \vec{R}_{Ay}^p, \vec{R}_{Bx}^p, \vec{R}_{By}^p$, які при цьому виникають.

Короткочасний процес різання диском будемо розглядати як удар при відомих імпульсах:

$$\vec{S}_{y\partial x} = \vec{F}_x^p \cdot \tau; \vec{S}_{y\partial y} = \vec{F}_y^p \cdot \tau.$$

Оскільки мірою взаємодії тіл при ударі є імпульси, застосуємо наступні теореми динаміки [6].

Теорема імпульсів: Зміна кількості руху об'єкта за час удару дорівнює сумі ударних імпульсів, прикладених до об'єкту

$$\vec{Q}_{\text{після удару}} - \vec{Q}_{\text{до удару}} = \Sigma \vec{S}_{\text{уд.}} \quad (4)$$

Теорема про зміну моменту кількості руху при ударі: Зміна кінетичного моменту відносно центру А за час удару дорівнює сумі моментів ударних імпульсів, прикладених до об'єкту, відносно центру А

$$\vec{K}_{\text{після уд.т.А}} - \vec{K}_{\text{до уд.т.А}} = \Sigma_{\text{мом.т.А}} (\vec{S}_{\text{уд.}}) \quad (5)$$

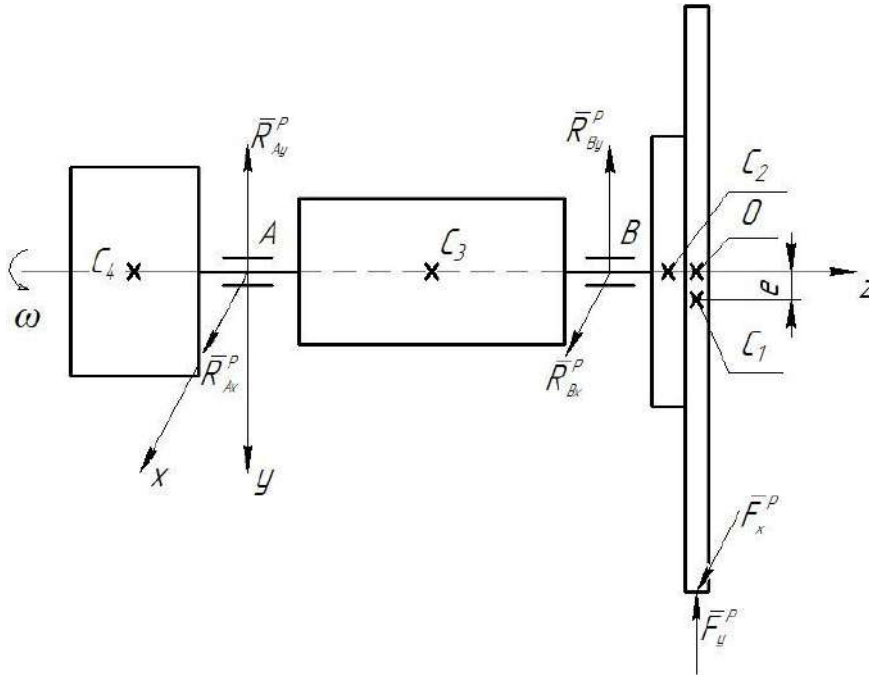


Рис. 2 – Розрахункова схема сил при різанні

Проекції формул (4) і (5) на осі координат Ахуz мають вигляд:

$$\begin{cases} \frac{G_1}{g} \cdot e \cdot (\omega_k - \omega_n) = \tau \cdot (R_{Ax}^P + R_{Bx}^P + F_x^P) \\ 0 = \tau \cdot (R_{Ay}^P + R_{By}^P + F_y^P) \\ 0 = \tau \cdot (R_{By}^P \cdot AB + F_y^P \cdot AO) \\ 0 = \tau \cdot (R_{Bx}^P \cdot AB + F_x^P \cdot AO) \\ I_{Oz} \cdot (\omega_k - \omega_n) = -F_x^P \cdot \tau \cdot \left(\frac{D_1}{2} + e\right), \end{cases} \quad (6)$$

де: ω_k – кінцева кутова швидкість (в кінці удару);

ω_n – початкова кутова швидкість;

$$I_{Oz} = I_{C1Z} + \frac{G_1}{g} \cdot e^2. \quad (7)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (6), отримаємо:

$$\begin{aligned} (\omega_k - \omega_n) &= \frac{-F_x^P \cdot \tau \cdot \left(\frac{D_1}{2} + e\right)}{I_{Oz}}, \\ R_{Bx}^P &= -F_x^P \cdot \frac{AO}{AB}, \\ R_{Ax}^P &= F_x^P \cdot \frac{BO}{AB} - \frac{G_1 \cdot e}{g} \cdot \frac{F_x^P \cdot \left(\frac{D_1}{2} + e\right)}{I_{Oz}}, \\ R_{By}^P &= -F_y^P \cdot \frac{AO}{AB}, \\ R_{Ay}^P &= F_y^P \cdot \frac{BO}{AB}. \end{aligned}$$

Щоб знайти значення сумарних складових опорних реакцій, які виникають в процесі різання, $\vec{R}_A^\Sigma, \vec{R}_B^\Sigma$ треба до значень реакцій при холостому режимі $\vec{R}_A^{хол}, \vec{R}_B^{хол}$ додати значення реакцій при різанні \vec{R}_A^P, \vec{R}_B^P , тобто маємо: $\vec{R}_A^\Sigma = \vec{R}_A^{хол} + \vec{R}_A^P, \vec{R}_B^\Sigma = \vec{R}_B^{хол} + \vec{R}_B^P$.

Висновки

Був розглянутий вплив радіального биття на підшипники. Також у зв'язку з тим, що короткочасність процесу різання можна охарактеризувати як удар, отримані динамічні складові опорних реакцій.

Таким чином, маємо алгоритм виконання чисельного аналізу задачі, результати якого плануються порівняти з експериментальними даними.

Отримані формули для визначення динамічних складових сил тиску на підшипники враховують ексцентриситет центру ваги диску, який є причиною радіального биття.

Короткочасна дія сил різання розглядається як ударне явище, що дозволило внести поправки в величини реакцій в підшипниках, отриманих методами статичних розрахунків.

Перелік використаних джерел:

1. Іщенко А.О., Лоза Є.А. Пили гарячого різання прокату. Конструкції та розрахунок: Монографія. Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2012. 251 с.
2. Іщенко А.А. Участки резки проката дисковыми пилами. Киев : Высшая школа, 1989. 61 с.
3. Іванченко Ф.К., Гребеник В.М., Ширяєв В.І. Розрахунок машин та механізмів прокатних цехів. Маріуполь : ПДТУ, 2012. Частина 6 : Ножиці и пили. 84 с.
4. Гребеник В.М., Іванченко Ф.К., Ширяєв В.І. Расчет металлургических машин и механизмов. Киев : Высшая школа, 1988. 448 с.
5. Седуш В.Я. Надежность, ремонт и монтаж металлургических машин : учебник. Киев: УМК ВО, 1992. 368 с.
6. Павловський М.А. Теоретична механіка: підручник для студентів вищих навчальних закладів. Київ : Техніка, 2002. 512 с.
7. Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. 240 с.
8. Доброносів Ю.К. Механічне обладнання металургійних заводів (устаткування прокатних цехів). Краматорськ : ДДМА, 2019. 50 с.

References:

1. A.O. Ishchenko, and Ye.A. Loza, *Pyly hariachoho rizannia prokatu. Konstruktsii ta rozrakhunok: Monohrafiia* [Saws for hot cutting rolled steel. Designs and calculation: Monograph]. Mariupol, Ukraine: SHEI «PSTU» Publ., 2012. (Ukr.)
2. A.O. Ishchenko, *Uchastky rezky prokata diskovimy pylamy* [Areas of cutting rolled steel with disc saws]. Kyiv, Ukraine: Vyscha shkola Publ., 1989. (Rus.)
3. F.K. Ivanchenko, V.M. Hrebennyk, and V.I. Shyriaiev, *Rozrakhunok mashyn ta mekhanizmv prokatnykh tsekhiv. Chastyna 6 : Nozhytsi y pyly* [Calculation of machines and mechanisms of rolling shops. Part 6: Scissors and saws]. Mariupol, Ukraine: SHEI «PSTU» Publ., 2012. (Ukr.)
4. V.M. Hrebennyk, F.K. Ivanchenko, and V.I. Shyriaiev, *Raschet metallurhicheskyykh mashyn y mekhanizmov* [Calculation of metallurgical machines and mechanisms]. Kyiv, Ukraine: Vyscha shkola Publ., 1988. (Rus.)
5. V.Ia. Sedush, *Nadezhnost, remont y montazh metallurhicheskyykh mashyn : uchebnyk* [Reliability, repair and installation of metallurgical machines: textbook]. Kyiv, Ukraine: UMK VO Publ., 1992. (Rus.)
6. M.A. Pavlovskii, *Teoretychna mekhanika: pidruchnyk dlia studentiv vyshchyykh navchalnykh zakladiv* [Theoretical mechanics: a textbook for students of higher educational institutions]. Kyiv, Ukraine: Tekhnika Publ., 2002. (Ukr.)
7. Yu.Ie. Palyvoda, A.Ie. Diachun, and R.Ia. Leshchuk, *Instrumentalni materialy, rezhymy rizannia, tekhnichne normuvannia mekhanichnoi obrobky : navchalno-metodychnyi posibnyk* [Tool materials, cutting modes, technical standardization of mechanical processing: a teaching-methodical manual]. Ternopil, Ukraine: Ternopil Ivan Puluj National Technical University Publ., 2019. (Ukr.)
8. Yu.K. Dobronosov, *Mekhanichne obladdannia metalurhiinykh zavodiv (ustatkuvannia prokatnykh tsekhiv)* [Mechanical equipment of metallurgical plants (equipment of rolling shops)]. Kramatorsk, Ukraine: DDMA Publ., 2019. (Ukr.)

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

Стаття надійшла 18.06.2023
Стаття прийнята 10.07.2023

**RESTORATION OF WEAR-OUT EQUIPMENT
USING COMPLEX METHOD OF 3-D SCANNING AND PRINTING**

Introduction. Equipment restoration is a complex process that requires a comprehensive approach. Wear of parts and components of large-scale equipment leads to a halt in technological processes, reduced productivity, and sometimes to the complete breakdown of the entire production chain. **Problem Statement.** In most cases, on-site repair is impossible. However, modern CAD technologies not only allow assessing the extent of wear but also suggest a path to restoration. The widespread use of 3D printing has significantly simplified the process of creating individual parts. However, the high accuracy of the finished product largely depends on the quality of the model. Rapid acquisition of a highly accurate model is possible with the help of a 3D scanner. However, the extensive selection of 3D equipment, as well as materials requiring special conditions, significantly complicates predicting the quality of the finished product. **Purpose.** To examine the stages of repairing parts using 3D scanning and 3D printing. To provide accuracy values for the obtained models and the quality of finished parts using the example of a part made of semi-crystalline material PEEK. **Materials and Methods.** The economic feasibility of 3D printing worn parts is argued. Direct and indirect methods of restoration are considered. Accuracy values obtained when printing materials such as PAI2, PP, TPU, ABS, PEEK are provided. **Results.** The conditions for 3D printing polyetherketone PEEK are identified, as well as the optimal characteristics for obtaining a material with the highest wear resistance. **Conclusions.** The application of a comprehensive method for restoring worn parts using 3D printing and scanning is a promising and reasonable solution. However, despite the high accuracy and quality of the modern method, the analysis conducted shows the need to study the issues of fastening parts of worn elements and the adhesion of the materials used.

Keywords: 3D printer, scanner, composite, restoration, equipment, technology, PEEK.

Рассохін Д.О., Носовська О.В., Кокодей Д.В. Відновлення зношеного обладнання комплексним методом 3-D сканування та друку. Реставрація обладнання – складний процес, який потребує комплексного підходу. Зношування деталей і вузлів великогабаритного обладнання призводить до зупинки технологічних процесів, зниження продуктивності, а іноді й до повного виходу з ладу всього виробничого ланцюга. У більшості випадків ремонт на місці неможливий. Однак сучасні технології CAD дозволяють не тільки оцінити ступінь зносу, але й підказують шлях до відновлення. Широке поширення 3D-друку значно спростило процес створення окремих деталей. Однак висока точність готового виробу багато в чому залежить від якості моделі. Швидке отримання високоточної моделі можливо за допомогою 3D-сканера. Однак великий вибір 3D обладнання, а також матеріалів, що вимагають особливих умов, значно ускладнює прогнозування якості готового продукту. Мета роботи – вивчити етапи ремонту деталей за допомогою 3D сканування та 3D друку, забезпечити значення точності отриманих моделей та якість готових деталей на прикладі деталі з напівкристалічного матеріалу PEEK. Аргументовано економічну доцільність 3D-друку зношених деталей. Розглянуто прямі та непрямі методи

¹ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-3479-9485, rassokhin_d_a@pstu.edu

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-1313-4767, nosovska_o_v@pstu.edu

³ студент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0001-7454-0515, den4ik133207@gmail.com

реставрації. Надаються значення точності, отримані під час друку таких матеріалів, як PA12, PP, TPU, ABS, PEEK. Визначено умови 3D-друку поліефіркетону PEEK, а також оптимальні характеристики для отримання матеріалу з найвищою зносо-стійкістю. Перспективним і доцільним рішенням є застосування комплексного методу відновлення зношених деталей за допомогою 3D-друку та сканування. Проте, незважаючи на високу точність та якість сучасного методу, проведений аналіз свідчить про необхідність вивчення питань кріплення деталей зношених елементів та адгезії використовуваних матеріалів.

Ключові слова: 3D-принтер, сканер, композит, реставрація, обладнання, технологія, PEEK.

Description of the problem.

Introduction. Restoration and repair of worn-out equipment has a high economic effect. The failure of the components leads to a stop of operation of the entire mechanism. At the same time, in most cases, it is advisable to repair, which allows extending the service life of the mechanism [1]. Traditional restoration methods are processes including manual welding, CNC (Computer Numerical Control) machining, further grinding and polishing [2]. Moreover, such repairs are widespread due to the low cost of materials, as well as the ease of work. However, an increasing number of parts have a complex geometric shape, use high-strength materials, followed by surface hardening, which greatly complicates the restoration process. At the same time, the issue of on-site repair, considering the listed difficulties, makes such repairs impossible at all. To date, the issue of on-site repair has not been fully studied and is a complex relationship of the processes and technologies involved. This relationship is the focus of the current analysis.

Problem definition. The technology of repair in modern production conditions is demonstrated in Fig. 1.

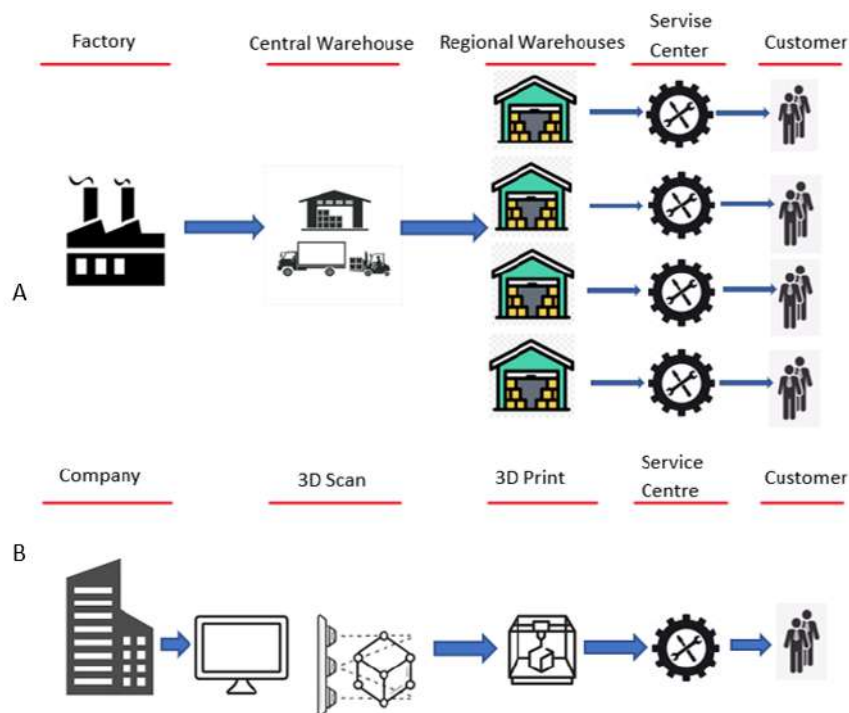


Fig. 1 – Scheme of repair and restoration of equipment: A) the classical scheme (production of new parts, warehousing, repair); B) a scheme using additive technologies (scanning a defective part, creating a 3D model of a defective part, repair)

In the classic repair scheme, a worn or damaged part is re-manufactured at the factory. At the same time, the technological process does not allow for a single production of such parts, which means

that it is necessary to provide for a central storage of parts. The manufacturer is forced to cooperate with many consumers, in particular repair shops, to sell their products, which means that it is necessary to ensure regional storage of parts, considering the level of consumption. All this affects both the final cost of the part and the repair time. An alternative way of repair is the use of additive technologies. With this scheme, several stages are excluded, and the repair time is also significantly reduced. The use of additive technologies requires a high-precision analysis of the worn part, which can be achieved by 3D scanning. In this case, the resulting model will become the basis for creating a 3D model of the defective part, or it will allow for modernization by adjusting the geometry considering the nature of the destruction, replacing the material with a one with higher mechanical characteristics, or hardening the surfaces. At the same time, repairs can be carried out directly at the customer's enterprise, because additive technologies do not require complex and expensive equipment and machine tools.

Restoration of individual objects from composite materials using the 3D printing method compared with subtractive production is considered [3].

The manufacture of a part from a large workpiece by removing material requires a variety of specialized equipment. Machines for milling, turning, grinding operations. Each of the methods has its own advantages and disadvantages [4].

The positive advantages of additive manufacturing include the possibility of manufacturing parts of complex geometry, as well as in single-piece manufacturing. In addition, additive manufacturing has a low material consumption, obtaining a part without many additional mechanical operations, which in turn significantly reduces manufacturing time. The advantages of subtractive manufacturing compared to additive manufacturing are the high quality of the resulting surface, dimensional accuracy, and improved mechanical properties of the materials used. However, today this situation has changed considerably [5].

The aim of the article is to analyze modern methods of equipment repair using traditional and innovative approaches, including 3D printing and thermoset composites, to identify their advantages, limitations and potential applications in the industrial and domestic spheres.

Analysis of recent research and publications. To date, additive technologies not only compete with traditional methods in terms of the range of materials used, but also surpass them in environmental and energy parameters. The application of additive manufacturing using the CLAD (Direct Additive Laser Manufacturing) process allows you to create parts with a thickness of less than 1 mm, in addition, this method allows you to repair parts, including metal materials and alloys. The study considered the option of creating a part from a titanium alloy Ti_6Al_4V , and compared the environmental impact compared to the traditional processing method. A laser additive manufacturing (CLAD) study showed a 70% reduction in environmental impact compared to CNC milling. The main impact was related to the production of powder. At the same time, a comparison of the cost of using the same allows us to conclude about the advantage of additive technologies. Comparison of the cost of restorations from composite materials obtained by 3D printing and subtractive methods in the medical field showed a significant excess of the average annual investment costs [3].

Thus, the use of 3D printing for dental restorations requires an annual investment of \$186, while the use of subtractive methods requires from \$875 to \$1,284 annually. At the same time, the quality of the resulting products was comparable both for samples obtained by 3D printing and those obtained by milling. The waste ratio should also be considered, which for 3D printing was 73% and 90% for milled restorations.

However, the quality of the parts obtained by 3D printing directly depends on the accuracy of the 3D scanned model. There are two types of 3-D scanning. These are non-contact and contact scanning [6]. When contact scanning, it is necessary to ensure contact with the measured object. This may damage the surface of the object. At the same time, their use is limited due to the low processing speed. Non-contact measurement of objects allows you to obtain contour data of the measured object by triangulation. In this case, the laser that sends a beam to the surface of the object is reflected and captured by the detector, which in turn allows calculating the coordinates of each elementary unit of the surface. In this case, a cloud of 3-dimensional coordinates is created, and a model is built based on these digital data [7]. According to the types of measurement, scanning systems are divided into those operating in a plane or performing scanning with rotation. At the same time, markers are preliminarily applied to the surface of the part, allowing the photos to be joined. Non-contact 3-D scanning of objects is of great importance for the industry. Existing technologies make it possible to control the geometry of parts both at the final

stage - a finished part, and during its manufacture [8]. In addition to changing the parameters of the part, the system can also register the wear of the machining tools [9]. A 3D scan performed on an already worn or destroyed part will allow you to determine the amount of wear. In this case, the curvilinearity of the worn surface will be considered in the model with a certain degree of accuracy. This will allow the CAD model to be built and tested and corrected. The effectiveness of 3D scanning is limited by existing shortcomings, some of which already have solutions:

1. There is no way to recognize the different materials used in one object.
2. The difficulty of obtaining a high-quality model of shiny, mirror, transparent surfaces. It is solved by using a white spray.
3. Errors in obtaining complex surfaces containing grooves, grooves in the object's body. It is solved by increasing the scan angle.
4. Necessity to use powerful computer technology. This is especially true for objects with large overall dimensions.
5. Errors during scanning, in which some surfaces are skipped. This is reflected on the model as holes. It is solved by additional editing of the finished model by means of CAD.

However, it should be noted that most of the problems are already successfully solved using modern computing equipment [5, 10]. The potential of 3D scanning devices is quite wide [3, 11]. Their diversity is subdivided according to the type of use into manual ones, which are widely used in architecture, medicine, and stationary ones, mainly used in industry [6-8, 12-14]. When scanning an object with a size of 1-300 meters, the scanning accuracy is 2-5 mm. With a scanning range of 0.3–1.5 m, the scanning accuracy is 0.1-1 mm [9, 15]. Such an order of scanning accuracy creates restrictions on the use in the details of engineering production. The use of specialized equipment makes it possible to improve the accuracy of scanning [10, 16]. The optical 3D scanner GOM ATOS Triple Scan II, when measuring the dimensions of an object under investigation with a diameter of 12 mm, showed a deviation from 0.7 to 1.45 μm (measuring volume MV100) (Fig. 2). After receiving a 3D model of the part, a decision is made on its creation or restoration. The choice of a repair method for a part largely depends on the nature of the operation, as well as the amount of wear.

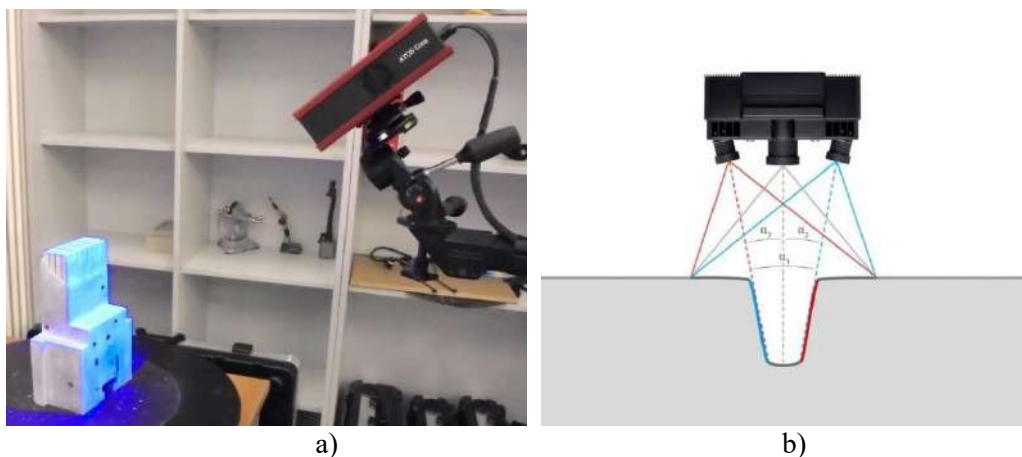


Fig. 2 – GOM ATOS Triple Scan 3D scanner a) in operation; b) principle of triple scanning (Source photo: Lometec)

Presentation of the main material. Modern methods of repairing worn parts use direct and indirect restoration methods [17]. Direct methods include laser beam melting (SLM), laser cladding (LENS) [18]. One of the effective methods for repairing damaged components is the method of layer-by-layer creation of a material by directing laser beams into a thin layer of powder [19]. Examples of such repairs are the restoration of corrosive wear of gearboxes in aircraft, corrosive wear of air pump housings, valve drives in the marine industry, etc. [20-24]. Efficient additive manufacturing methods also include bath polymerization, material extrusion [25], material spraying, powder bed melting [26-27], sheet lamination [28], direct energy deposition, and binder spraying [29-30]. Material extrusion is used the most widely. To date, the choice of filaments is presented quite widely (Table 1).

Table 1

Used filaments in 3D printing with heat resistance up to 320°C

Operating temperature, °C	Amorphic	Semicrystalline
60	PCV	
80	PMMA	PA12
90		PP
100	PC	PA6.6, PA 6.10, PA6, PET
120	PS, ABS, SAN	PA4.6, PVDF, PPA
160	PSU	
180	PPSU, PES	
240		LCP, PPS, PTFE, PFA, PFE, PCTFE
250		PEEK
260	PAI	
300	PI	
320	PBI	

The material extrusion method, also known as FDM (Fused Deposition Modeling) or FFF (Fused Filament Fabrication), is one of the most common and affordable additive manufacturing methods. It is based on heating and pushing a plastic material through a nozzle, creating an object layer by layer. The FDM process begins by loading a filament of plastic material into the printer. The filament is then heated to a certain temperature to become malleable and formable. This molten material is then extruded through a nozzle and applied to the work surface, where it cools and solidifies to form a layer of the object. Once one layer is completed, the platform is lowered by a fixed amount and the process is repeated to create the next layer. This cycle repeats until the entire object is completed. The FDM method has several key advantages. These include affordability and ease of use. FDM printers are available in a variety of price points and are easy to customize, making them accessible to a wide range of users. In addition, FDM printers are compatible with different types of plastic materials including PLA, ABS, TPU and many others. This allows you to choose the right material depending on the requirements of the product. Due to its ability to create dense and strong layers, FDM can be used to produce functional prototypes, components, and parts. In doing so, the FDM method is widely used in a variety of applications including prototyping, engineering modeling, education, and small batch production of parts. It is also used in the creation of customizable products and unique parts that require a customized manufacturing approach.

The creation of parts of metal parts involves the use of materials that are similar in mechanical properties. Polyetherketone PEEK can be attributed to this type of materials. This semi-crystalline polymer is actively used in bioengineering, in the creation of implants, in mechanical engineering, etc. One of its advantages is its high melting point, which also allows heat treatment. The quality of the resulting layer depends on the settings and characteristics of the 3D printer. These values include nozzle and chamber temperature, base plate temperature, layer height and print speed, and cooling mode.

PEEK has several characteristics that make it an attractive material for additive manufacturing. Its high temperature resistance allows it to withstand high temperatures of up to 250°C, making it ideal for applications requiring resistance to high temperatures. At the same time, the material has high mechanical strength and stiffness. PEEK is resistant to a variety of chemical attack, including oils, solvents, and aggressive chemical environments, and is also highly corrosion resistant. Further improvement in wear resistance lies in the addition of microfillers as well as nanoparticles in the PEEK matrix. Carbon nanotubes, carbon fibers introduced in the matrix show significantly enhance the mechanical properties. In addition, it has good biocompatibility, which greatly expands its application area. As the study shows [31], PEEK printing is carried out at a nozzle temperature from 350 to 440°C, a bearing surface temperature of 100-150°C and a chamber temperature of 90-160°C. In this case, the temperature is crucial and failure to comply with the regime can lead to cracking of the part, its warping. At the same time, this material has high mechanical characteristics. Thanks to carbon fiber reinforcement (CF/PEEK), this thermoplastic material has high damage resistance as well as creep and fatigue resistance. Flexural

strength tests were 140 MPa [31]. This material has wide limits of optimization. It was revealed [32] that the use of preheating (C3D/PEEK) before hot pressing, as well as the optimization of the production process and processing parameters, can increase the bending strength up to 500 MPa. The elastic modulus of pure PEEK reaches 3900 MPa, the ultimate tensile strength is 108 MPa, and the elongation at break is 19% [33] (Fig. 3, Table 2, 3).

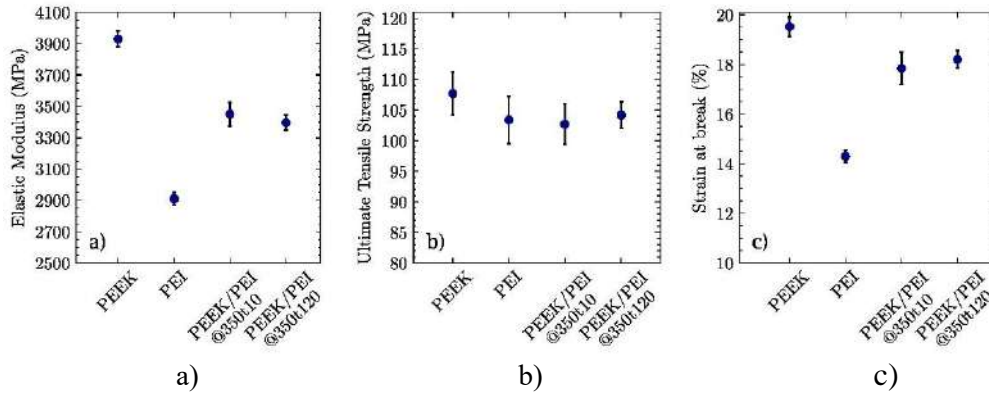


Fig. 3 – (a) Modulus of elasticity, (b) tensile strength, and (c) elongation at break of pure PEEK and PEI polymers and MLP PEEK/PEI treated at 350°C for 10 and 120 minutes [34]

A separate issue in the production of parts or segments during restoration is the dimensional accuracy, as well as the roughness of the resulting surface [20, 34-35]. Using the example of creating cams by CNC machining and a 3-D printer, the same error values in diametrical dimensions were obtained. At the same time, the average roughness Ra of cams made of polylactic acid (PLA) material printed on a 3D printer was 20 times higher than that of milled aluminum cams (no grinding was carried out). Average roughness values were 10.41 μm for printed cams and 0.5 μm for milled cams. Comparison of the surface roughness of parts obtained from various materials by FDM and SLS 3D printing allows us to conclude that the PEEK material has the lowest roughness values – 7.7 μm [36]. And laser polishing reduces these values to 0.13 μm.

Table 2

3D printing method and initial roughness of various materials measured with a band pass filter at 8-320 μm spatial wavelength [33]

Material	Printing method	Roughness after printing	T _{act} , inspected range	t _w , inspected range
PAI2	SLS	10.2 μm	180-270°C	10-200 s
PP	SLS	16.9 μm	120-200°C	20-160 s
TPU	SLS	39.5 μm	170-220°C	20-240 s
ABS	FDM	18.5 μm	180-220°C	20-140 s
PEEK	FDM	7.7 μm	300-370°C	600-1800 s

Table 3

Achieved roughness for various laser polished materials measured with a band pass filter at 8-320 μm spatial wavelength [33]

Material	Temperature set point for laser polishing	Interaction time for laser polishing	Roughness after laser polishing
PAI2	210°C	200 s	0.61 μm
PP	180°C	60 s	0.59 μm
TPU	200°C	40 s	0.12 μm
ABS	220°C	60 s	0.24 μm
PEEK	340°C	1800 s	0.13 μm

The use of composite PEEK is due to its potential as an engineering material with high thermal stability, chemical resistance, strength, and machinability. The mechanical properties of PEEK material are highly dependent on printing conditions, in particular nozzle temperature and printing speed. To date, the PEEK material has been studied quite well. Melting point 330-385°C, creates conditions for heat treatment. The minimum wear rate for the sample in the annealed state is known – $1.37 \cdot 10^{-6}$ mm³/Nm. The combination of annealing and yarn orientation makes it possible to achieve an elastic modulus of 3-4 GPa and a tensile strength of 90-120 MPa. The following studies of the material for friction and wear are known. Abrasive dry wear was studied [37] by the author for pure PEK and reinforced with carbon fiber APC2 and aramid fiber K49/PEEK. The effect of fiber orientation on the wear mechanism was observed. The results showed the highest wear resistance of the composite material reinforced with aramid fibers oriented normally to the contact surface and carbon fibers oriented in parallel. All this makes polyetherketone PEEK a versatile material, the use of which is possible in solving a wide range of engineering problems.

Conclusions

Modern development of technologies allows you to perform equipment recovery in various ways. The authors analyzed the methods of such restoration using 3D printing in relation to the problem of restoring the surface of damaged parts at the site of operation. The technical means and materials that make it possible to repair parts made of metals while maintaining mechanical characteristics are determined, and the problems and shortcomings of the proposed technologies are analyzed. However, the issue of fixing the restored parts on the main part remains unexplored. The study of adhesion for various materials, the nature of surfaces, operating conditions is a promising direction for the further development of the considered technology.

References:

1. M.C.D. Hollander, and C.A. Bakker, «A business model framework for product life extension», in Proceedings of the 17th International Conference Sustainable Innovation, Bonn, Germany, pp. 110-118, 2012.
2. S.T.M. Kin, S.K. Ong, and A.Y.C. Nee, «Remanufacturing process planning», *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 189-194, 2014. doi: [10.1016/j.procir.2014.06.087](https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.087).
3. R. Daher, S. Ardu, E. di Bella, I. Krejci, and O. Duc, «Efficiency of 3D-printed composite resin restorations compared with subtractive materials: Evaluation of fatigue behavior, cost, and time of production», *The Journal of Prosthetic Dentistry*, pp. 1-8, November 2022. doi: [10.1016/j.prosdent.2022.08.001](https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.08.001).
4. H. Jayawardane, I.J. Davies, J.R. Gamage, M. John, and W.K. Biswas, «Sustainability perspectives – a review of additive and subtractive manufacturing», *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, vol. 2, pp. 1-12, 2023. doi: [10.1016/j.smse.2023.100015](https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100015).
5. H.-S. Yoon, J.-Y. Lee, H.-S. Kim, M.-S. Kim, E.-S. Kim, Y.-J. Shin, W.-S. Chu, and S.-H. Ahn, «A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study», *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 1, pp. 261-279, 2014. doi: [10.1007/s40684-014-0033-0](https://doi.org/10.1007/s40684-014-0033-0).
6. A.W. Yao, «Applications of 3D scanning and reverse engineering techniques for quality control of quick response products», *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 26(11-12), pp. 1284-1288, 2005. doi: [10.1007/s00170-004-2116-5](https://doi.org/10.1007/s00170-004-2116-5).
7. J.F. Larue, D. Brown, and M. Viala, «How optical CMMs and 3D scanning will revolutionize the 3D metrology world», *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection*, pp. 141-176, 2015. doi: [10.1007/978-1-4471-6741-9_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6741-9_5).
8. L. Du, Y. Lai, C. Luo, Y. Zhang, J. Zheng, X. Ge, and Y. Liu, «E-quality control in dental metal additive manufacturing inspection using 3D scanning and 3D measurement», *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, vol. 8, pp. 1-9, 2020. doi: [10.3389/fbioe.2020.01038](https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.01038).
9. C.E. Dombroski, M.E. Balsdon, and A. Froats, «The use of a low-cost 3D scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses: A preliminary study», *BMC Research Notes*, vol. 7, pp. 1-4, 2014. doi: [10.1186/1756-0500-7-443](https://doi.org/10.1186/1756-0500-7-443).
10. A. Haleem, «3D scanning applications in the medical field: A literature-based review», *Clinical Epidemiology and Global Health*, vol. 7(2), pp. 199-210, 2019. doi: [10.1016/j.cegh.2018.05.006](https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.05.006).

11. A. Haleem, M. Javaid, R.P. Singh, S. Rab, R. Suman, L. Kumar, and I.H. Khan, «Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview», *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*, vol. 3, pp. 161-171, 2022. doi: **10.1016/j.ijcce.2022.08.003**.
12. H. Gaub, «Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies», *Reinforced Plastics*, vol. 60(6), pp. 401-404, 2016. doi: **10.1016/j.repl.2015.09.004**.
13. A. Haleem, P. Gupta, S. Bahl, M. Javaid, and L. Kumar, «3D scanning of a carburetor body using COMET 3D scanner supported by COLIN 3D software: Issues and solutions», *Materials Today Proceeding*, vol. 39, part 1, pp. 331-337, 2021. doi: **10.1016/j.matpr.2020.07.427**.
14. M. Javaid, and A. Haleem, «Using additive manufacturing applications for design and development of food and agricultural equipments», *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 58(2-3), pp. 225-238, 2019. doi: **10.1504/IJMPT.2019.10018137**.
15. D.K. Lee, and B.Y. Park, «A case study for 3D scanning-based quantitative quality control during key stages of composite small craft production», *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 15, 100534, 2023. doi: **10.1016/j.ijnaoe.2023.100534**.
16. J. Vagovský, I. Buranský, and A. Görög, «Evaluation of Measuring Capability of the Optical 3D Scanner», *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 1198-1206, 2015. doi: **10.1016/j.pro-eng.2015.01.484**.
17. Y. Kok, X.P. Tan, P. Wang, M.L.S. Nai, N.H. Loh, E. Liu, and S.B. Tor, «Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: a critical review», *Materials & Design*, vol. 139, pp. 565-586, 2017. doi: **10.1016/j.matdes.2017.11.021**.
18. V.P. Lyalyakin, A.Y. Kostukov, and V.A. Denisov, «Special features of reconditioning the housing of a Caterpillar diesel oil pump by gas-dynamic spraying», *Welding International*, vol. 30(1), pp. 68-70, 2016. doi: **10.1080/09507116.2015.1030152**.
19. S. Yin, P. Cavaliere, B. Aldwell, R. Jenkins, H. Liao, W. Li, and R. Lupoi, «Cold spray additive manufacturing and repair: fundamentals and applications», *Additive Manufacturing*, vol. 21, pp. 628-650, 2018. doi: **10.1016/j.addma.2018.04.017**.
20. M.Y.S. Syahara, A.W. Dzuraidah, A.H. Hiyam, and H.A. Abdul, «Intelligent systems for additive manufacturing-based repair in remanufacturing: A systematic review of its potential», *PeerJ Computer Science*, vol. 7(17), pp. 1-34, 2021. doi: **10.7717/peerj-cs.808**.
21. A. Boschetto, L. Bottini, M. Eugeni, V. Cardini, G.G. Nisi, F. Veniali, and P. Gaudenzi, «Selective laser melting of a 1u cubesat structure. Design for additive manufacturing and assembly», *Acta Astronautica*, vol. 159, pp. 377-384, 2019. doi: **10.1016/j.actaastro.2019.03.041**.
22. I.A. Okaro, S. Jayasinghe, C. Sutcliffe, K. Black, P. Paoletti, and P.L. Green, «Automatic fault detection for laser powder-bed fusion using semi-supervised machine learning», *Additive Manufacturing*, vol. 27, pp. 42-53, 2019. doi: **10.1016/j.addma.2019.01.006**.
23. M. Matsumoto, S. Yang, K. Martinsen, and Y. Kainuma, «Trends and research challenges in remanufacturing», *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 3(1), pp. 129-142, 2016. doi: **10.1007/s40684-016-0016-4**.
24. C.A. Widener, M.J. Carter, O.C. Ozdemir, R.H. Hrabe, B. Hoiland, T.E. Stamey, and T.J. Eden, «Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator», *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 25(1-2), pp. 193-201, 2016. doi: **10.1007/s11666-015-0366-4**.
25. J.M. Jafferson, and D. Chatterjee, «A review on polymeric materials in additive manufacturing», *Materials Today: Proceedings*, vol. 46, part 2, pp. 1349-1365, 2021. doi: **10.1016/j.matpr.2021.02.485**.
26. H. Chen, Y. Zhang, A. Giam, and W. Yan, «Experimental and computational study on thermal and fluid behaviors of powder layer during selective laser melting additive manufacturing», *Additive Manufacturing*, vol. 52, 102645, 2022. doi: **10.1016/j.addma.2022.102645**.
27. K. Li, C. Ji, S. Bai, B. Jiang, and F. Pan, «Selective laser melting of magnesium alloys: Necessity, formability, performance, optimization and applications», *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 154, pp. 65-93, 2023. doi: **10.1016/j.jmst.2022.12.053**.
28. H. Aghajani Derazkola, F. Khodabakhshi, and A. Simchi, «Evaluation of a polymer-steel laminated sheet composite structure produced by friction stir additive manufacturing (FSAM) technology», *Polymer Testing*, vol. 90, 106690, 2020. doi: **10.1016/j.polymertesting.2020.106690**.

29. T. Kim, E. Samuel, C. Park, A. Aldalbahi, M. El-Newehy, Y. Kang, H.S. Lee, and S.S. Yoon, «Iron oxide supercapacitor of high volumetric energy and power density using binder-free supersonic spraying and self-healing rGO», *Ceramics International*, vol. 48(10), pp. 13684-13694, 2022. doi: **10.1016/j.ceramint.2022.01.250**.
30. L. Zhuo, C. Liu, E. Yin, Z. Zhao, and S. Pang, «Low-cost and low-temperature 3D printing for refractory composite inspired by fused deposition modeling and binder jetting», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 162(6), 107147, 2022. doi: **10.1016/j.compositesa.2022.107147**.
31. A. Beehag, and L. Ye, «Role of cooling pressure on interlaminar fracture properties of commingled CF/PEEK composites», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 27, iss. 3, pp. 175-182, 1996. doi: **10.1016/1359-835X(95)00027-Y**.
32. H. Luo, G. Xiong, Z. Yang, S.R. Raman, Q. Li, C. Ma, D. Li, Z. Wang, and Y. Wan, «Preparation of three-dimensional braided carbon fiber-reinforced PEEK composites for potential load-bearing bone fixations. Part I. Mechanical properties and cytocompatibility», *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 29, pp. 103-113, 2014. doi: **10.1016/j.jmbbm.2013.09.003**.
33. S.A. Toro, A. Ridruejo, C. González, M.A. Monclús, and J.P. Fernández-Blázquez, «Optimization of processing conditions and mechanical properties for PEEK/PEI multilayered blends», *Polymers*, vol. 14(21), pp. 1-12, 2022. doi: **10.3390/polym14214597**.
34. E. Zayas-Figueras, and I. Buj-Corral, «Comparative study about dimensional accuracy and surface finish of constant-breadth cams manufactured by FFF and CNC milling», *Micromachines*, vol. 14(2), pp. 1-16, 2023. doi: **10.3390/mi14020377**.
35. I. Buj-Corral, and E. Zayas-Figueras, «Comparative study about dimensional accuracy and form errors of FFF printed spur gears using PLA and Nylon», *Polymer Testing*, vol. 117, 107862, 2023. doi: **10.1016/j.polymertesting.2022.107862**.
36. K. Braun, E. Willenborg, and J.H. Schleifenbaum, «Laser polishing as a new post process for 3D-printed polymer parts», *Procedia CIRP*, 94, pp. 134-138, 2020. doi: **10.1016/j.procir.2020.09.026**.
37. M. Cirino, R.B. Pipes, and K. Friedrich, «The abrasive wear behavior of continuous fiber polymer composites», *Journal of Materials Science*, vol. 22, pp. 2481-2492, 1987. doi: **10.1007/BF01082134**.

Перелік використаних джерел:

1. Hollander M.C.D., Bakker C.A. A business model framework for product life extension. *17th International Conference Sustainable Innovation*, Bonn, Germany, 29-30 October 2012. Pp. 110-118.
2. Kin S.T.M., Ong S.K., Nee A.Y.C. Remanufacturing process planning. *Procedia CIRP*. 2014. Vol. 15. Pp. 189-194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.087>.
3. Efficiency of 3D-printed composite resin restorations compared with subtractive materials: Evaluation of fatigue behavior, cost, and time of production / R. Daher, S. Ardu, E. di E. Bella, I. Krejci, O. Duc. *The Journal of Prosthetic Dentistry*. November 2022. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2022.08.001>.
4. Sustainability perspectives – a review of additive and subtractive manufacturing / H. Jayawardane, I.J. Davies, J.R. Gamage, M. John, W.K. Biswas. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*. 2023. Vol. 2. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100015>.
5. A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study / H.-S. Yoon, J.-Y. Lee, H.-S. Kim, M.-S. Kim, E.-S. Kim, Y.-J. Shin, W.-S. Chu, and S.-H. Ahn. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2014. Vol. 1. Pp. 261-279. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0033-0>.
6. Yao A.W. Applications of 3D scanning and reverse engineering techniques for quality control of quick response products. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005. Vol. 26(11-12). Pp. 1284-1288. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2116-5>.
7. Larue J.F., Brown D., Viala M. How optical CMMs and 3D scanning will revolutionize the 3D metrology world. *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection*. 2015. Pp. 141-176. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6741-9_5.
8. E-quality control in dental metal additive manufacturing inspection using 3D scanning and 3D measurement / L. Du, Y. Lai, C. Luo, Y. Zhang, J. Zheng, X. Ge, Y. Liu. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2020. Vol. 8. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2020.01038>.

9. Dombroski C.E., Balsdon M.E., Froats A. The use of a low-cost 3D scanning and printing tool in the manufacture of custom-made foot orthoses: A preliminary study. *BMC Research Notes*. 2014. Vol. 7. Pp. 1-4. DOI: <https://doi.org/10.1186/1756-0500-7-443>.
10. Haleem A. 3D scanning applications in the medical field: A literature-based review. *Clinical Epidemiology and Global Health*. 2019. Vol. 7(2). Pp. 199-210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.05.006>.
11. Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview / A. Haleem, M. Javaid, R.P. Singh, S. Rab, R. Suman, L. Kumar, I.H. Khan. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*. 2022. Vol. 3. Pp. 161-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijcce.2022.08.003>.
12. Gaub H. Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies. *Reinforced Plastics*. 2016. Vol. 60(6). Pp. 401-404. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.repl.2015.09.004>.
13. 3D scanning of a carburetor body using COMET 3D scanner supported by COLIN 3D software: Issues and solutions / Haleem A., Gupta P., Bahl S., Javaid-Kumar M.L. *Materials Today Proceeding*. 2021. Vol. 39. Part 1. Pp. 331-337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.427>.
14. Javaid M., Haleem A. Using additive manufacturing applications for design and development of food and agricultural equipments. *International Journal of Materials and Product Technology*. 2019. Vol. 58(2-3). Pp. 225-238. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMPT.2019.10018137>.
15. Lee D.K., Park B.Y. A case study for 3D scanning-based quantitative quality control during key stages of composite small craft production. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2023. Vol. 15. 100534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2023.100534>.
16. Vagovský J., Buranský I., Görög A. Evaluation of Measuring Capability of the Optical 3D Scanner. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. Pp. 1198-1206. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2015.01.484>.
17. Anisotropy and heterogeneity of microstructure and mechanical properties in metal additive manufacturing: a critical review / Y. Kok, X.P. Tan, P. Wang, M.L.S. Nai, N.H. Loh, E. Liu, S.B. Tor. *Materials & Design*. 2017. Vol. 139. Pp. 565-586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.021>.
18. Lyalyakin V.P., Kostukov A.Y., Denisov V.A. Special features of reconditioning the housing of a Caterpillar diesel oil pump by gas-dynamic spraying. *Welding International*. 2016. Vol. 30(1). Pp. 68-70. DOI: <https://doi.org/10.1080/09507116.2015.1030152>.
19. Cold spray additive manufacturing and repair: fundamentals and applications / S. Yin, P. Cavaliere, B. Aldwell, R. Jenkins, H. Liao, W. Li, R. Lupoi. *Additive Manufacturing*. 2018. Vol. 21. Pp. 628-650. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.017>.
20. Intelligent systems for additive manufacturing-based repair in remanufacturing: A systematic review of its potential / Syahara M.Y.S., Dzuraidah A.W., Hiyam A.H., Abdul H.A. *PeerJ Computer Science*. 2021. Vol. 7(17). Pp. 1-34. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.808>.
21. Selective Laser Melting of a 1U CubeSat structure. Design for Additive Manufacturing and assembly / A. Boschetto, L. Bottini, M. Eugeni, V. Cardini, G.G. Nisi, F. Veniali, P. Gaudenzi. *Acta Astronautica*. 2019. Vol. 159. Pp. 377-384. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.03.041>.
22. Automatic fault detection for laser powder-bed fusion using semi-supervised machine learning / I.A. Okaro, S. Jayasinghe, C. Sutcliffe, K. Black, P. Paoletti, P.L. Green. *Additive Manufacturing*. 2019. Vol. 27. Pp. 42-53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.01.006>.
23. Trends and research challenges in remanufacturing / Matsumoto M., Yang S., Martinsen K., Kainuma Y. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2016. Vol. 3(1). Pp. 129-142. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0016-4>.
24. Application of high-pressure cold spray for an internal bore repair of a navy valve actuator / C.A. Widener, M.J. Carter, O.C. Ozdemir, R.H. Hrabe, B. Hoiland, T.E. Stamey, T.J. Eden. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2016. Vol. 25(1-2). Pp. 193-201. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0366-4>.
25. Jafferson J.M., Chatterjee D. A review on polymeric materials in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 46. Part 2. Pp. 1349-1365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.485>.
26. Experimental and computational study on thermal and fluid behaviors of powder layer during selective laser melting additive manufacturing / Chen H., Zhang Y., Giam A., Yan W. *Additive*

- Manufacturing*. 2022. Vol. 52. 102645. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102645>.
27. Selective laser melting of magnesium alloys: Necessity, formability, performance, optimization and applications / K. Li, C. Ji, S. Bai, B. Jiang, F. Pan. *Journal of Materials Science & Technology*. 2023. Vol. 154. Pp. 65-93. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.12.053>.
 28. Aghajani Derazkola H., Khodabakhshi F., Simchi A. Evaluation of a polymer-steel laminated sheet composite structure produced by friction stir additive manufacturing (FSAM) technology. *Polymer Testing*. 2020. Vol. 90. 106690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106690>.
 29. Iron oxide supercapacitor of high volumetric energy and power density using binder-free supersonic spraying and self-healing rGO / T. Kim, E. Samuel, C. Park, A. Aldabahi, M. El-Newehy, Y. Kang, H.S. Lee, S.S. Yoon. *Ceramics International*. 2022. Vol. 48(10). Pp. 13684-13694. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.01.250>.
 30. Low-cost and low-temperature 3D printing for refractory composite inspired by fused deposition modeling and binder jetting / L. Zhuo, C. Liu, E. Yin, Z. Zhao, S. Pang. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2022. Vol. 162(6). 107147. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107147>.
 31. Beehag A., Ye L. Role of cooling pressure on interlaminar fracture properties of commingled CF/PEEK composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1996. Vol. 27. Iss. 3. Pp. 175-182. DOI: [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(95\)00027-Y](https://doi.org/10.1016/1359-835X(95)00027-Y).
 32. Preparation of three-dimensional braided carbon fiber-reinforced PEEK composites for potential load-bearing bone fixations. Part I. Mechanical properties and cytocompatibility / H. Luo, G. Xiong, Z. Yang, S.R. Raman, Q. Li, C. Ma, D. Li, Z. Wang, Y. Wan. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2014. Vol. 29. Pp. 103-113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2013.09.003>.
 33. Optimization of processing conditions and mechanical properties for PEEK/PEI multilayered blends / S.A. Toro, A. Ridruejo, C. González, M.A. Monclús, J.P. Fernández-Blázquez. *Polymers*. 2022. Vol. 14(21). Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14214597>.
 34. Zayas-Figueras E., Buj-Corral I. Comparative study about dimensional accuracy and surface finish of constant-breadth cams manufactured by FFF and CNC milling. *Micromachines*. 2023. Vol. 14(2). Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi14020377>.
 35. Buj-Corral I., Zayas-Figueras E. Comparative study about dimensional accuracy and form errors of FFF printed spur gears using PLA and Nylon. *Polymer Testing*. 2023. Vol. 117. 107862. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107862>.
 36. Braun K., Willenborg E., Schleifenbaum J.H. Laser polishing as a new post process for 3D-printed polymer parts. *Procedia CIRP*. 2020. Vol. 94. Pp. 134-138. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.026>.
 37. Cirino M., Pipes R.B., Friedrich K. The abrasive wear behavior of continuous fiber polymer composites. *Journal of Materials Science*. 1987. Vol. 22. Pp. 2481-2492. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01082134>.

Reviewer: S.V. Belodedenko
Dsc (Engineering), prof., USUST

The article was received on 05.10.2023
The article was admitted on 12.11.2023

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.184.244

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300057

© Юшкевич П.О.*

**АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ РЕАКЦІЙНОЇ ЗОНИ ВЗАЄМОДІЇ У РОЗПЛАВІ
КОНВЕРТЕРУ ТА СИСТЕМАТИЗАЦІЯ РІВНЯНЬ З ВИЗНАЧЕННЯ
ГЛИБИНИ ЇЇ ПРОНИКНЕННЯ**

Важливим аспектом у ході експлуатації конвертерів за технологією верхньої продувки є можливість впливу високотемпературної реакційної зони взаємодії на поверхню футерівки конвертеру. За умови утворення нераціональної глибини проникнення реакційної зони взаємодії, відбувається суттєва інтенсифікація зносу футерівки днища конвертера. Подібне призводить до передчасного її виходу з ладу або може викликати явище прогару днища футерівки та сталевого кожуху конвертеру з непередбачуваним зливом розплаву. Наведене є небезпечною аварійною ситуацією для умов металургійного виробництва. Одним з шляхів уникнення такого явища є передчасна прогностична оцінка особливостей утворення реакційної зони взаємодії та глибини її проникнення у шари об'єму розплаву металу. Співставлення її розмірів з відповідними розмірами робочого простору конвертерної ванни. На сьогодні існує багато свідчень та рівнянь, що стосуються реакційної зони взаємодії для різних способів та режимів продувки конвертерної ванни. Однак потрібне сучасне представлення основних типів геометричного утворення реакційної зони взаємодії у кисневому конвертері за умови продувки через верхню фурму, незалежно від конструкції багатосоплового наконечника та режиму продувки. Відповідно до мети та завдань роботи за особливостями геометричного формування запропоновано три основні характерні типи утворення реакційної зони взаємодії у кисневому конвертері за умови продувки через верхню фурму з багатосопловим наконечником різної конструкції та режимом продувки: роздільне утворення окремих незалежних реакційних зон взаємодії певних геометричних розмірів, кількість яких дорівнює кількості кисневих струменів, що безпосередньо діють на поверхню розплаву та проникають у глиб його шарів; згруповане утворення декількох об'єднаних незалежних реакційних зон взаємодії, що утворюються за рахунок об'єднання разом двох та більше одиночних реакційних зон, створених незалежними кисневими струменями; об'єднане утворення однієї суцільної реакційної зони взаємодії за рахунок злиття зовнішніх контурів усіх одиночних реакційних зон взаємодії, що сформовані незалежними кисневими струменями у єдину об'єднану реакційну зону взаємодії. Окрім цього сформовано добірки рівнянь для визначення $L_{гзв}$ – глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у розплав металу, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертеру. Розділення рівнянь на добірки виконано відповідно до типу фізичного моделювання, що було виконано для їх отримання. Перша добірка рівнянь, що були отримані на підставі обробки результатів експериментів низькотемпературного фізичного моделювання, складається з 13 рівнянь. Друга добірка рівнянь, котрі отримані за рахунок обробки результатів експериментів з високотемпературного фізичного моделювання, складається з 7 рівнянь.

Ключові слова: конвертер, верхня фурма, верхня продувка, продувка розплаву, фізичне моделювання, реакційна зона взаємодії, глибина проникнення, рівняння.

* канд. техн. наук., ст. наук. співробітник, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-2675-0737, isi.dps.r@gmail.com

P.O. Yushkevych. Analysis of the formation of the reactionary zone of interaction into the melt in converter aggregate and systematization of equations to determine the depth of its penetration. An important aspect in the operation of converters aggregates with top blowing technology is the influence high-temperature reactionary area of interaction on the thermal bricks in the converter aggregate. Provided the formation of irrational depth of penetration of the reactionary zone of interaction, there is a significant intensification of the wear of the thermal bricks on the bottom of the converter. One way to avoid such a phenomenon is a premature prognosis of the peculiarities of the formation of the reactionary zone of interaction and the depth of its penetration into the layers of the volume of metal melt. Today, there are much information about reactionary zone of interaction and equations for calculate it depth of penetration for different methods top and combine blowing technology in the converter. However, to date we need modern representation of the main types of geometric formation of the reactionary zone of interaction in the oxygen converter with top blowing from tuyere. Regardless of the design the multi-nozzles tip and the blowing modes. According to the purpose and tasks of the work, was offered three main types of the geometric formation of the reaction zone of interaction, in the oxygen converter with top blowing technology, regardless of the design of the multi-nozzles tip and the blowing mode: the separate formation of independent reactionary zones of interaction of certain geometric dimensions, the quantity of which is equal to the quantity of oxygen jets that directly act on the surface of the melt and penetrate its layers; the grouped formation of several united independent reactionary zone of interaction formed by the combination of two or more single reactionary zones created by independent oxygen jets; the united formation of one continuous reactionary zone of interaction due to the fusion of the external contours of all single reactionary areas of interaction, formed by independent oxygen jets. Into the single united reactionary zone of the interaction. In addition, was formed collection of equations to determine L_{rzv} – the depth of penetration of the reactionary zone of interaction of gas (oxygenes) jets into the melt of metal located in the working space of the converter bath. The separation of equations into collections was made according to the type of physical modeling what was used to obtain them. The first selection of equations obtained on the basis of processing the results of experiments with low temperature physical modeling consists of 13 equations. The second selection includes of equations obtained by processing the results with high temperature physical modeling experiments and consists of 7 equations.

Key words: converter, top tuyere, top blowing, blowing of melt, physical modeling, reactionary zone of interaction, the depth of penetration, equations.

Постановка проблеми. Киснево-конвертерний переділ є одним з головних промислових способів виробництва сталі як в Україні, так і світі [1-28]. В Україні у киснево-конвертерному виробництві переважно використовується технологія верхньої продувки конвертерної ванни, що передбачає продувку розплаву через одноярусну багатосоплову фурму надзвуковими кисневими струменями [2-5, 4, 28]. Верхня продувка з використанням багатосоплової фурми ґрунтується на утворенні кожним струменем газу (кисню), що витікає з сопла наконечника фурми, високотемпературної реакційної зони взаємодії [2-27]. Реакційна зона взаємодії формується у результаті проникнення та заглиблення газового (кисневого) струменя у шари розплаву, котрі знаходяться у робочому просторі ванни конвертера [2-5, 12, 14, 20, 28, 4]. У просторі та об'ємі реакційної зони взаємодії розвиваються основні гідрогазодинамічні, тепломасообмінні та екзотермічні процеси [2-17]. Переважне окислення (Si) – кремнію, (Mn) – марганцю, (C) – вуглецю, (Fe) – заліза також відбувається у межах реакційної зони взаємодії [2-21]. У реакційній зоні взаємодії локально досягається найвища температура під час продувки та конвертування розплаву [2-21]. Від неї відбувається інтенсифікація та розповсюдження усіх вище перелічених процесів та забезпечується передання тепла до периферійних та глибинних шарів розплаву у робочому просторі ванни конвертеру [2-21], завдяки чому досягається необхідні склад за вмістом хімічних елементів та температура в усьому об'ємі розплаву, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертеру.

Важливим аспектом у ході експлуатації конвертерів за технологією верхньої продувки є можливість впливу високотемпературної реакційної зони взаємодії на поверхню футерівки конвертеру. За умови утворення нераціональної глибини проникнення реакційної зони взаємодії, відбувається суттєва інтенсифікація зносу футерівки днища конвертеру. Подібне призводить до передчасного її виходу з ладу або може викликати явище прогару днища футерівки та сталевого кожуху конвертеру з непередбачуваним зливом розплаву. Наведене є небезпечною аварійною ситуацією для умов металургійного виробництва.

Одним з шляхів уникнення такого явища є передчасна прогнозна оцінка особливостей геометричного формування реакційної зони взаємодії та глибини її проникнення у об'єми розплаву металу та співставлення її з відповідними розмірами робочого простору конвертерної ванни. На сьогодні існує багато інформації з питання утворення реакційної зони взаємодії за різних конструкцій верхніх фурм, конвертерів та способів, режимів продувки конвертерної ванни, але потрібно виділити основні типи її утворення. Окрім цього запропоновано багато рівнянь для розрахунку глибини проникнення реакційної зони взаємодії у розплав металу конвертеру. Однак відсутня систематизація та зведення цих рівнянь. Наявність такої сучасної інформації буде сприяти розвитку цього напрямку досліджень. Зведення та систематизація рівнянь поліпшить доступ до них для розробки відповідних методик

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За рахунок аналітичного узагальнення наукової інформації [1-28] встановлено, що одним з головних геометричних розмірів для реакційної зони взаємодії є L_{tzv} – глибина проникнення газового (кисневого) струменя, що витікає з сопла накопичника верхньої фурми до розплаву металу, котрий знаходиться у робочому просторі ванни конвертеру [2-19].

Від цього геометричного параметра у певній мірі залежить стабільність, ресурсо- та енергоефективність режиму продувки та глибина, до якої досягається найбільший нагрів залучених у цей процес шарів розплаву металу, температура яких може досягати кількох тисяч °С, що підтверджується у роботах [1-26].

Перші дослідження зі встановлення L_{tvz} проводились з використанням низькотемпературного фізичного моделювання, а вже з розвитком цього напрямку перейшли до високотемпературного фізичного моделювання. Вперше визначення глибини проникнення газового струменя в рідину було проведено І.Г. Казанцевим. У подальшому це питання у киснево-конвертерному виробництві опрацьовувалось рядом інших вчених-дослідників [2-6, 10, 12, 17, 18 20 22 25 26 27].

За даними проаналізованих матеріалів [1-27] для дослідження L_{tvz} взагалі переважно використовувалось низькотемпературне фізичне моделювання. Така тенденція зберігалася навіть із появою та розвитком у цьому напрямку високотемпературного фізичного моделювання. Пояснюється це тим, що проведення низькотемпературного фізичного моделювання набагато простіше у підготовці і реалізації. Відповідно до свідчень робіт [4, 11, 14, 17, 25, 27] для нього застосовували повітря у якості продувочного газу, що діяв на моделююче середовище (рідини звичайної й високої густини). Температура середовища здебільшого відповідала нормальним умовам, тобто від 20 до 30°C.

Високотемпературне фізичне моделювання набагато складніше за низькотемпературне для вивчення та дослідження L_{tvz} . Нажаль за ним представлено меншу кількість робіт з розглянутих [1-28]. Треба відзначити, що за високотемпературним фізичним моделюванням можливо досягти максимальної відповідності усіх умов до реального промислового процесу продувки розплаву у конвертерній ванні. Для цього переважно потрібно [2-27]:

1. Застосовувати масштабовані аналоги моделей, зроблених з промислових конвертерів та верхніх фурм із пропорційним збереженням усіх їх основних розмірів;
2. У якості середовища для моделювання використовувати розплави металу і шлаку з температурою до 1600°C;
3. Дотримуватись відповідності за складом хімічних елементів у всіх фазах розплаву, що використовується для моделювання, до промислових умов;
4. Для продувки використовувати технічно чистий кисень або інший передбачений промисловим технологічним режимом газ із дотриманням умов необхідного тиску, питомої інтенсивності продувки та загальної витрати.

З аналізу робіт [1-27] визначено, що для встановлення L_{rzv} – глибини проникнення реакційної зони взаємодії газового (кисневого) струменя у розплав, котрий знаходиться у робочому просторі ванни конвертера, у цих наукових літературних джерелах запропоновано велику кількість рівнянь. Треба відзначити, що переважна більшість рівнянь, наведених у цих роботах для розрахунку L_{rzv} , отримана за результатами обробки низькотемпературного фізичного моделювання, менша кількість рівнянь – на підставі результатів обробки високотемпературного фізичного моделювання.

Мета статті. Надати сучасне представлення основних типів геометричного формування реакційної зони взаємодії кисневих струменів з розплавом у кисневому конвертері. Створити систематизовані добірки рівнянь для визначення глибини проникнення цієї реакційної зони взаємодії до розплаву металу за способом фізичного моделювання, виконаного для їх отримання.

Постановка задач:

1. Провести аналітичне узагальнення наукової інформації з напрямку досліджень з утворення реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у об'ємі розплаву, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертера.

2. Охарактеризувати основні особливості типів геометричного формування реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів з розплавом у кисневому конвертері.

3. Систематизувати знайдені рівняння для визначення та розрахунку глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у об'ємі розплаву металу, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертера, відповідно до способу фізичного моделювання, що був використаний для їх отримання.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до наукових робіт [1-28] для продувки конвертерної ванни, навіть за традиційним LD-процесом, зазвичай на кожному виробництві застосовують свої конструкції багатосоплових верхніх фурм та дуттьові режими для їх роботи. Переважно ці фурми конструктивно відрізняються конфігурацією та будовою багатосоплового наконечника. Наконечник верхньої фурми головним чином відрізняється один від одного [28]: різною кількістю сопел; типом сопел; геометричними розмірами сопел та їх співвідношенням; кутом нахилу сопел до вертикальної осі фурми; взаємним розташуванням та групуванням сопел. За типом у наконечнику багатосоплової верхньої фурми можуть бути використані тільки надзвуківі (Лавалю), звукові (циліндричні, щілинні та ін.) та поєднання різних типів сопел.

Не зважаючи на велику кількість вище переліченого різноманіття конструктивних параметрів наконечника фурми та з урахування ще і варіацій можливих режимів роботи багатосоплової верхньої фурми, у будь-якому разі кожен газовий (кисневий) струмінь, що спрямований з сопла багатосоплового наконечника верхньої фурми та досягає поверхні розплаву, що знаходиться у робочому просторі ванни конвертера, діє на неї та викликає певний вплив. Цей вплив виражається у формуванні заглиблених ділянок у поверхню розплаву, що мають вхідну форму кратероподібних утворень, котрі характеризуються певними геометричними параметрами проникнення у шари об'єму розплаву. Основними параметрами формування реакційної зони взаємодії з розплавом є діаметр – D_{rzv} та глибина проникнення у розплав металу – L_{rzv} , це підтверджується і у роботах [2-6, 10, 12, 17, 18 20 22 25 26 27].

Відповідно до проведених наукових досліджень, досвіду високотемпературного моделювання та аналізу свідчень робіт [1-28] запропоновано, для сучасного представлення за типом геометричного формування, всього три основні характери утворення реакційної зони взаємодії (рис. 1) у кисневому конвертері за продувки через верхню фурму, навіть за різної конструкції багатосоплового наконечника та варіантів режиму продувки та роботи кисневого конвертера:

1. Роздільне утворення окремих незалежних реакційних зон взаємодії певних геометричних розмірів, кількість яких дорівнює кількості кисневих струменів, що безпосередньо діють на поверхню розплаву та проникають у глиб його шарів;

2. Згруповане утворення декількох об'єднаних незалежних реакційних зон взаємодії, що утворюються за рахунок об'єднання разом двох та більше одиночних реакційних зон, створених незалежними кисневими струменями;

3. Об'єднане утворення однієї суцільної реакційної зони взаємодії за рахунок злиття зовнішніх контурів усіх одиночних реакційних зон взаємодії, що сформовані незалежними кисневими струменями у єдину об'єднану реакційну зону взаємодії.

У третьому випадку, з утворенням єдиної об'єднаної реакційної зони взаємодії, загальний діаметр такої зони взаємодії – D_{rzv} враховується за зовнішньою межею спільного контуру цієї єдиної об'єднаної реакційної зони взаємодії. Більш детально про особливості формування D_{rzv} буде наведено у наступних роботах. Не зважаючи на три наведені різні типи особливостей утворення, формування та конфігурації реакційної зони взаємодії, у кожному з них одним з головних геометричних параметрів є глибина проникнення – L_{rzv} реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у розплав металу. Зазвичай у багатосоплової фурми передбачене рівномірне розподілення газу (кисню) між кожним соплом наконечника, що відносяться до одного типу. Окрім цього, найбільше проникнення у шари розплаву забезпечується надзвуковими кисневими струменями, що витікають із сопел типу Лавалю наконечнику багатосоплової фурми. У зв'язку з рівномірним розподіленням дуття та за однакового типу сопел, їх геометричних розмірів та конфігурації у наконечнику, глибина проникнення реакційної зони взаємодії – L_{rzv} може розглядатися приблизно відповідною як у випадку дії одного кисневого струменя, так і декількох однакових струменів. Вищенаведене потрібно враховувати у випадку використання рівнянь розрахунку глибини проникнення – L_{rzv} реакційної зони взаємодії, наведених у таблиці 1 та таблиці 2, що отримані на підставі аналізу наукових літературних джерел, у тому числі і [2-27].

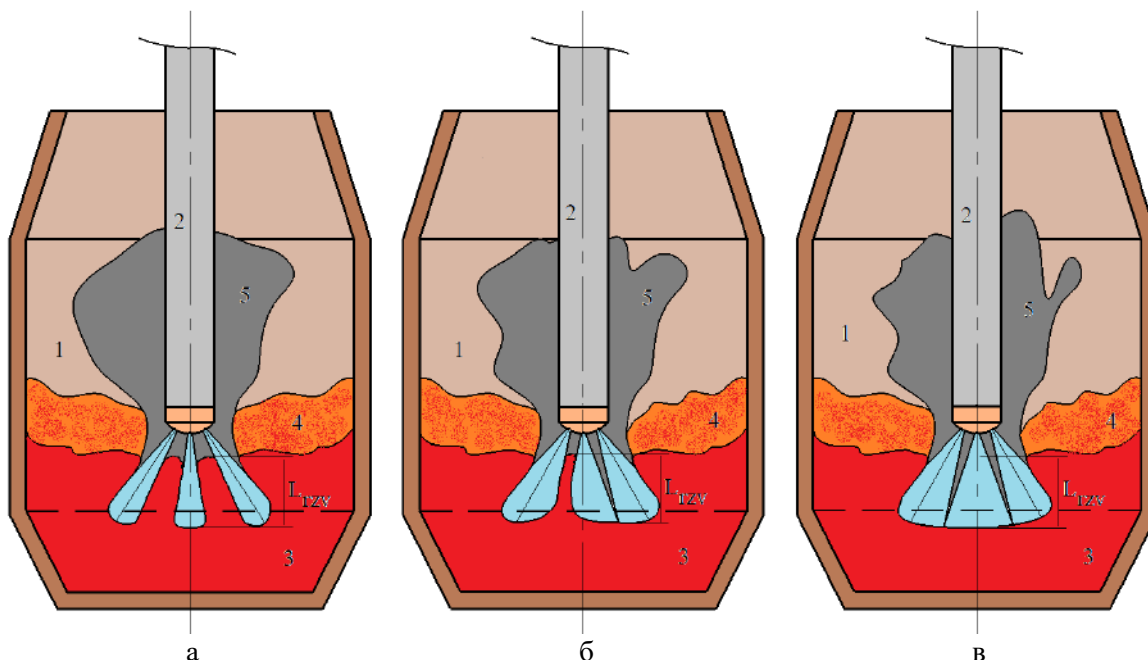


Рис. 1 – Схематичне зображення геометричного формування роздільної (а), згрупованої (б), об'єднаної (в) реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у розплав металу, котрий знаходиться у робочому просторі ванни конвертеру: 1 – конвертер; 2 – верхня фурма; 3 – розплав металу; 4 – розплав шлаку; 5 – вихідні газу

Представлені у роботі рівняння для визначення глибини проникнення – L_{rzv} реакційної зони взаємодії, що були знайдені під час обробки та аналізу результатів досліджень наукових літературних джерел [1-27], розділені на дві добірки відповідно до способу фізичного моделювання, що використовувалось для їх отримання. Таким чином у таблиці 1 наведено добірку рівнянь для визначення глибини проникнення L_{rzv} , котрі були отримані за рахунок обробки даних експериментів з низькотемпературного фізичного моделювання. У таблиці 2 – добірка рівнянь для визначення L_{rzv} , що отримані за рахунок обробки результатів високотемпературного фізичного моделювання. Наведені рівняння у таблиці 1 та таблиці 2 мають наступні основні умовні позначення: L_{rzv} – глибина проникнення газового (кисневого) струменя, що витікає з сопла наконечника верхньої фурми до розплаву, м; Ar – величина критерію Архімеда для критичного діаметра сопла (визначається за величиною імпульсу струменя); d_{vh} , d_{kr} , d – вихідний, критичний

та номінальний діаметр сопла Лавалю, m; h_f, h_f^{rob} – висота та робоча висота фурми під час продувки розплаву, m; β – стала, що характеризує процес інтенсивності змішування струміння з оточуючим середовищем вище та нижче рівня ванни; L_{rzv}^{max} – максимально можлива глибина проникнення струміння до розплаву, m; i – імпульс одиночного кисневого струменю, $kg \cdot m / s^2$; ρ_r, ρ_m – щільність рідини, що використовувалась під час моделювання та щільність металу, kg/m^3 .

З аналізу рівнянь, наведених у таблиці 1 та таблиці 2, встановлено, що визначення глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових струменів у розплав металу L_{rzv} тісно пов'язано з показниками діаметрів сопла d_{vyh}, d_{kr}, d , i – імпульсом одиночного кисневого струменю та показником висоти розташування фурми у ході продувки h_f , що може змінюватися від початкової висоти розташування h_f^{poch} до робочої h_f^{rob} залежно від проведення технологічних операцій.

Таблиця 1

Добірка рівнянь, встановлених з обробки результатів фізичного низькотемпературного моделювання. Рівняння для визначення глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових струменів у розплав металу

№ п/ф	Формули
I	II
1	$L_{rzv} (h_f + L_{rzv})^2 = \frac{2 \cdot m \cdot k}{\pi \cdot \rho_r} \cdot \frac{1,79 \cdot Q}{n} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_{kr}}{Q}\right)^{0,286}}$
2	$L_{rzv} = 40 \cdot \frac{p^{0,5} \cdot d^{0,6}}{\rho_r^{0,4} \left(1 + \frac{1}{40} \cdot \frac{h_f}{d}\right)}$
3	$L_{rzv} = Ar^{1/2} \cdot d \cdot \left(\frac{\beta \cdot d_0}{h_f}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{T_s}{T_0}\right)^{0,30} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_0}\right)^{0,25}$
4	$L_{rzv} = 1,87 \cdot (Ar)^{0,36} \cdot (w / w_{kr})^{0,28} \cdot d$
5	$L_{rzv} = 1,87 \cdot \left(\frac{\rho_g}{\rho_r \cdot g}\right)^{0,36} \cdot \frac{1}{0,28} \cdot w \cdot d^{0,64}$
6	$L_{rzv} = 1,32 \cdot d \cdot Ar^{0,36} \cdot \left(1,715 - 1,353 \cdot \frac{P_0}{P_1}\right)^{0,26}$
7	$L_{rzv} = 3,5 \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g}\right)^{1/3} \cdot e \cdot \left[-0,21 \cdot h_f \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g}\right)^{-1/3}\right]$
8	$L_{rzv} = \frac{d_x}{2} \cdot Ar_x, \text{ коли } Ar_x < 0,43; L_{rzv} = \frac{d_x}{2,86} \cdot Ar_x^{0,6}, \text{ коли } Ar_x > 0,43$
9	$L_{rzv} (L_{rzv} + h_f)^2 = 26,1 \cdot \frac{i}{\rho_r \cdot g}$
10	$L_{rzv} = 4,3 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{Q}{d}\right)^{2/3} \cdot e \cdot \left(-\frac{1,77 \cdot h_f}{4,3 \cdot 10^{-2} \cdot (Q \cdot d^{-1})^{2/3}}\right)$
11	$\frac{L_{rzv}}{h_f} = 4,8 \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g \cdot h_f^3}\right)^{0,6}$
12	$L_{rzv} = 0,81 \cdot d \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g \cdot d^3}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h_f}{d}\right)^{-0,18}, \text{ коли } \frac{h_f}{d} < 30$
13	$L_{rzv} = 2,7 \cdot d \cdot \left(\frac{i}{\rho_r \cdot g \cdot d^3}\right)^{0,56} \cdot \left(\frac{h_f}{d}\right)^{-0,54}, \text{ коли } \frac{h_f}{d} > 30$

Таблиця 2

Добірка рівнянь, встановлених з обробки результатів фізичного високотемпературного моделювання. Рівняння для визначення глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових струменів у розплав металу

№ п/ф	Формули
I	II
1	$L_{rzv} = 15 \cdot (q_1^{O_2})^{0,4}$;
2	$L_{rzv} \left[L_{rzv} + (h_f^{rob} - l_{st}) \right]^2 = 48,85 \cdot \left(\frac{i^1}{\rho_r \cdot g} \right)$
3	$L_{rzv}^{max} \left[L_{rzv}^{max} + (h_f^{rob} - l_{st}) \right]^2 = 83 \cdot (i^1 / \rho_r \cdot g)$
4	$L_{rzv} = 0,8 \cdot H_v$
5	$L_{rzv} = 0,99 \cdot (i)^{0,43}$, коли $h_{rob}^f = 0$
6	$L_{rzv} = Ar^{0,5} \cdot d_{kr} \cdot \left(\frac{\beta \cdot d_{kr}}{h_f^{rob}} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{T_{otoch}}{T_{vyh}} \right)^{0,3} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_0} \right)^{0,25}$
7	$L_{rzv} = 34,2 \cdot (P \cdot d_{kr}) / \sqrt{h_f^{rob}} + 3,81$

Наведені рівняння у таблиці 1 та таблиці 2 можуть рівноцінно використовуватись для визначення L_{rzv} – глибини проникнення реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у розплав металу, що знаходиться у робочому просторі ванни кисневого конвертера. Однак обрання певного рівняння з наведених для розрахунку L_{rzv} необхідно виконувати у відповідності до вихідних технологічних умов, для яких розглядається рівняння. Обране рівняння повинно максимально відповідати умовам, що дотримувались для його одержання, до вихідних технологічних умов, для яких воно розглядається. Загалом треба відзначити, що потрібно проведення подальших розрахункових та аналітичних досліджень у цьому напрямку для встановлення відповідності та доцільності наведених у таблиці 1 та таблиці 2 рівнянь до сучасних технологічних умов роботи кисневих конвертерів металургійних підприємств України.

Висновки

В Україні у киснево-конвертерному виробництві переважно використовується технологія верхньої продувки конвертерної ванни. Важливим явищем під час верхньої продувки конвертерної ванни є утворення реакційної зони взаємодії. Реакційна зона взаємодії формується у результаті проникнення та заглиблення газового (кисневого) струменя у шари розплаву, котрі знаходяться у робочому просторі ванни конвертера. У просторі та об'ємі реакційної зони взаємодії розвиваються основні гідрогазодинамічні, тепломасообмінні, екзотермічні процеси та досягається найвища температура розплаву.

Для сучасного представлення за особливостями геометричного формування у роботі запропоновано три основні характерні типи утворення реакційної зони взаємодії у кисневому конвертері за умови продувки через верхню фурму з багатосопловим наконечником різної конструкції та режимом продувки:

1. Роздільне утворення окремих незалежних реакційних зон взаємодії певних геометричних розмірів, кількість яких дорівнює кількості кисневих струменів, що безпосередньо діють на поверхню розплаву та проникають у глиб його шарів;

2. Згруповане утворення декількох об'єднаних незалежних реакційних зон взаємодії, що утворюються за рахунок об'єднання разом двох та більше одиночних реакційних зон, створених незалежними кисневими струменями;

3. Об'єднане утворення однієї суцільної реакційної зони взаємодії за рахунок злиття зовнішніх контурів усіх одиночних реакційних зон взаємодії, що сформовані незалежними кисневими струменями у єдину об'єднану реакційну зону взаємодії.

Незалежно від типу геометричного формування одним з головних параметрів є глибина проникнення L_{rzv} реакційної зони взаємодії газових (кисневих) струменів у шари розплаву металу. Представлені у роботі рівняння, для визначення глибини проникнення L_{rzv} реакційної зони взаємодії, проаналізовані та розділені на дві добірки відповідно до способу фізичного моделювання, що використовували для їх отримання. Потрібно проведення подальших розрахункових та аналітичних досліджень у цьому напрямку для встановлення відповідності та доцільності наведених у добірках рівнянь до сучасних технологічних умов роботи кисневих конвертерів металургійних підприємств України.

Перелік використаних джерел:

1. A physical modelling study to determine the influence of slag on the fluid flow in the AOD converter process / P. Ternstedt, P. Ni, N. Lundqvist, A. Tilliander, P.G. Jönsson. *Ironmaking and Steelmaking*. 2018. Vol. 45. № 10. Pp. 944-950. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1415012>.
2. Physical modeling of mass transfer between slag and metal in combined blown converter and application / X.-J. Yang, Q.-L. Zhou, Q. Zhang, J.-Y. Sun, L.-C. Zhong, Q. Li. *Iron and Steel*. 2022. Vol. 57. № 12. Pp. 57-65. DOI: <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288>.
3. Physical modelling of the effect of slag and top-blowing on mixing in the AOD process / T. Haas, V.-V. Visuri, A. Kärnä, E. Isohookana, P. Sulasalmi, R. Hürman Eric, H. Pfeifer, T. Fabritius. *Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016, Seattle, 22-25 May 2016*. Seattle, 2016. Pp. 999-1008. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_106.
4. Сталеплавильне виробництво: Навч. посібник / В.І. Баптизмаський та ін. Київ : ІЗМН, 1996. 400 с.
5. Physical simulation analysis of a 300 t duplex combined blown dephosphorization converter / C.-L. Zhao, C.-Y. Wang, Y.-H. Sun, Z. Wang, H.-J. Shen. *Journal of Iron and Steel Research*. 2015. Vol. 27. № 12. Pp. 42-47. DOI: <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20140412>.
6. Numerical and physical simulations of a combined top-bottom-side blown converter / Zhou X., Ersson M., Zhong L., Jönsson P.G. *Steel Research International*. 2015. Vol. 86. № 11. Pp. 1328-1338. DOI: <https://doi.org/10.1002/srin.201400376>.
7. Kovář L. Main design characteristics of lances for steelmaking furnaces. *METAL 2017: 26th International Conference on Metallurgy and Materials: conference proceedings, Brno, 24-26 May 2017*. Vol. 2017-January. Pp. 176-181.
8. Zhu M., Lou W., Wang W. Research Progress of Numerical Simulation in Steelmaking and Continuous Casting Processes. *Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica*. 2018. Vol. 54. № 2. Pp. 131-150. DOI: <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2017.00430>.
9. Physical simulation of converter steelmaking with powder injection / Tang B., Wang X., Zou Z., Yu A. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 2016. Vol. 55. № 1. Pp. 124-130. DOI: <https://doi.org/10.1080/00084433.2015.1122275>.
10. Physical simulation of bottom powder injection in combined blown converter / Tang B., He Y.-B., Zou Z.-S., Yu A.-B. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*. 2014. Vol. 35. № 2. Pp. 236-240. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-3026.2014.02.019>.
11. Research on the flow properties and erosion characteristics in combined blown converter at steelmaking temperature / Hu S., Zhu R., Liu R., Dong K. *International Symposium on CFD Modeling and Simulation in Materials Processing: conference proceedings, Phoenix, 11-15 March 2018*. Phoenix, 2018. Pp. 159-171. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72059-3_16.
12. Physical modeling of mass transfer between slag and metal in combined blown converter and application / Zhao H., Wang J., Liu F., Sohn H.Y. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022. Vol. 29. № 1. Pp. 70-77. DOI: <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288>.
13. Fault diagnosis of small sample of oxygen top-blowing converter based on PGAT model / J. Cao, Z.-Y. Chen, J.-H. Wang, D.-N. Jiang, Y.-J. Li. *Kongzhi yu Juece/Control and Decision*. 2023. Vol. 38. № 10. Pp. 2943-2952.
14. Cheslak F.R., Nickolls J.A., Sichel M. Cavities formed on liquid surface by impinging gaseous jets. *Journal of Fluid Mechanics*. 1969. Vol. 36. № 5. Pp. 55-63. DOI:

<https://doi.org/10.1017/S0022112069001509>.

15. Singha P., Shukla A.K. Dynamic basic oxygen steelmaking process and its industry validation. *JOM*. 2023. Vol. 75. № 9. Pp. 3890-3899. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-023-06003-1>.
16. Ishikawa H., Mizaguchi S., Segawa K. Studying on a model of O₂ of jet and emissions in the LD-converter. *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*. 1972. № 1. Pp. 76-84.
17. Modelling the process of oxidising impurities in a metal bath using coherent nozzles / Golub T., Molchanov L., Semykin S., Koveria A. *Acta Metallurgica Slovaca*. 2023. Vol. 29. № 2. Pp. 63-66. DOI: <https://doi.org/10.36547/ams.29.2.1733>.
18. Shimada M. The reactionary surface area of the partition during converter oxidation. *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*. 1971. № 12. Pp. 1764-1773.
19. Numerical study on interfacial structure and mixing characteristics in converter based on CLSVOF method / F. Qi, S. Zhou, L. Zhang, Z. Liu, Sh.C.P. Cheung, B. Li. *Metals*. 2023. Vol.13. № 5. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050880>.
20. Shimada M., Isibasi M., Ariessi T. About the features of the supersonic jet of oxygen in the LD-converter. *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*. 1966. № 9. Pp. 1499-1501.
21. Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter / G. Yang, B. Li, M. Sun, D. Qin, L. Zhong. *Metals*. 2023. Vol.13. № 5. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050940>.
22. Oxygen supply system based on oxygen lance nozzle wear in converter / M. Lü, S. Chen, Y. Hao, H. Guo, D. Li, Z. Zhang. *Kang T'ieh/Iron and Steel*. 2023. Vol. 58. № 8. Pp. 99-109. DOI: <https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20230084>.
23. Development and application of converter COMI-B technology: a new way of CO₂ utilization / Feng C., Dong J., Zhu R., Yang H. *Metals*. 2023. Vol. 13. № 5. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/met13050926>.
24. Numerical investigation of the enhanced stirring characteristics of a multi-lance top-blowing continuous converting furnace for lance arrangement and variable-velocity blowing / W. Li, Sh. Wang, J. Xu, J. Hu, H. Wang, Y. Zhai, Q. Xiao, G. Deng, D. Li. *Energies*. 2023. Vol. 16. № 5. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16052412>.
25. Golub T.S., Molchanov L.S., Semykin S. Studying the possibility of using coherent type nozzles for bof blowing at the gas dynamic simulation stand. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. № 4. Pp. 79-92. DOI: <https://doi.org/10.15407/scine19.04.079>.
26. Jet penetration and bath circulation in the basic oxygen furnace / Flinn R.A., Pehlke R.D., Glass D.R., Hays P.O. *Transactions Metallurg. Soc. AIME*. 1967. Vol. 239. № 11. Pp. 1776-1791.
27. Dong P.-Y., Zheng S.-G., Zhu M.-Y. Simulation and application of post-combustion oxygen lance in a top-blown converter. *Ironmaking and Steelmaking*. 2023. Vol. 50. № 1. Pp. 55-66. DOI: <https://doi.org/10.1080/03019233.2022.2083928>.
28. Yushkevich P. Comparison of calculatngs methods of the main parameters for single-tier tuyeres. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*. Ternopil : TNTU, 2020. Vol. 99. № 3. Pp. 112-123. DOI: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2020.03.

References:

1. P. Ternstedt, P. Ni, N. Lundqvist, A. Tilliander, and P.G. Jönsson, «A physical modelling study to determine the influence of slag on the fluid flow in the AOD converter process», *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 45, № 10, pp. 944-950, 2018. doi: [10.1080/03019233.2017.1415012](https://doi.org/10.1080/03019233.2017.1415012).
2. X.-J. Yang, Q.-L. Zhou, Q. Zhang, J.-Y. Sun, L.-C. Zhong, and Q. Li, «Physical modeling of mass transfer between slag and metal in combined blown converter and application», *Iron and Steel*, vol. 57, № 12, pp. 57-65, 2022. doi: [10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288](https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288).
3. T. Haas, V.-V. Visuri, A. Kärnä, E. Isohookana, P. Sulasalmi, R. Hürman Eriç, H. Pfeifer, and T. Fabritius, «Physical modelling of the effect of slag and top-blowing on mixing in the AOD process», in Proceedings of the 10th International Conference Advances in Molten Slags, Fluxes, and Salts, Seattle, 2016, pp. 999-1008. doi: [10.1007/978-3-319-48769-4_106](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48769-4_106).
4. V.I. Baptyzmanskyi et al., *Staleplavylne vyrobnytstvo: Navch. posibnyk* [Steelmaking: Study guide].

- Kyiv, Ukraine: IZMN Publ., 1996. (Ukr.)
5. C.-L. Zhao, C.-Y. Wang, Y.-H. Sun, Z. Wang, and H.-J. Shen, «Physical simulation analysis of a 300 t duplex combined blown dephosphorization converter», *Journal of Iron and Steel Research*, vol. 27, № 12, pp. 42-47, 2015. doi: **10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20140412**.
 6. X. Zhou, M. Ersson, L. Zhong, and P.G. Jönsson, «Numerical and physical simulations of a combined top-bottom-side blown converter», *Steel Research International*, vol. 86, № 11, pp. 1328-1338, 2015. doi: **10.1002/srin.201400376**.
 7. L. Kovář, «Main design characteristics of lances for steelmaking furnaces», in Proceedings 26th International Conference on Metallurgy and Materials METAL 2017, Brno, 2017, vol. 2017-January, pp. 176-181.
 8. M. Zhu, W. Lou, and W. Wang, «Research progress of numerical simulation in steelmaking and continuous casting processes», *Jinshu Xuebao/Acta Metallurgica Sinica*, vol. 54, № 2, pp. 131-150, 2018. doi: **10.11900/0412.1961.2017.00430**.
 9. B. Tang, X. Wang, Z. Zou, and A. Yu, «Physical simulation of converter steelmaking with powder injection», *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 55, № 1, pp. 124-130, 2016. doi: **10.1080/00084433.2015.1122275**.
 10. B. Tang, Y.-B. He, Z.-S. Zou, and A.-B. Yu, «Physical simulation of bottom powder injection in combined blown converter», *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, vol. 35, № 2, pp. 236-240, 2014. doi: **10.3969/j.issn.1005-3026.2014.02.019**.
 11. S. Hu, R. Zhu, R. Liu, and K. Dong, «Research on the flow properties and erosion characteristics in combined blown converter at steelmaking temperature», in Proceedings International Symposium on CFD Modeling and Simulation in Materials Processing, Phoenix, 2018, pp. 159-171. doi: **10.1007/978-3-319-72059-3_16**.
 12. H. Zhao, J. Wang, F. Liu, and H.Y. Sohn, «Physical modeling of mass transfer between slag and metal in combined blown converter and application», *International Journal of Minerals. Metallurgy and Materials*, vol. 29, № 1, pp. 70-77, 2022. doi: **10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20220288**.
 13. J. Cao, Z.-Y. Chen, J.-H. Wang, D.-N. Jiang, and Y.-J. Li, «Fault diagnosis of small sample of oxygen top-blowing converter based on PGAT model», *Kongzhi yu Juece/Control and Decision*, vol. 38, № 10, pp. 2943-2952, 2023.
 14. F.R. Cheslak, J.A. Nickolls, and M. Sichel, «Cavities formed on liquid surface by impinging gaseous jets», *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 36, № 5, pp. 55-63, 1969. doi: **10.1017/S0022112069001509**.
 15. P. Singha, and A.K. Shukla, «Dynamic basic oxygen steelmaking process and its industry validation», *JOM*, vol. 75, № 9, pp. 3890-3899, 2023. doi: **10.1007/s11837-023-06003-1**.
 16. H. Ishikawa, S. Mizaguchi, K. Segawa, «Studying on a model of O₂ of jet and emissions in the LD-converter», *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*, № 1, pp. 76-84, 1972.
 17. T. Golub, L. Molchanov, S. Semykin, and A. Koveria, «Modelling the process of oxidising impurities in a metal bath using coherent nozzles», *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 29, № 2, pp. 63-66, 2023. doi: **10.36547/ams.29.2.1733**.
 18. M. Shimada, «The reactionary surface area of the partition during converter oxidation», *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*, № 12, pp. 1764-1773, 1971.
 19. F. Qi, S. Zhou, L. Zhang, Z. Liu, Sh.C.P. Cheung, and B. Li. «Numerical study on interfacial structure and mixing characteristics in converter based on CLSVOF method», *Metals*, vol. 13, № 5, pp. 1-15, 2023. doi: **10.3390/met13050880**.
 20. M. Shimada, M. Isibasi, and T. Ariesi, «About the features of the supersonic jet of oxygen in the LD-converter», *Tetsu-to-hagane «Journal of the Iron and Steel Institute of Japan»*, № 9, pp. 1499-1501, 1966.
 21. G. Yang, B. Li, M. Sun, D. Qin, and L. Zhong, «Numerical simulation of the slag splashing process in a 120 ton top-blown converter», *Metals*, vol. 13, № 5, pp. 1-20, 2023. doi: **10.3390/met13050940**.
 22. M. Lü, S. Chen, Y. Hao, H. Guo, D. Li, and Z. Zhang, «Oxygen supply system based on oxygen lance nozzle wear in converter», *Kang T'ieh/Iron and Steel*, vol. 58, № 8, pp. 99-109, 2023. doi: **10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20230084**.
 23. C. Feng, J. Dong, R. Zhu, and H. Yang, «Development and application of converter COMI-B technology: a new way of CO₂ utilization», *Metals*, vol. 13, № 5, pp. 1-17, 2023. doi:

10.3390/met13050926.

24. W. Li, Sh. Wang, J. Xu, J. Hu, H. Wang, Y. Zhai, Q. Xiao, G. Deng, and D. Li, «Numerical investigation of the enhanced stirring characteristics of a multi-lance top-blowing continuous converting furnace for lance arrangement and variable-velocity blowing», *Energies*, vol. 16, № 5, pp. 1-17, 2023. doi: **10.3390/en16052412**.
25. T.S. Golub, L.S. Molchanov, and S. Semykin. «Studying the possibility of using coherent type nozzles for bof blowing at the gas dynamic simulation stand», *Science and Innovation*, vol. 19, № 4, pp. 79-92, 2023. doi: **10.15407/scine19.04.079**.
26. R.A. Flinn, R.D. Pehlke, D.R. Glass, and P.O. Hays, «Jet penetration and bath circulation in the basic oxygen furnace», *Transactions Metallurg. Soc. AIME*, vol. 239, № 11, pp. 1776-1791, 1967.
27. P.-Y. Dong, S.-G. Zheng, and M.-Y. Zhu, «Simulation and application of post-combustion oxygen lance in a top-blown converter», *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 50, № 1, pp. 55-66, 2023. doi: **10.1080/03019233.2022.2083928**.
28. P. Yushkevich, «Comparison of calculating methods of the main parameters for single-tier tuyeres», *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, vol. 99, № 3, pp. 112-123, 2020. doi: **10.33108/visnyk_tntu2020.03**.

Рецензент: В.Г. Кисляков

канд. техн. наук, зав. відділу, ІЧМ НАН України

Стаття надійшла 18.08.2023

Стаття прийнята 15.09.2023

УДК 669.184:519.22

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300058

© Asseel Mohammed Kadhim¹, Тарасюк Л.І.², Козловцев С.В.³,
Синельников В.О.⁴**ВПЛИВ НАГРІВУ ГАЗУ НА РОЗРАХУНКОВІ НАДЗВУКОВІ ПАРАМЕТРИ
СТРУМЕНЯ ГАЗОПОРОШКУ ПРИ ПРОДУВЦІ ШЛАКУ В КОНВЕРТЕРІ.
ПОВІДОМЛЕННЯ 1**

У статті показано, що одним із пріоритетніших завдань у технології виробництва сталі є підвищення довговічності футеровки кисневих конвертерів. Показано, що шлакодувка є радикальним способом підвищення довговічності футеровки кисневих конвертерів. При продувці розплаву киснем вміст MgO в шлаку становить 6-8%. Для підвищення хімічної спорідненості шлаку та футеровки пропонується продувка конвертерного шлаку азотом або газопорошковими струменями. Для досягнення оптимальної хімічної спорідненості футеровки і шлаку останній рекомендовано модифікувати з метою збільшення в ньому оксиду магнію. Показано, що спроба підвищити ефективність моделювання дуже складних процесів взаємодії надзвучових струменів з конвертерним шлаком ще не вирішена. Зроблено критичний аналіз існуючих методів розробок математичної моделі, що базується на використанні відомих газодинамічних співвідношень взаємодії вільних турбулентних струменів з розплавом. Встановлено, що в шлаковий розплав завжди потрапляють лише надзвучові струмені з характерною для них ударно-хвильовою структурою. Наведено інтегральний метод розрахунку параметрів газопорошкового потоку в надзвучовому соплі з

¹ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, leonid.47.tarasiuk@gmail.com³ директор з виробництва, Маріупольський металургійний завод №1 ім. Ілліча, м. Запоріжжя⁴ Ph.D., senior specialist, Łukasiewicz Research Network - Institute of Ceramics and Building Materials, Polska, ORCID: 0000-0001-8794-7798

урахуванням концентрації порошку. Встановлено, як нагрівання газової суспензії впливає на необхідний тиск перед сопловим блоком, швидкість і щільність потоку у вихідному перерізі надзвукового сопла.

Ключові слова: конвертер, газодисперсна течія, концентрація порошку, показник політропії, критична швидкість.

Asseel Mohammed Kadhim, L.I. Tarasiuk, S.V. Kozlovtssev, V.O. Sinelnikov. The influence of gas heating on the calculated supersonic parameters of gas-powder flow at slag blower in the converter. Message 1. The article shows that one of the priority tasks in steel production technology is to increase the durability of the lining of oxygen converters. It is shown that the slag blower is a radical way to increase the durability of the lining of oxygen converters. When blowing the melt with oxygen, the MgO content in the slag is 6-8%. To increase the chemical affinity of the slag and the lining, it is proposed to blow the converter slag with jets of nitrogen or powder gas. To achieve optimal chemical affinity of the lining and slag, it is recommended to modify the latter by increasing the content of magnesium oxide in it to 12-14%. Increased durability of the lining makes it possible to solve the problem of replacing wasteful wastes of coal slag and changing environmental concerns on the excess media. It is shown that an attempt to increase the efficiency of modeling very complex processes of interaction of supersonic jets with converter slag has not yet been solved a. A critical analysis of existing methods for constructing mathematical models based on the use of known gas-dynamic laws of interaction of free turbulent jets with the melt is carried out. It has been established that only supersonic jets with their characteristic shock-wave structure always enter the slag melt. An integral method for calculating the parameters of a gas-powder flow in a supersonic nozzle taking into account the powder concentration is presented. It is determined how heating of the gas suspension affects the required pressure in front of the nozzle block, the speed and flow density in the outlet section of the supersonic nozzle. The gas dynamics system is connected to the heat exchange of the flowing gas-dispersed mixture in the Laval expansion nozzles to establish the heating effect in front of the nozzle block of the two-phase gas suspension to a temperature that will ensure The increase in the fluidity of the gas flow is doubled and its kinetic energy is increased threefold. The method of expanding the parameters of the gas-powder flow between the Laval expansion nozzle involves the infusion of 10 physical effects into 14 parameters of the gas-powder flow. It is shown that numerical expansions allow the tuyere body to be used as a heat exchanger for heating the gas suspension, as well as for increasing the pressure of the gas-powder jet that flows from the nozzles.

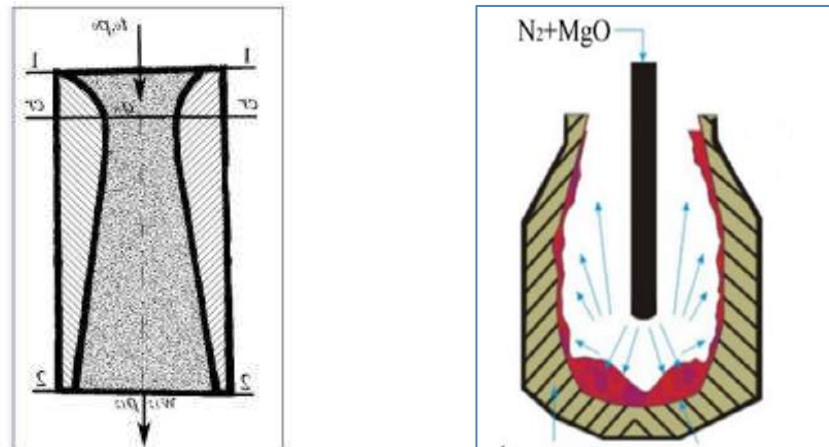
Key words: converter, gas-dispersed flow, powder concentration, polytropy indicator, critical speed.

Постановка проблеми. В даний час одним з важливих напрямів у сферах енерго- та ресурсозбереження киснево-конвертерних цехів є продовження терміну служби вогнетривкої футеровки конвертерів. Ця проблема вирішується двома способами: 1 – використанням високоякісних і дорогих вогнетривів; 2 – торкретуванням футеровки конвертерів з використанням модифікованого конвертерного шлаку.

У великотоннажних конвертерах товщина футеровки може досягати ≈ 900 мм, а її знос за одну плавку досягає 1 мм. Для перефутерування витрачається до 900 т дорогих периклазовуглецевих вогнетривів. Вартість такої операції становить ≈ 1 млн. \$, що значно збільшує собівартість сталі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найпріоритетніших завдань у технології виробництва сталі, що кардинально впливає на її собівартість, є підвищення довговічності футеровки кисневих конвертерів, яка на окремих металургійних підприємствах досягає лише 7 тис. плавок і менше. Вартість переробки 350 т кисневого конвертера становить $\sim 0,85$ млн \$ [1-3]. На великих металургійних заводах світу вже отримані інноваційні розробки та дивовижні результати – за рахунок видування шлаку (рис. 1) опір збільшено в кілька разів, а на окремих металургійних заводах ряду країн він збільшений до 40-55 тис. плавок [1]. Вміст MgO в шлаку після

продувки розплаву киснем становить 6-8 %. Для підвищення хімічної спорідненості шлаку та футеровки в роботах [4, 5] було запропоновано продувати шлак в конвертері не азотом, а газопорошковими струменями (рис. 1).



а – вихідна секція сопла

б – роздувка шлаку на футеровку

Рис. 1 – Схеми подачі газопорошкової суміші через розширювальне сопло Лаваля (а) і продування залишкового шлаку в порожнину кисневого конвертера (б) [8]

Ряд досліджень вчених різних країн показали, що для досягнення оптимальної хімічної спорідненості футеровки і шлаку конвертерний шлак необхідно модифікувати таким чином, щоб збільшити вміст оксиду магнію до 12-14 % [3, 6, 7].

Підвищення довговічності футеровки конвертерів може вирішити іншу, не менш важливу проблему – за рахунок зменшення шкідливих викидів і, перш за все, загального шлаку, зменшити екологічне навантаження на навколишнє середовище. Але як підвищити ефективність масштабної програми моделювання дуже складних процесів взаємодії надзвукових струменів із конвертерним шлаковим розплавом, розробити рекомендації щодо скорочення часу розробки проривних технологій і тим самим прискорити їх впровадження – ці завдання все ще не вирішено.

Недосконалість опублікованих раніше методів розрахунку полягає в тому, що майже у всіх випадках при визначенні проникнення струменів у розплав використовувалися відомі газодинамічні співвідношення взаємодії вільних турбулентних струменів з розплавом, але насправді це ніколи не відбувається в порожнині перетворювача. Як показано в роботах [4], у шлаковий розплав завжди потрапляють лише надзвукові струмені з характерною для них ударно-хвильовою структурою [5].

Мета дослідження – розв’язати систему рівнянь газодинаміки та теплообміну течії газодисперсної суміші в розширювальних соплах Лаваля для встановлення ефекту нагріву перед сопловим блоком двофазної газосуспензії до температури t_0 при змінній масовій концентрації μ від критичної швидкості a_{cr} , а також швидкості w_{12} , густини ρ_{12} газопорошкового потоку у вихідній секції сопла.

Виклад основного матеріалу.

Фізико-математична модель. У даній роботі для вирішення дуже складної задачі, в якій можна вивчити вплив ~ 10 фізичних ефектів на ~ 14 параметрів газодисперсного потоку, які важко розрахувати, використовується наступний підхід. У повідомленні 1 для одновимірної моделі (псевдогазу) описано методику розрахунку параметрів газопорошкового потоку в межах лише розширювального сопла Лаваля, а також методику та результати розрахунку газодинамічних параметрів надзвукових непроектних газопорошкових трифазних струменів в порожнині конвертера, які представлені в повідомленні 2.

Математична модель (2 повідомлення) включає ~ 50 рівнянь, які розв’язуються разом. У розрахунках використовувалися співвідношення, відомі з класичної газової динаміки [4-6], але

записані для складної газодисперсної течії. Ось деякі з них. У формі використано залежність між абсолютним тиском перед соплом p_o і температурою гальмування t_o :

$$p_o = \frac{m_1(1+\mu)\sqrt{R_1 T_o / (1+\mu\psi)}}{F_{кр}} \left(\sqrt{N \left(\frac{2}{N+1} \right)^{\frac{N+1}{N-1}}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де розраховувався індекс політропності пилогазового потоку

$$N = (k - 1) \cdot (1 - \varphi_1) + 1. \quad (2)$$

У рівнянні (2) поправочні коефіцієнти визначали за формулами

$$\varphi_1 = \frac{v - (1+b) \cdot \rho_o}{v - \frac{k-1}{k} (1+b) \cdot \rho_o}; \quad b = \frac{1-\psi}{1+\mu\psi^2} \cdot \frac{\mu}{\mu\psi^2}; \quad v = \left(1 + \mu \frac{c_2}{c_{p1}} \right) \frac{1+\mu\psi}{1+\mu\psi^2}. \quad (3)$$

Оскільки розміри сопла Лаваля $D_{кр}$ і D_1 задані, то, знаючи площі поперечного перерізу $F_{кр}$ і F_1 , легко визначити газодинамічну функцію масової витрати газової суспензії $q(\lambda_{12}) = F_{кр} / F_1$. Тоді з рівняння

$$q(\lambda_{12}) = \left(\frac{N+1}{2} \right)^{\frac{1}{N-1}} \lambda_{12} \left(1 - \frac{N-1}{N+1} (\lambda_{12}^2)^{\frac{1}{N-1}} \right). \quad (4)$$

на вихідній ділянці сопла знаходили відносну швидкість і число Маха сопла

$$M_{12} = \sqrt{\frac{2}{N+1} \lambda_{12}^2 / \left(1 - \frac{N-1}{N+1} (\lambda_{12}^2) \right)}. \quad (5)$$

Газодинамічну функцію тиску розраховували за формулою

$$\pi(\lambda_{12}) = \frac{p_r}{p_o} = \left(1 - \frac{N-1}{N+1} \lambda_{12}^2 \right)^{\frac{N}{N-1}}. \quad (6)$$

Тоді розрахунковий гальмівний тиск газопідвіски і щільність перед форсункою будуть дорівнювати:

$$\rho_{o12} = \frac{p_o(1+\mu\psi)}{R_1 T_o} : P_o = \frac{p_r}{\pi \cdot \lambda_{12}}. \quad (7)$$

Критична швидкість двофазного потоку в мінімальному перерізі сопла Лаваля розраховувалась як

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2N}{N+1} \cdot \frac{R_1 T_o}{1+\mu\psi}}. \quad (8)$$

Швидкість витікання газопорошкового струменя з розширювального сопла визначали за формулою

$$w_{12} = \sqrt{\frac{2N}{N-1} \cdot \frac{R_1 T_o}{1+\mu\psi} \left[1 - \left(\frac{p_r}{p_o} \right)^{\frac{N-1}{N}} \right]}. \quad (9)$$

Густину газопорошкової суспензії ρ_{12} у вихідному перерізі сопла Лаваля визначали як

$$\rho_{12} = \rho_o \varepsilon(\lambda_1) = \frac{p_o(1+\mu\psi)}{R_1 T_o} \left(1 - \frac{N-1}{N+1} \lambda_{12}^2 \right)^{1/N-1}. \quad (10)$$

У формулах (1)-(10) і наступних використовуються такі позначення: R_1 – газова стала азоту, кДж/(кг·К); $m_1 = \rho_n V_n$ – масова витрата газу-носія (азоту), кг/с; ρ_n, V_n – щільність азоту (кг/м³) і об'ємна витрата азоту (м³/хв) за нормальних фізичних умов; m_{12} – масова витрата газопорошкової суміші через сопло, кг/с; w_{12} – швидкість газосуспензії на виході з сопла, м/с; $\mu = m_2/m_1$ – масова концентрація порошку в газодисперсному потоці, кг/кг; $\psi = w_2/w_1$ – коефіцієнт ковзання фази для порошку. Індекси позначають параметри: 1 – газ-носії, 2 – частинки порошку, 12 – газова суспензія, G – в порожнині конвертера.

Вихідні дані. Потік газоподібного порошку азоту витікає з розширювального сопла Лаваля фурми кисневого конвертера. Температуру гальмування газосуспензії t_o (перед блоком сопел) змінювали в діапазоні 25°C-600°C, а концентрацію порошку в діапазоні $\mu = 0,2-2$ кг/кг. Витрату азоту через одне сопло прийняли рівним $V_n = 100$ м³/хв за умови, що діаметр сопла в критичному перерізі $D_{кр} = 32$ мм, а на вихідному перерізі $D_1 = 49$ мм; витрата порошку $m_2 = 37,5$ кг/хв (при $\mu = 0,3$ кг/кг). Щільність азоту за нормальних умов становить $\rho_n = 1,25$ кг/м³. Попередньо встановлювали тиск перед соплом $p_o = 1,25$ МПа, а потім його перевіряли.

Результати розрахунків та їх аналіз. Одним із важливих питань даного дослідження є вплив підвищення температури газосуспензії на тиск застою p_o двофазної течії при постійних

діаметрах критичної $D_{кр}$ та вихідної ділянок D_1 розширювального сопла ($D_{кр} = const, D_1 = const$) і витратою $V_n = const$, але зі зміною витрати m_2 твердої фази, тобто змінним значенням μ .

Як впливає з рис. 2, зі збільшенням температури t_0 тиску опору r_0 зростає при будь-якій концентрації μ порошку в газовій суспензії. Так, якщо $\mu = 1,4$ кг/кг, то підвищення температури газової суспензії від 100°C до 400°C і постійний потік фаз ($m_2 = const, V_n = const$) призводить до збільшення тиску p_0 від 1,43 МПа до 1,88 МПа. Це пояснюється тим, що, як впливає з рівняння (1), зі збільшенням t_0 і, відповідно, зменшенням густини ρ_0 при $F_{кр} = const$ і $V_n = const$ тиск p_0 також зростає. Видно, що при одній і тій же температурі, наприклад, $t_0 = 200^\circ\text{C}$, збільшення μ з 0,2 кг/кг до 2 кг/кг викликає необхідність підвищення тиску p_0 з 1,1 МПа до 1,78 МПа.

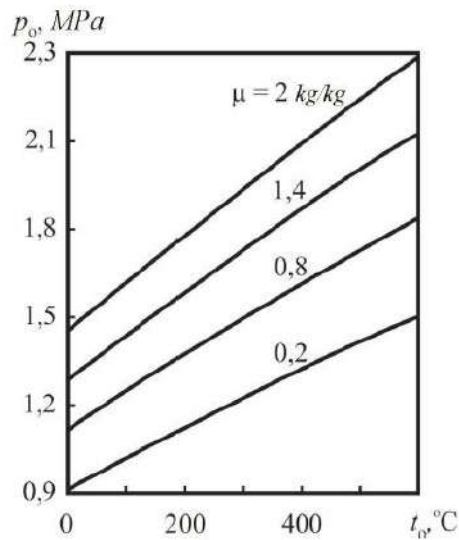


Рис. 2 – Залежність тиску p_0 перед соплом Лавалю від концентрації μ порошку при різних температурах гальмування t_0 . Вихідні дані $V_n = 100$ м³/хв; $D_{кр} = 32$ мм; $D_1 = 49$ мм; $m_2 = 25-250$ кг/хв, $\rho_2 = 1700$ кг/м³; $\psi = 0,8$

Температура t_0 газової суспензії має значний вплив на критичну швидкість a_{cr} під час течії всередині надзвукового сопла Лавалю (рис. 3).

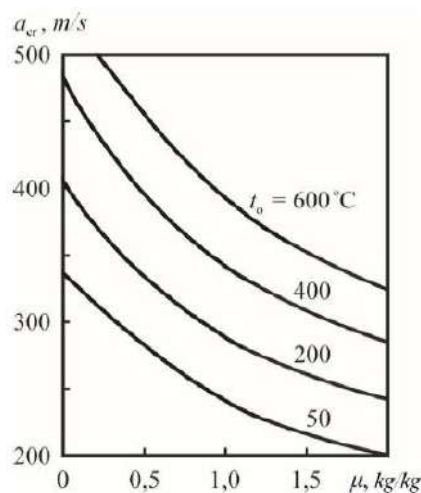


Рис. 3 – Вплив температури застою t_0 газосуспензії на зміну критичної швидкості a_{cr} в мінімальному перерізі сопла Лавалю при різних концентраціях μ порошку. Вихідні дані: $p_0 = 1,25$ МПа, $V_n = 100$ м³/хв, $\rho_n = 1,25$ кг/м³, $D_{cr} = 32$ мм, $D_1 = 49$ мм, $m_2 = 0-250$ кг/хв, $\rho_2 = 1700$ кг/м³

Наприклад, якщо концентрація порошку $\mu = 1 \text{ кг/м}^3$, то з підвищенням температури t_0 від 50°C до 600°C критична швидкість a_{cr} зростає з 240 м/с до 390 м/с . Також видно, що в заданих умовах зі збільшенням концентрації μ порошку в газовій суспензії критична швидкість a_{cr} зменшується. Наприклад, при температурі гальмування до 400°C і збільшенні μ від $0,25 \text{ кг/кг}$ до 2 кг/кг швидкість a_{cr} зменшується з 425 м/с до 285 м/с . Якщо $\mu = 0,5 \text{ кг/кг} = \text{const}$, то, наприклад, при підвищенні температури газової суспензії від 50°C до 600°C критична швидкість a_{cr} зростає в $\sim 1,6$ рази, від 286 м/с до 460 м/с .

Найбільш переконливо ефективність нагрівання газової суспензії перед сопловим блоком можна показати, аналізуючи результати впливу t_0 на швидкість w_{12} і густину ρ_{12} у вихідному перерізі сопла (рис. 4). Результати чисельних розрахунків показують, що при збільшенні температури t_0 , наприклад, від 50°C до 350°C і коефіцієнта $\psi = 0,8$, швидкість w_{12} витікання газосуспензії з сопла зростає від 570 м/с до 740 м/с (в $1,3$ рази). За тих же умов (t_0 зростає від 50°C до 350°C) густина газової суспензії ρ_{12} у вихідній секції сопла зменшується з $2,75 \text{ кг/м}^3$ до $2,1 \text{ кг/м}^3$.

Якщо при $t_0 = 350^\circ\text{C}$ коефіцієнт ψ зменшується від 1 до $0,6$, то швидкість w_{12} витікання газосуспензії з сопла зростає з 725 м/с до 765 м/с , оскільки дисипація енергії на прискорення частинок зменшується. За тих же умов ($t_0 = 350^\circ\text{C}$, ψ зменшується від 1 до $0,6$) щільність ρ_{12} газової суспензії зростає з $1,95 \text{ кг/м}^3$ до $2,24 \text{ кг/м}^3$.

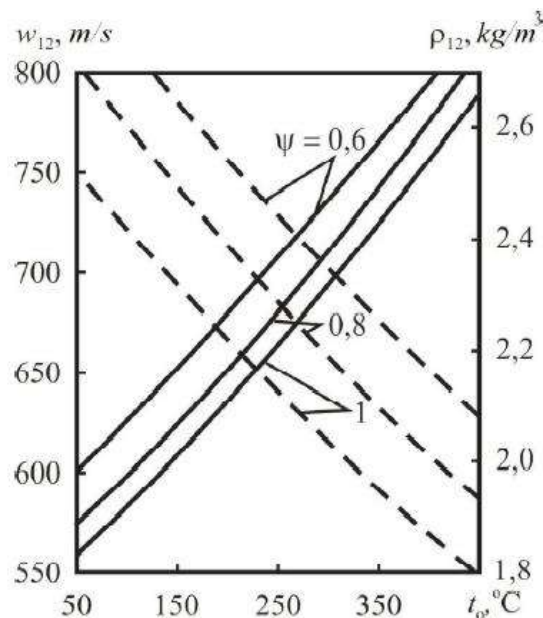


Рис. 4 – Залежність швидкості w_{12} (—) газопорошкового струменя у вихідній секції сопла Лавалю та густини ρ_{12} (- -) у цій же секції від температури застою t_0 газосуспензії перед сопловим блоком і коефіцієнт ковзання фази ψ . Вихідні дані: $p_0 = 1,25 \text{ МПа}$, $V_n = 100 \text{ м}^3/\text{хв}$, $D_{кр} = 32 \text{ мм}$, $D_1 = 49 \text{ мм}$, $\mu = 0,3 \text{ кг/кг}$, $\rho_2 = 1700 \text{ кг/м}^3$

Адекватність моделі – оскільки в порожнині перетворювача практично неможливо провести експерименти, які підтвердили б результати чисельних розрахунків, підтвердимо адекватність моделі отриманим методом окремого випадку. Отже, якщо:

– концентрація порошку $\mu = 0$, тоді в рівняннях (2) і (3) $b = 0$ і $v = 1$, $\psi_1 = 0$, $N = k$, де показник адиабати для потоку чистого газу (без часток)

$$k = c_p / c_v;$$

$t_0 = 400^\circ\text{C}$ швидкість $a_{cr} = 483 \text{ м/с}$ тощо, що підтверджує точність розрахунків (рис. 3);

– μ збільшується, струмінь стає важчим, а його наростаюча швидкість зменшується при будь-яких значеннях t_0 , що очевидно (рис. 3);

– коефіцієнт ковзання фази $= 1$, то відставання частинок відсутнє ($w_1 = w_2$), що призводить до дисипації енергії та зменшення швидкості газозавису w_{12} при будь-якому значенні t_0 , що підтверджено експериментально (рис. 4);

– зростає температура t_0 , потім зростає швидкість w_{12} , а при прискоренні потоку густина ρ_{12} завжди лише зменшується, що не викликає сумніву (рис. 4).

Представлена модель розрахунку надзвукового сопла дає можливість визначити параметри газопорошкового надзвукового струменя з урахуванням його ударно-хвильової структури, додавання газу та шлаку з порожнини конвертора. Це, що дуже важливо, дозволяє розрахувати як енергетичні характеристики пилогазового потоку – швидкість w_x , імпульс I_x , потужність N_x , в момент введення в нього шлаку, так і шляхи збільшення силового впливу на розплав, тому що в конвертері її потрібно підняти до $\sim 6-8$ м.

Врахування ряду факторів і фізичних впливів на параметри полідисперсного потоку, наприклад, таких як ковзання фази, форма частинок, що взаємодіють між собою і зі стінками каналів, дроблення, поява фрагментів, які фактично утворюють третю фазу, щільність частинок різних фракцій та інші, ускладнюють вирішення основної проблеми – визначення w_x , I_x , N_x , а також діаметра отвору D_x і глибини струменя h_x . Це є предметом окремого дослідження існуючої науково-технічної проблеми і в даній роботі не розглядається.

Висновки та рекомендації:

1. Ефективне використання енергії стиснених газів, радикальне скорочення викидів шлаків у навколишнє середовище є національною проблемою для найбільших металургійних центрів.

2. Вплив концентрації μ вогнетривкого порошку, нагрівання газосуспензії перед сопловим блоком фурми кисневого конвертера на температуру t_0 , коефіцієнта ковзання частинок порошку ψ на тиск p_0 в перед соплом, критична швидкість a_{cr} , швидкість газорозрядного витікання w_{12} , яка в подальшому враховується з урахуванням цих важливих факторів, дозволить розрахувати параметри надзвукового газопорошкового струменя в порожнині перетворювача.

3. Чисельні розрахунки показали, що використання корпусу фурми як теплообмінника, шляхом нагріву газової суспензії від 50°C до 400°C , дозволяє збільшити потужність газопорошкового струменя, що витікає з сопла, майже в 2 рази.

Перелік використаних джерел:

1. Sinelnikov V.O., Kalisz D. Influence of the FeO content on slag viscosity at his spraying. Increase the life of the refractory lining. *Glass and Ceramics*. 2016. Vol. 73. No. 3-4. Pp. 144-148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10717-016-9844-5>.
2. Sinelnikov V.O., Kalisz D., Kuzemko R.D. Study of the phase and mineralogical properties of converter slag during to improve lining resistance. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 59. No. 4. Pp. 403-409. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0244-y>.
3. Kalisz D., Sinelnikov V.O., Kuglin K. Investigation of the physicochemical properties of slag splashed on the lining of an oxygen converter. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 55. No. 5. Pp. 463-468. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0128-1>.
4. Power Increase of Supersonic Jets in Oxygen Converter / Sinelnikov V.O., Kalisz D., Żak P.L., Kuzemko R.D. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 461. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012078>.
5. Kharlashin P.S., Kuzemko R.D., Sinelnikov V.O. Influence of different factors and physical impacts on the power of flowing supersonic jet during slag spraying in the converter. *New developments in mining engineering: Taylor & Francis Group, A Balkema Book*. London. 2015. Pp. 597-602.
6. Sinelnikov V.O., Kalisz D., Kuzemko R.D. Influence of hydrodynamic and temperature conditions on the efficiency of the slag splashing method. *Journal of Machine Construction and Maintenance. Problemy Eksploatacji*. 2017. Vol. 105. № 2. Pp. 93-98.
7. Повышение стойкости футеровки конвертеров: огнеупоры, технологические приемы / Аксельрод Л.М., Лаптев А.П., Устинов В.А., Геращук Ю.Д. *Металл и литье Украины*. 2009. № 1-2. С. 9-15.
8. A Review of Slag Splashing / K.C. Mills, Y. Su, A.B. Fox, Z. Li, R.P. Thackray, H.T. Tsai. *ISIJ International*. 2005. Vol. 45. Iss. 5. Pp. 619-633. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.619>.

References:

1. V.O. Sinelnikov, and D. Kalisz, «Influence the FeO content on slag viscosity at his spraying. Increase the life of the refractory lining», *Glass and Ceramics*, vol. 73, no. 3-4, pp. 144-148, 2016. doi: [10.1007/s10717-016-9844-5](https://doi.org/10.1007/s10717-016-9844-5).
2. V.O. Sinelnikov, D. Kalisz, and R.D. Kuzemko, «Study of the phase and mineralogical properties of converter slag during to improve lining resistance», *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 59, no. 4, pp. 403-409, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0244-y>.
3. D. Kalisz, V.O. Sinelnikov, and K. Kuglin, «Investigation of the physicochemical properties of slag splashed on the lining of an oxygen converter», *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 55, no. 5, pp. 463-468, 2018. doi: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0128-1>.
4. V.O. Sinelnikov, D. Kalisz, P.L. Žak, and R.D. Kuzemko, «Power Increase of Supersonic Jets in Oxygen Converter», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 461, pp. 1-6, 2018. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012078>.
5. P.S. Kharlashin, R.D. Kuzemko, and V.O. Sinelnikov, *Influence of different factors and physical impacts on the power of flowing supersonic jet during slag spraying in the converter. New developments in mining engineering*. London, UK: Taylor & Francis Group, A Balkema Book Publ., 2015.
6. V.O. Sinelnikov, D. Kalisz, and R.D. Kuzemko, «Influence of hydrodynamic and temperature conditions on the efficiency of the slag splashing method», *Journal of Machine Construction and Maintenance. Problemy Eksploatacji*, vol. 105, № 2, pp. 93-98, 2017.
7. L.M. Akselrod, A.P. Laptev, V.A. Ustynov, and Yu.D. Herashchuk, «Povishenye stoikosty futerovky konverterov: ohneupori, tekhnolohycheskye pryemi» [«Increasing the durability of converter linings: refractories, technological methods»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 1-2, pp. 9-15, 2009. (Rus.)
8. K.C. Mills, Y. Su, A.B. Fox, Z. Li, R.P. Thackray, and H.T. Tsai, «A Review of Slag Splashing», *ISIJ International*, vol. 45, iss. 5, pp. 619-633, 2005. doi: [10.2355/isijinternational.45.619](https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.619).

Рецензент: В.О. Маслов,
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 08.09.2023
Стаття прийнята 13.10.2023

УДК 669.184:519.22

doi: [10.31498/2225-6733.47.2023.300059](https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300059)

© Asseel Mohammed Kadhim¹, Тарасюк Л.І.², Козловцев С.В.³,
Синельников В.О.⁴

ВПЛИВ НАГРІВУ ГАЗУ НА РОЗРАХУНКОВІ НАДЗВУКОВІ ПАРАМЕТРИ СТРУМЕНЯ ГАЗОПОРОШКУ ПРИ ПРОДУВЦІ ШЛАКУ В КОНВЕРТЕРІ. ПОВІДОМЛЕННЯ 2

В статті наведено результати чисельного моделювання взаємодії надзвукового нерозрахункового газопорошкового струменя з навколишнім сильно нагрітим середовищем порожнини конвертера, у тому числі з частинками шлаку, які викидаються струменем. Методика визначення глибини проникнення струменя у розплав є предметом багаторічних дискусій, але вона аналітично не вирішена. Запропоновано новий підхід до вирішення цієї проблеми, який полягає в тому, що в даній роботі

¹ аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, leonid.47.tarasiuk@gmail.com

³ директор з виробництва, Маріупольський металургійний завод №1 ім. Ілліча, м. Запоріжжя

⁴ Ph.D., senior specialist, Lukasiewicz Research Network – Institute of Ceramics and Building Materials, Polska, ORCID: 0000-0001-8794-7798

структура розглядається не за законами дозвукової турбулентної течії, а як надзвукова нерозрахункова. В даній роботі стоїть завдання – для підвищення стійкості шлакової корки в азот передбачено подачу порошку MgO , який в свою чергу потрапляє у струмінь, сповільнює його. Для вирішення цього питання запропоновано розв'язання багатопараметричних рівнянь для встановлення впливу нагріву на якісні характеристики шлакової корки на поверхні футеровки. Створена фізична модель, яка передбачає витікання газопорошкового струменя (N_2 + порошок) із сопла Лавалля. Встановлено формування за межами сопла струменю, що стає надзвуковим нерозрахунковим з ударною хвилею структурою. Найважливішою гідрогазодинамічною характеристикою газоструминного потоку є його імпульс, який залежить від ряду факторів і фізичних ефектів. Схема вирішення досить високотехнологічної задачі передбачає наступне: розрахунок параметрів газопорошкового потоку на виході із сопла; розрахунок кількості приєднаної газової маси з навколишнього середовища; температури; швидкості імпульсу; -потужності струменю і т.і. Встановлено, що в окремих випадках, коли забезпечується хімічний зв'язок між шлаком і футеровкою (коли має місце оптимальне значення MgO і CaO в шлаку), подачу вогнетривкового порошку можливо припинити і тоді шлак буде роздуватися тільки струменем азоту. Використовуючи закон сталості імпульсу в різних перерізах струменя (наприклад, у вихідному перерізі сопла і в фіксованому перерізі потоку xx), можливо розрахувати: повний імпульс, середньомасову швидкість азотно-порошкового струменя, середньомасову температуру струменя. Показано, що найбільш суттєво на потужність газопорошкового струменя, що витікає в розплав, впливає нагрівання газодисперсного потоку до температури t_0 перед фурменними соплами. Встановлено, що підвищення температури від $50^\circ C$ до $600^\circ C$ призводить до збільшення імпульсу майже у 2,75 рази. Спільне рішення майже 50 рівнянь (повідомлення 1 і 2) дозволяє наочно представити картину взаємодії надзвукового струменя з ударними хвилями і розплавом, а також розробити рекомендації щодо підвищення енергоефективності шлакодувної технології. Оскільки проведення експерименту в порожнині конвертера складно, результати чисельних розрахунків перевірені методом особливих випадків.

Ключові слова: конвертор, надзвуковий струмінь, розсіяний потік, реактивний імпульс, реактивна потужність.

Asseel Mohammed Kadhim, L.I. Tarasiuk, S.V. Kozlovtssev, V.O. Sinelnikov. The influence of gas heating on the calculated supersonic parameters of gas-powder flow at slag blower in the converter. Message 2. The article presents the results of numerical modeling of the interaction of a supersonic non-calculated gas-powder jet with the surrounding strongly heated environment of the converter cavity, including slag particles ejected by the jet. The method of determining the depth of penetration of the jet into the melt is the subject of many years of discussion, but it has not been solved analytically. A new approach to solving this problem is proposed, which consists in the fact that in this work the structure is considered not according to the laws of subsonic turbulent flow, but as supersonic, not calculated. In this paper, there is a task - to increase the stability of the slag crust, nitrogen supply of MgO powder is provided, which, in turn, enters the jet and slows it down. To solve this problem, the solution of many parametric equations is proposed to establish the effect of heating on the qualitative characteristics of the slag crust on the surface linings. A physical model has been created that predicts the outflow of a gas-powder jet (N_2 + powder) from a Laval nozzle. The formation outside the jet nozzle is established, which becomes a supersonic non-computational structure with a shock wave. The most important hydro-gas-dynamic characteristic of the gas jet flow is its momentum, which depends on a number of factors and physical effects. The scheme for solving a fairly high-tech problem involves the following: calculation of the parameters of the gas-powder flow at the exit from the nozzle; calculation of the amount of added gas mass from the environment; temperature: pulse speed; jet power, etc. It was established that in some cases, when a

chemical connection between the slag and the lining is ensured (when there is an optimal value of MgO and CaO in the slag), it is possible to stop the supply of refractory powder and then the slag will be inflated only with a nitrogen jet. Using the law of constancy of momentum in different cross-sections of the jet (for example, in the outlet cross-section of the nozzle and in the fixed cross-section of the XX stream), it is possible to calculate: total momentum, average mass velocity of the nitrogen-powder jet, average mass temperature of the jet. It is shown that the power of the gas-powder jet flowing into the melt is most significantly affected by the heating of the gas-dispersed flow to the temperature before the nozzles. It was established that an increase in temperature from 50°C to 600°C leads to an increase in momentum by almost 2.75 times. The joint solution of almost 50 equations (messages 1 and 2) makes it possible to visually present the picture of the interaction of the supersonic jet with shock waves and melt, as well as to develop recommendations for improving the energy efficiency of slag-blowing technology. Since conducting an experiment in the converter cavity is difficult, the results of numerical calculations are verified by the method of special cases.

Key words: converter, supersonic jet, scattered flow, reactive impulse, reactive power.

Постановка проблеми. Методика визначення глибини проникнення струменя в розплав є предметом багаторічних дискусій. Протягом багатьох років видатні вчені-металурги розробляли теорію взаємодії газових струменів з рідкою ванною. Вважалося, що струмінь проникає в рідину до тих пір, поки не буде досягнута рівновага між її динамічним тиском на дні отвору і статичним тиском стовпа розплаву, рівним глибині проникнення цього струменя в рідинну ванну. Однак до кінця це питання аналітично не вирішено. Потрібні нові методи розрахунку реальних струменів у порожнині конвертора. Новий підхід полягає в тому, що в даній роботі структура розглядалася не за законами дозвукової турбулентної течії, а вважалося, що всі реальні струмені, що витікають із сопел фурми в порожнину конвертора під високим тиском (1,2-1,8 МПа), завжди надзвукові нерозраховані. Ударно-хвильова структура струменя включає систему прямої та косої ударних хвиль, де відбувається значне падіння загального тиску та збільшення ентропії (рис. 1).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У даній дослідницькій роботі стоїть складне завдання – для підвищення міцності захисної шлакової кірки в азот перед фурмою необхідно додавати порошок MgO [1-6], а падаючі частинки шлаку знову потрапляють у струмінь і сповільняють їх. Тому газопорошковий надзвуковий нерозрахований струмінь також стає трифазним, що приєднує як газ порожнини конвертора зі значно змінюваною температурою, так і частинки шлаку [4, 7-10].

Необґрунтоване перенесення результатів досліджень взаємодії дозвукового турбулентного струменя з розплавом замість реально існуючого надзвукового струменя призводить до заниження імпульсу струменя у кілька разів [7-8].

Мета дослідження. Розв'язування системи багатопараметричних рівнянь для встановлення впливу нагріву до температури газової суспензії перед сопловим блоком фурм на середньомасові значення швидкості w_x , імпульсу I_x , потужності N_x надзвукового нерозрахованого струменя в порожнині кисневого конвертера для різних значень концентрації μ вогнетривкого порошку та коефіцієнтів ψ і ψ_s .

Виклад основного матеріалу.

Фізична модель. Газопорошковий струмінь (N_2 + порошок) витікає з сопла Лавалля фурми кисневого конвертера і проникає в шлаковий розплав. Як показали експериментальні дослідження, внаслідок постійного зниження тиску p_0 перед соплами (до 10 хв) струмінь, що витікає з надзвукового розширювального сопла постійного перерізу, обов'язково стає надзвуковою нерозрахованою з характерною для неї ударною хвилею структурою (рис. 1).

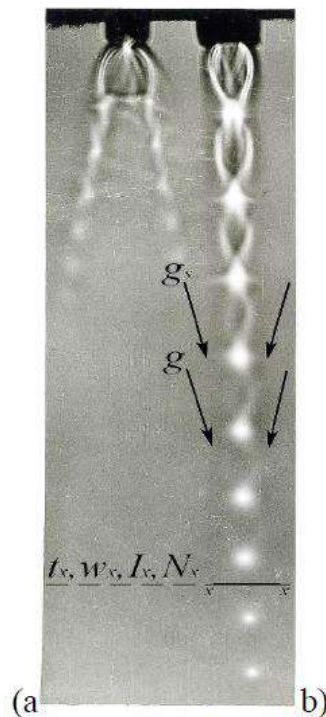


Рис. 1 – Тіньова картина витікання двох надзвукових струменів з хвильовою структурою та різним ступенем відхилення від n при однаковому тиску p_0 перед соплами, однаковій витраті повітря V_n , але з різною формою насадки: а) $n = 5,6$; б) $n = 1,7$

Крім того, чим більше перепад тиску на виході з сопла і в навколишньому середовищі, тим більші втрати хвилі в струмені за соплом. Так, при дисбалансі [7] в цьому режимі ударні хвилі є невід'ємною частиною надзвукового струменя [9-10]. У прямих і косих ударних хвилях цього нерозрахованого струменя виникають переломи траєкторії елементарних струменів, через що збільшується дисипація енергії струменя [7], внаслідок чого додавання газу з порожнини конвертора і імпульс струменя I_x суттєво залежать від ступеня нерозрахованого n , що враховано в розрахунковій моделі у цій статті.

Незважаючи на те, що недорозширений струмінь за вихідною ділянкою сопла продовжує прискорюватися, розширення за соплом завжди менш досконале, ніж всередині сопла, і неминуче супроводжується утворенням слабких і сильних ударних хвиль у вигляді звукових поверхней обертання з криволінійною твірною і бочкоподібною формою ядра струменя.

В окремих випадках, коли забезпечується хімічний зв'язок між шлаком і футеровкою [3-4] (вибрано оптимальне значення MgO і CaO в шлаку), подачу вогнетривкового порошку можна припинити і тоді шлак буде надуватися тільки струменем азоту. Ця модель дозволяє розрахувати взаємодію чистого (без порошку) надзвукового непроектного струменя з шлаковим розплавом, але з урахуванням додавання шлакових крапель.

Найважливішою гідрогазодинамічною характеристикою газоструминного потоку є його імпульс I_x , який залежить від ряду факторів і фізичних ефектів.

Математична модель. Найважливішою гідрогазодинамічною характеристикою газоструминного потоку є його імпульс I_x , який залежить від ряду факторів і фізичних ефектів. Використовуючи закон сталості імпульсу в різних перерізах струменя (наприклад, у вихідному перерізі сопла і в перерізі потоку x , $I_{12} = I_x = \text{const}$), запишемо вираз для повного імпульсу струменя, що витікає з сопла у формі

$$I_{12} = m_{12} + w_{12} + F_1(p_1 - p_2). \quad (1)$$

Тоді повний імпульс струменя в поперечному перерізі можна легко представити у вигляді

$$I_x = \rho_x \cdot V_x \cdot (1 + \mu \cdot \Psi) \cdot (1 + g + g_5) \cdot w_x. \quad (2)$$

Середньомасова швидкість азотно-порошкового струменя з урахуванням викиду азоту з порожнини конвертера та прикріпленого струменем шлаку розрахована на відстані від сопла [4]:

$$w_x = \left[w_{12} \cdot (1 + \mu \cdot \Psi) + \frac{P_g \cdot (n-1)}{\rho_{12} \cdot w_{12}} - \frac{F_x}{F_1} \cdot \frac{p_x - p_g}{\rho_{12} \cdot w_{12}} \right] \cdot \frac{1}{(1+\mu) \cdot (1+g+g_s) \cdot \beta^2} \quad (3)$$

де $g = m_g / m_{12} = m_g / (m_1 + m_2)$ – відносна приєднана маса газу до струменя;
 $g_s = m_s / m_{12} = m_s / (m_1 + m_2)$ – відносна маса шлаку.

Якщо тиск у потоці $p_x \rightarrow p_1$, що найчастіше буває, то рівняння (2) набуває більш простого вигляду [4]:

$$w_x = \left[w_{12} \cdot (1 + \mu \cdot \Psi) + \frac{P_g \cdot (n-1)}{\rho_{12} \cdot w_{12}} \right] \cdot \frac{1}{(1+\mu) \cdot (1+g+g_s) \cdot \beta^2} \quad (4)$$

З рівняння теплового балансу для перетину струменя від виходу сопла до перетину $x-x$ (нехтуючи випромінюванням) легко показати, що середньомасову температуру струменя можна розрахувати за формулою:

$$T_x = \frac{(C_{p12} \cdot T_{12} + \alpha_{12} \cdot \frac{w_{12}}{2} + g \cdot C_{px} \cdot T_g + g_s \cdot C_s \cdot T_s)}{(1+g+g_s) \cdot C_{pc}} - \alpha_x \cdot w_x^2 / 2. \quad (5)$$

Схема вирішення дуже високотехнологічної задачі була наступною: розраховувалися параметри газопорошкового потоку на виході з сопла (повідомлення 1), обчислювалася кількість приєднаної газової маси g з навколишнього середовища, а потім температура t_x , швидкість w_x , імпульс I_x і потужність N_x струменя на довільній ділянці $x-x$, враховано ряд факторів і фізичних впливів, таких як t_o , μ , ψ , ψ_s .

У формулах (1)-(5) використовуються такі позначення: R_1 – газова стала азоту кДж/(кг·К); $m_1 = \rho_n V_n$ – масова витрата газу-носія (азоту) кг/с; ρ_n , V_n – густина азоту (кг/м³) і витрата азоту (м³/хв) за нормальних фізичних умов; m_{12} , m_g , m_s – масові витрати відповідно газопорошкової суміші через сопло і газу, що викидається струменем із порожнини конвертера, а також шлаку, з'єднаного потоком, що витікає, кг/с; w_{12} , w_x – відповідно швидкість газосуспензії на виході з сопла та середньомасова швидкість комплексної течії на довільній ділянці $x-x$, м/с; $\mu = m_2/m_1$ – масова концентрація порошку в газодисперсному потоці, кг/кг; $\psi = w_2/w_1$ – коефіцієнт ковзання фази для порошку; $\psi_s = w_s/w_1$ – коефіцієнт, що характеризує відставання швидкостей частинок шлаку від швидкості носія g_s , $g = m_g/(m_1 + m_2)$ – приєднана маса шлаку і газу з порожнини конвертера в газопорошковий струмінь; C_{p12} , C_s , C_{px} – теплоємність газосуспензії, шлаку та середня теплоємність в перерізі $x-x$ струменя, кДж/(кг·К); T_{12} , T_g , T_s – температура газосуспензії у вихідному перерізі сопла, шлаку і газу, з'єднаних струменем з порожнини конвертера, К; α_{12} , α_x – коефіцієнт кінетичної енергії потоку у вихідній секції сопла та у довільній секції $x-x$ струменя.

Індекси позначають параметри: 1 – газ-носії, 2 – частинки порошку, 12 – газова суспензія, s – шлак, який нагнітається струменем, g – нагнітаний газ із порожнини конвертера, x – у довільній ділянці конвертера надзвуковий газопорошковий струмінь.

Значення приєднаної маси g азоту з порожнини конвертера x на відстані від виходу сопла знаходили, як і в [7]:

$$g = \frac{2 \cdot r_{max} \cdot \bar{x}}{D \cdot \sigma} \cdot C_i \cdot (1 - C_i^2)^{\frac{1}{22}} \cdot (I_{1R} - I_{2R}), \quad (6)$$

де r_{max} – відносний максимальний радіус першого ствола надзвукового нерозрахованого струменя:

$$r_{max} = \left(1 + \frac{\vartheta_o}{\psi_1} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

Ψ_1 – відома функція Прандтля-Майєра, яка була розрахована за формулою

$$\Psi_1 = \frac{1}{(M_i^2 - 1)^{1/2}} \cdot \frac{q(M_i)}{q(M_{12})}, \quad (8)$$

ϑ_o – кут нахилу границі струменя:

$$\vartheta_o = \omega(M_i) - \omega(M_1) + \alpha. \quad (9)$$

Комплекс розраховувався як

$$\omega(M_i) = \sqrt{\frac{N+1}{N-1}} \cdot \arctg \sqrt{\frac{(N-1)(M_i^2-1)}{(N+1)}} - \arctg \sqrt{M_i^2 - 1}. \quad (10)$$

Вихідні дані. Температуру гальмування газосуспензії t_0 (перед сопловим блоком) змінювали в діапазоні $25^{\circ}\text{C}-600^{\circ}\text{C}$, а концентрацію порошку в діапазоні $\mu = 0,2-2$ кг/кг. Абсолютний тиск і температуру газів (азоту) в порожнині конвертера і температуру шлаку прийняли $p_r = 0,1$ МПа, $t_r = 1300^{\circ}\text{C}$, а температуру шлаку $t_{ш} = 1500^{\circ}\text{C}$. С. Було прийнято, що густина шлаку $\rho_s = 3000$ кг/м³, теплоємність вогнетривкого порошку $C_2 = 0,65$ кДж/(кг·К), теплоємність азоту в середовищі (порожнині конвертера) $C_{pN_2} = 1,04$ кДж/(кг·К). Коефіцієнт імпульсу прийняли рівним $\beta = 1,2$, коефіцієнт ковзання фаз для порошку $\psi = w_2/w_1 = 0,7 \div 1$; для шлаку – $\psi_{ш} = w_{ш}/w_1 = 0,2 \div 0,9$, що лінійно зростає по довжині x . Витрату азоту через одне сопло приймали рівною $V_n = 210$ м³/хв за умови, що діаметр сопла в критичному $D_{кр} = 32$ мм, а у вихідному перерізі $D_1 = 49$ мм; витрата порошку $m_2 = 78,75$ кг/хв (при $\mu = 0,3$ кг/кг); густина азоту за нормальних умов $\rho_n = 1,25$ кг/м³. Тиск перед соплом попередньо встановлювали $p_0 = 1,25$ МПа, а потім перевіряли. Відносну довжину струменя в розрахунку прийняли $x = 30$ (крім рис. 4 і 5).

Результати розрахунків та їх аналіз. Силові характеристики течії на відстані x визначаються в першу чергу середньомасовими значеннями швидкості w_x , імпульсу I_x і потужності N_x струменя, що проникає в розплав. При взаємодії струменя з розплавом у порожнині конвертера одним із основних параметрів є середньомасова швидкість w_x .

Як впливає з рис. 2, чим вища температура t_0 газосуспензії перед соплом, тим більша відстань $x = 30$ для будь-якого коефіцієнта ковзання ψ_s шлаку і більше середньовагової швидкості w_x і температури t_x . Так, наприклад, якщо $\psi_s = 0,6$, температура t_0 зростає від 50°C до 600°C , потім швидкість w_x зростає від 320 м/с до 500 м/с, а температура t_x зростає від 560°C до 835°C . Збільшення швидкості w_x в $\sim 1,6$ рази дозволяє збільшити потужність N_x одного з п'яти фурменних струменів в $\sim 2,6$ рази. Видно, що потрапляння шлаку в струмінь сповільнює його (рис. 2). Збільшення ψ_s від 0,2 до 1 означає розгін шлакових частинок до струминної швидкості ($\psi_s = 1$) і, з цієї причини, розсіювання енергії. Так, якщо ψ_s зростає від 0,2 до 0,8, то, наприклад, при $t_0 = 400^{\circ}\text{C}$ швидкість w_x зменшується від 480 м/с до 425 м/с, а температура t_x зростає від 725°C до 765°C .

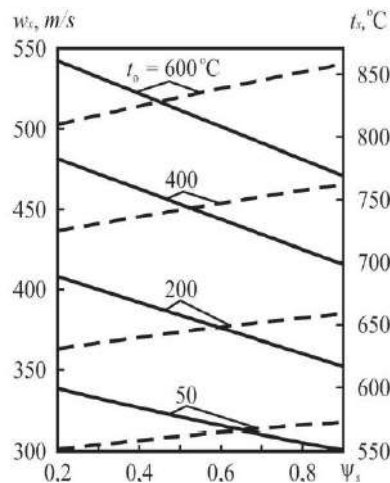


Рис. 2 – Залежність середньомасових значень швидкості w_x (—) і температури t_x (---) від коефіцієнта ковзання шлаку ψ_s при різних температурах гальмування t_0 . Вихідні дані: $t_g = 1300^{\circ}\text{C}$; $g_s = 0,2$; $\psi = 0,8$; $V_n = 100$ м³/хв; $D_{кр} = 32$ мм; $D_1 = 49$ мм; $m_2 = 37,5$ кг/хв; при $\mu = 0,3$ кг / кг $x = 30$

Однією з найважливіших характеристик силової дії є імпульс струменя I_x в момент його введення в шлаковий розплав. Цей параметр входить у всі розрахункові формули для визначення глибини залягання струменя h_x в шлаку. Чисельні розрахунки показали (рис. 3), що для будь-якої концентрації μ порошку в газосуспензії, чим вище його температура t_0 перед сопловим блоком, тим більший імпульс I_x . Так, наприклад, якщо концентрація $\mu = 2$ кг/кг, то підвищення t_0 від 100°C до 600°C дає можливість збільшити імпульс I_x струменя з 1,47 кН до 2,35 кН. За цих же умов густина ρ_{12} зменшується з 6,9 кг/м³ до 4,6 кг/м³.

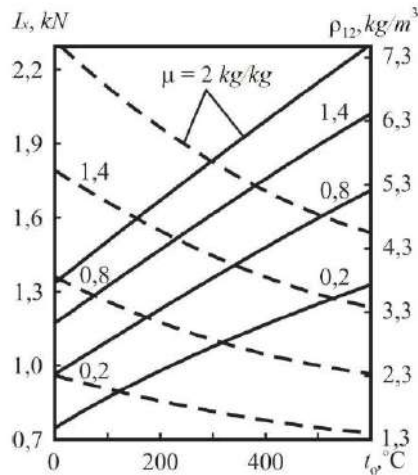


Рис. 3 – Вплив концентрації порошку μ на імпульс I_x (—) струменя в поперечному перерізі $x = 30$ та густину ρ_{12} (---) газопорошкової суміші у вихідній секції сопла Лавалю зі зміною температури гальмування t_0 . Вихідні дані: $t_g = 1500^\circ\text{C}$; $g_s = 0,3$; $\psi = 0,8$; $\psi_s = 0,8$; $V_n = 100 \text{ м}^3/\text{хв}$; $D_{кр} = 32 \text{ мм}$; $D_1 = 49 \text{ мм}$

З рис. 3 видно, що імпульс I_x також значно зростає зі збільшенням концентрації μ . Так, якщо $t_0 = 400^\circ\text{C}$, то збільшення μ від $0,2 \text{ кг/кг}$ до 2 кг/кг призводить до збільшення імпульсу I_x від $1,2 \text{ кН}$ до 2 кН , і за тих же умов густина ρ_{12} зростає від $1,5 \text{ кг/м}^3$ до $5,3 \text{ кг/м}^3$.

Найважливішою з них є температура гальмування t_0 (рис. 4). Чисельні розрахунки показали, що внаслідок зменшення середньої швидкості w_x по довжині імпульс I_x також зменшується при будь-якому t_0 . Наприклад, при $t_0 = 200^\circ\text{C}$ і зміні тривалості від 0 до 30 імпульс I_x зменшується від $1,6 \text{ кН}$ до $0,92 \text{ кН}$. Також видно, що $x = 25$ підвищення температури t_0 від 50°C до 600°C дозволяє збільшити імпульс I_x від $0,85 \text{ кН}$ до $1,5 \text{ кН}$. Що стосується середньомасової температури t_x , то враховуючи те, що зі збільшенням струменя викидається більш гарячий газ порожнини конвертора, його середньомасова температура t_x дещо підвищується. Якщо газопорошкову суміш нагріти до сопла до температури t_0 , то, наприклад, $x = 25$ збільшення t_0 від 50°C до 600°C призводить до підвищення температури t_x від 840°C до 1100°C .

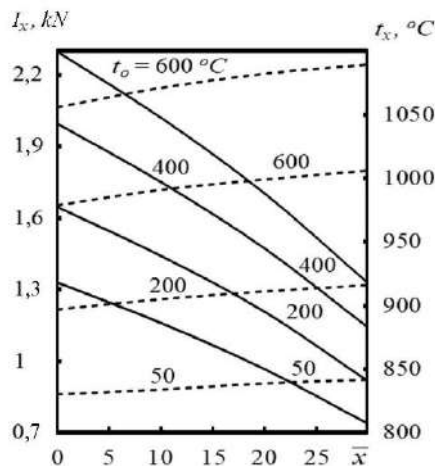


Рис. 4 – Вплив температури гальмування t_0 на середньомасовий імпульс I_x (-) і температуру t_x газопорошкового струменя на різних відстанях від виходу з сопла. Вихідні дані: $\mu = 0,3 \text{ кг/кг}$, $\psi = 0,8$, $\psi_s = 0,8$, $V_n = 100 \text{ м}^3/\text{хв}$, $D_{кр} = 32 \text{ мм}$, $D_1 = 49 \text{ мм}$, $m_2 = 37,5 \text{ кг/хв}$, $t_g = 1500^\circ\text{C}$, $\rho_n = 1,25 \text{ кг/м}^3$, $p_0 = 1,25 \text{ МПа}$

Найбільш суттєво на потужність N_x газопорошкового струменя, що втікає в розплав, впливає нагрівання газодисперсного потоку до температури t_0 перед фурменними соплами (рис. 5).

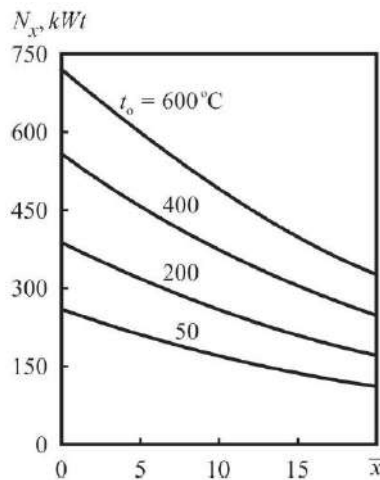


Рис. 5 – Залежність потужності N_x газопорошкового потоку від температури гальмування t_0 на різній відстані від зрізу сопла Лавалю. Вихідні дані: $r_0 = 1,25$ МПа, $V_n = 100$ м³/хв, $\rho_n = 1,25$ кг/м³, $m_2 = 37,5$ кг/хв (при $\mu = 0,3$ кг/кг), $D_{кр} = 32$ мм, $D1 = 49$ мм, $t_g = 1500^\circ\text{C}$, $\psi = 0,8$, $\psi_s = 0,8$

Видно, що на будь-якій відстані від виходу сопла зменшується потужність N_x , причому чим інтенсивніше, чим вище температура t_0 . Так, якщо $t_0 = 600^\circ\text{C}$, то на довжині $x = 20$ калібрів потужність N_x газопорошкового струменя зменшується від 720 кВт до 330 кВт, а якщо $t_0 = 50^\circ\text{C}$, то потужність N_x зменшується від 255 кВт ($x = 0$) до 100 кВт ($x = 20$).

Чисельні розрахунки показали, що чим далі від виходу сопла (більше), тим менше потужність N_x струменя при будь-якій температурі t_0 (рис. 5). Так, якщо газову суспензію перед сопловим блоком нагріти до температури $t_0 = 400^\circ\text{C}$, то при зміні від 0 до 20 калібрів потужність N_x струменя зменшується з 550 кВт до 250 кВт. Підвищення температури t_0 від 50°C до 600°C , наприклад, $x = 20$, призводить до збільшення потужності N_x від 120 кВт до 325 кВт (~ 2,75 рази).

Адекватність моделі. Оскільки провести експеримент в порожнині перетворювача складно, можна перевірити результати чисельних розрахунків, застосувавши метод особливих випадків. Отже, якщо:

- параметри потоку азоту (без порошку) розглядаються на виході з сопла, тоді $\mu = 0$, $x = 0$, $g = 0$, $g_s = 0$ вихід із сопла в розрахунковому режимі (тобто $n = 1$), то, як впливає з рівняння (3), швидкості $w_x = w_1$, що підтверджує правильність рішення при визначенні w_x ;

- якщо коефіцієнт ковзання $\psi_s \rightarrow 1$, то на прискорення частинок шлаку витрачається додаткова енергія і її середньомасова швидкість w_x зменшується при будь-якій температурі t_0 , що є закономірним (рис. 2);

- якщо концентрація порошку в газовій суспензії збільшується, то при будь-якій температурі t_0 імпульс I_x зростає, що не потребує доказів (рис. 3);

- підвищується температура газу t_0 , тоді зростає і швидкість w_x ; у зв'язку з цим при будь-якій концентрації μ імпульс I_x зростає (I_x), що не потребує експериментальної перевірки (рис. 2-4).

Висновки і рекомендації:

1. При розробці системи чисельного моделювання було враховано: вплив концентрації μ вогнетривкого порошку, нагрівання азоту перед фурмою до температури t_0 , величини прилипання газу g з порожнини конвертора, температури t_g газів із зовнішнього середовища, приєднаної маси g_s шлаку до нерозрахованого надзвукового струменя, а також коефіцієнт ковзання ψ частинок порошку відносно газа-носія, коефіцієнт ковзання частинок шлаку ψ_s до газу струменя тощо за параметрами в довільний поперечний переріз xx – температура t_x , коефіцієнт відхилення

від розрахунку n , імпульс I_x , потужність N_x , відповідно до яких розраховується глибина h_x розпилення шлаку і діаметр D_x входу струменя в розплав.

2. Спільне рішення ~ 50 рівнянь (повідомлення 1 і 2) дозволяє наочно представити картину взаємодії надзвукового струменя з ударними хвилями і розплавом, а також розробити рекомендації щодо підвищення енергоефективності шлакодувної технології.

3. Показано, що нагрівання газової суспензії до $t_0 = 600^\circ\text{C}$ дозволяє збільшити потужність струменя (з низькою концентрацією μ порошку) з 262 кВт до 723 кВт, тобто $\sim 2,8$ рази.

4. Суворо науковий підхід дозволяє на роки скоротити час впровадження проривних технологій. Розроблені пропозиції щодо інтенсифікації енергозбереження в металургії дають можливість отримати економічний ефект 1:100 - 1:200.

Перелік використаних джерел:

1. A Review of Slag Splashing / K.C. Mills, Y. Su, A.B. Fox, Z. Li, R.P. Thackray, H.T. Tsai. *ISIJ International*. 2005. Vol. 45. Iss. 5. Pp. 619-633. DOI: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.45.619>.
2. Kalisz D., Sinelnikov V.O., Kuglin K. Investigation of the physicochemical properties of slag splashed on the lining of an oxygen converter. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018. Vol. 55. No. 5. Pp. 463-468. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0128-1>.
3. Sinelnikov V.O., Kalisz D. Influence the FeO content on slag viscosity at his spraying. Increase the life of the refractory lining. *Glass and Ceramics*. 2016. Vol. 73. No. 3-4. Pp. 144-148. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10717-016-9844-5>.
4. Analysis of the flow of gas / powder mixture in the oxygen converter lance nozzles / Kuzemko R.D., Sinelnikov V.O., Mastykash V.V., Kalisz D. *Journal of Machine Constuction and Maintenance*. 2018. Vol. 108. No. 1. Pp. 111-117.
5. Повышение стойкости футеровки конвертеров: огнеупоры, технологические приемы / Аксельрод Л.М., Лаптев А.П., Устинов В.А., Герашук Ю.Д. *Металл и литье Украины*. 2009. № 1-2. С. 9-15.
6. Sinelnikov V.O., Kalisz D. Modeling viscosity of converter slag. *Archives of foundry engineering*. 2015. Vol. 15. No. 4. Pp. 119-124.
7. Kharlashin P.S., Kuzemko R.D., Sinelnikov V.O. Influence of different factors and physical impacts on the power of flowing supersonic jet during slag spraying in the converter. *New developments in mining engineering*: Taylor & Francis Group, A Balkema Book. London, 2015. Pp. 597-602.
8. Supersonic Jets Injected into Converter Slag / E.V. Protopopov, R.F. Kalimullin, A.G. Chernyatevich, P.S. Kharlashin, N.A. Chernysheva. *Steel in Translation*. 2012. Vol. 42. No. 10. Pp. 711-715. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091212100142>.
9. Adding slag to a supersonic jet in an oxygen converter / Kharlashin P.S., Kuzemko R.D., Protopopov E.V., Feyler S. *Steel in Translation*. 2014. Vol. 45. No. 2. Pp. 100-104. DOI: <https://doi.org/10.3103/S0967091215020084>.
10. Power Increase of Supersonic Jets in Oxygen Converter / Sinelnikov V.O., Kalisz D., Žak P.L., Kuzemko R.D. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 461. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/461/1/012078>.

References:

1. K.C. Mills, Y. Su, A.B. Fox, Z. Li, R.P. Thackray, and H.T. Tsai, «A Review of Slag Splashing», *ISIJ International*, vol. 45, iss. 5, pp. 619-633, 2005. doi: 10.2355/isijinternational.45.619.
2. D. Kalisz, V.O. Sinelnikov, and K. Kuglin, «Investigation of the physicochemical properties of slag splashed on the lining of an oxygen converter», *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 55, no. 5, pp. 463-468, 2018. doi: 10.1007/s11148-018-0128-1.
3. V.O. Sinelnikov, and D. Kalisz, «Influence the FeO content on slag viscosity at his spraying. Increase the life of the refractory lining», *Glass and Ceramics*, vol. 73, no. 3-4, pp. 144-148, 2016. doi: 10.1007/s10717-016-9844-5.
4. R.D. Kuzemko, V.O. Sinelnikov, V.V. Mastykash, and D. Kalisz, «Analysis of the flow of gas / powder mixture in the oxygen converter lance nozzles», *Journal of Machine Constuction and Maintenance*, vol. 108, no. 1, pp. 111-117, 2018.

5. L.M. Akselrod, A.P. Laptev, V.A. Ustynov, and Yu.D. Herashchuk, «Povishenye stoikosty futerovky konverterov: ohneupori, tekhnolohycheskye pryemi» [«Increasing the durability of converter linings: refractories, technological methods»], *Metall y lyte Ukrayni – Metal and Casting of Ukraine*, № 1-2, pp. 9-15, 2009. (Rus.)
6. V.O. Sinelnikov, and D. Kalisz, «Modeling viscosity of converter slag», *Archives of foundry engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 119-124, 2015.
7. P.S. Kharlashin, R.D. Kuzemko, and V.O. Sinelnikov, *Influence of different factors and physical impacts on the power of flowing supersonic jet during slag spraying in the converter. New developments in mining engineering*. London: Taylor & Francis Group, A Balkema Book Publ., 2015.
8. E.V. Protopopov, R.F. Kalimullin, A.G. Chernyatevich, P.S. Kharlashin, and N.A. Chernysheva, «Supersonic Jets Injected into Converter Slag», *Steel in Translation*, vol. 42, no. 10, pp. 711-715, 2012. doi: 10.3103/s0967091212100142.
9. P.S. Kharlashin, R.D. Kuzemko, E.V. Protopopov, and S. Feyler, «Adding slag to a supersonic jet in an oxygen converter», *Steel in Translation*, vol. 45, no. 2, pp. 100-104, 2014. doi: 10.3103/s0967091215020084.
10. V.O. Sinelnikov, D. Kalisz, P.L. Žak, and R.D. Kuzemko, «Power Increase of Supersonic Jets in Oxygen Converter», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 461, pp. 1-6, 2018. doi: 10.1088/1757-899x/461/1/012078.

Рецензент: В.О. Маслов,
д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 13.02.2023

Стаття прийнята 02.04.2023

УДК 621.774.2

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300060

© Григоренко В.У.¹, Овсяников В.В.²

РОЗВИТОК МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМУВАННЯ І ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ МЕТАЛУ У ВИРОБНИЦТВІ ПРЯМОШОВНИХ ТРУБ ВЕЛИКИХ ДІАМЕТРІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКСПАНДУВАННЯ

З 2020 року в Україні ТОВ НВП «УКРТРУБОІЗОЛ» почало експлуатувати технологічну лінію виробництва труб великого діаметру (ТВД) для магістральних нафто- і газопроводів з гідромеханічним експандером. З 2023 року в Україні припинили дію міждержавні стандарти ГОСТ 20295-85 та ГОСТ 10706-76. Постановка проблеми. Потрібні українські стандарти. Потрібно визначення раціональних значень деформації та ефективності експандування зі зниження залишкових напружень в метали труб. Ціль. Розробка українських стандартів з виробництва ТВД та визначення впливу експандування на залишкові напруження. Методика. Застосований метод розрізання кілець. Результати. Розроблено та введено в дію за участю автора – ДСТУ 9219:2023; ДСТУ 9218:2023 та ТУ 24.2-05757883-095:2022. Досліджені труби діаметром 630 мм, зі стінкою 8 мм, зі сталі S335 та з гарячекатаного рулонного листа. Розкриття між повздовжніми кромками трубної заготовки після гібки становило 70-80 мм. Для кільця після зварки розкриття склало 180 мм, а для кільця експандованих на 0,8 %, 1,2 % та 0,4 % -58-53 мм. Це вказує на те, що залишкові напруження

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

² аспірант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8458-176X, vitaliy.ovsyaniuk29@gmail.com

після експандування були значно меншими ніж у трубі після зварки шва, а величина зміни експандування від 0,4% до 1,2% не дає впливу на залишкові напруження. Наукова новизна. Вперше для JCOE-технології виробництва ТВД з рулонного гарячекатаного листа визначили експериментально вплив експандування на залишкові напруження. Показано, що розкриття кілець при експандуванні суттєво зменшуються. Вперше для JCOE-технології виробництва ТВД визначили вплив величини експандування на зниження залишкових напружень. Показано, що деформації 0,4-1,2% дають однакове розкриття кілець після експандування. Практична значимість. Отримані результати можуть бути корисними для персоналу підприємств з виробництва сталевих зварних ТВД та проектних організацій при проектуванні нафтогазопроводів.

Ключові слова: зварні труби великого діаметру, формування, зварювання, експандування, залишкові напруження, деформації.

V.U. Hryhorenko, V.V. Ovsianykov. Development of the method for determining the deformation parameters and residual stresses of metal in the manufacture of straight-seamed pipes of large diameter using expansion. Since 2020, in Ukraine, LLC NVP «UKRTRUBOIZOL» began to operate a technological line for the production of large-diameter pipes (TVD) for main oil and gas pipelines with a hydromechanical expander. From 2023, interstate GOST 20295-85 and GOST 10706-76 ceased to be valid in Ukraine. Formulation of the problem. Ukrainian standards are needed. It is necessary to determine the rational values of the deformations and the effectiveness of the expansion to reduce the residual stresses in the metal of the pipes. Goal. Development of Ukrainian standards for TVD production and determination of the effect of expansion on residual stresses. Method. The method of cutting rings was used. The results. Developed and implemented with the participation of author: DSTU 9219:2023; DSTU 9218:2023 and TU 24.2-05757883-095:2022. Pipes with a diameter of 630 mm, with a wall of 8 mm, made of S335 steel and hot-rolled rolled sheet were studied. The opening between the longitudinal edges of the pipe blank after bending was 70-80 mm. For the ring after welding, the opening was 180 mm and for the rings expanded by 0.8%, 1.2% and 0.4% -58-53 mm. This indicates that the residual expansion stresses were much smaller than in the pipe after welding the seam, and the amount of expansion change from 0.4% to 1.2% does not affect the residual stresses. Scientific novelty. For the first time, for the JCOE technology of production of TVD from rolled hot-rolled sheet, the influence of expansion on residual stresses was determined experimentally. It was shown that the opening of the rings during expansion is significantly reduced. For the first time, the influence of the amount of expansion on the reduction of residual stresses was determined for the JCOE technology of TVD production. It is shown that deformations of 0.4-1.2% give the same opening of the rings after expansion. Practical significance. The obtained results can be useful for the personnel of steel welded TVD production enterprises and project organizations in the design of oil and gas pipelines.

Key words: large-diameter welded pipes, forming, welding, expansion, residual stresses, deformations.

Постановка проблеми. З 2014 року перестав працювати Харцизький трубний завод. Виробничі потужності цього заводу забезпечували можливість виробляти більше 600000 тон зварних прямошовних труб великого діаметра у рік.

У 2019-2020 рр. труби великого діаметра в Україні у числі інших підприємств почало виробляти підприємство «УКРТРУБОІЗОЛ». На цьому заводі працює з 2020 р. нова сучасна лінія (JCOE-процес). Ця лінія дозволяє виробляти труби з зовнішнім діаметром 406,4-1422 мм. Технологія виробництва має повний сучасний цикл виробництва труб великого діаметру для магістральних нафто- і газопроводів включно з гідромеханічним експандером [1].

Лінія включає [2]:

- Пресове покровоке деформування;

- Диформовку повздовжніх кромки на диформовочній машині;
- Зборку труби з застосування суцільного технологічного зварного шва по всій довжині труби;
- Багатодугове зварювання повздовжніх робочих швів під шаром флюсу з зовнішньої та з внутрішньої поверхні труб з повним перекриттям технологічного шва;
- Калібрування діаметра з одночасним експандуванням покровою вздовж всієї труби на гідромеханічному експандері (рис 1, та рис 2).



Рис. 1 – Загальний вигляд експандера

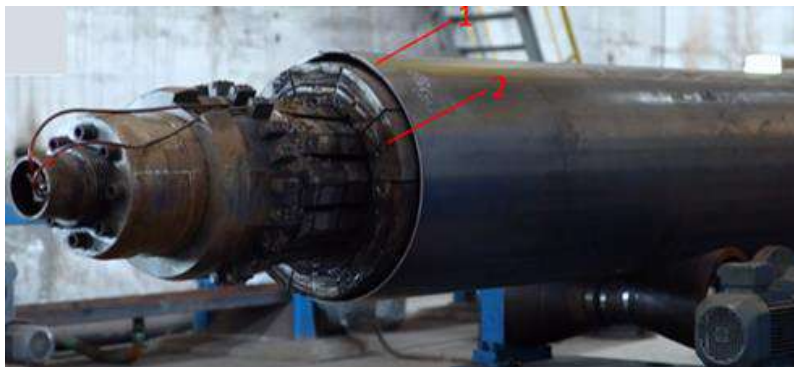


Рис. 2 – Передній кінець труби та головка експандера: 1 – передній кінець труби; 2 – робочий інструмент голови експандера

З 01.07.2023 на території України припинили свою дію міждержавні стандарти ГОСТ 20295-85 та ГОСТ 10706-76 і відповідно з'явилась потреба у розробці українських стандартів та технічних умов, де чітко повинні були вказані параметри деформування в експандері. Наявність експандування поставила питання раціональних значень деформацій збільшення діаметру звареної труби. З'явилися також питання з ефективності експандування з точки зору зниження залишкових напружень в металі труб.

У пункті 8.9 ДСТУ ISO 3183:2017 і API Spec 5L зазначено, що якщо труба не піддається подальшій нормалізації, загартуванню та відпуску або подальшій термообробці, або подальшому зняттю напружень, то для зняття напружень має бути проведено експандування. При цьому відносне збільшення діаметра труби (коефіцієнт s_x) повинно бути в межах від 0,003 до 0,015 [2].

У додатковій специфікації IOGP S-616 версія 2.0 від 2022 р. до API Spec 5L та ISO 3183 за програмою спільного промислового проекту 33 (JP 33) організовано стандартизацію специфікацій обладнання для закупівель IOGP за підтримки Всесвітнього економічного форуму (WEF) та надано роз'яснення до п. 8.9 API Spec 5L та ISO 3183 до труб типу SAWL – Труба з одним або двома поздовжніми швами, що отримані способом дугового зварювання під флюсом:

- «Неекспандовані труби SAWL повинні мати термічну обробку всього корпусу».

А у Специфікації IOGP S-616 версія 1.0 від 2019 р. у примітці до пункту 8.9.2 API Spec 5L відмічене:

- «Холодне розширення від 0,8 % до 1,2 % виявилось ефективним для контролю розмірів і круглості труб допусків на розміри та округлість труб, а також для мінімізації залишкових напружень, що виникають при формуванні та зварюванні труб».

Але стоїть задача визначення експериментально співвідношень і величин залишкових напружень в металі труби після формовки листа в трубу, після зварки шва та після експандування.

Потрібно також визначили вплив значення деформацій зі збільшення діаметру звареної труби при експандуванні на зменшення залишкових напружень опесередковано при експандуванні.

Таким чином потрібно вирішувати проблеми зі створення нових українських ДСТУ та технічних умов (ТУ) для забезпечення відповідності іноземним стандартам та з визначення експериментально співвідношень та величин залишкових напружень після формовки листа в трубу (після зварки шва та експандування).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електрозварні труби великих діаметрів в Україні в основному виробляли та виробляють за наступними стандартами:

1. ДСТУ ISO 3183:2017 «Нафтова та газова промисловість. Труби сталеві для трубопроводних транспортних систем»;
2. API Specification 5L «Line Pipe, Forty-Sixth Edition»;
3. СНиП 2.05.06-85. «Магістральні трубопроводи»;
4. ДСТУ EN 10217-5:2015 (EN 10217-5:2002, IDT) «Труби сталеві зварні для роботи під тиском. Технічні умови постачання. Частина 5. Труби, зварені дуговим зварюванням під флюсом, з нелегованих і легованих сталей зі спеціальними властивостями для підвищеної температури»;
5. ГОСТ 20295-85 «Трубы стальные сварные для магистральных газонефтепроводов. Технические условия»;
6. ГОСТ 10706-76 (СТ СЭВ 489-77) «Трубы стальные электросварные прямошовные. Технические требования».

В зв'язку з тим, що з 01.07.2023 на території України припинили свою дію міждержавні стандарти ГОСТ 20295-85 та ГОСТ 10706-76 постала потреба у вітчизняних стандартах.

Належна безпека експлуатації магістральних газо- та нафтопроводів повинна будуватись на знаннях з рівня механічних властивостей та залишкових напружень у металі труб, що виробляють по різним технологіям.

Відомо, що на основі розрахунків залишкові напруження в тілі труби після пресового покровоного J-формування склали близько 0,3-0,4 від межі плинності, а експериментальні дані, виконані за методикою з дифрактометричним методом, показали ефективність експандування – значення залишкових напружень після експандування становили близько 0,1 межі плинності [3].

В роботі [3] вказується на особливість покровоного розширення периметра труби на гідромеханічному експандері – зварний шов розташовують у спеціальній виїмці на одному з клинів оправки експандера (рис. 3). При цьому на шов не діють радіальні напруження від роздачі труби. А шов має збільшення товщини («посилення») по зрівнянню з товщиною стінки труби в 1,3 рази.



Рис. 3 – Робочий інструмент з повздовжнім пазом для розташування зварного шва:
1 – повздовжній паз (ширина 45 мм, глибина 5 мм)

В роботі [4] відмічено, що незалежно від того, наскільки б складною не була термомеханічна історія прокатки, формування, шліфування, зварювання і т.д., що може мати місце для створення напруженого стану, залишкові напруження, що залишилися після цієї складної обробки, будуть повністю пружними. Залишкові напруження в металі є пружними незалежно від історії деформування і інших технологічних операцій і меншими ніж межа текучості. Для вимірів залишкових напружень застосовують механічні чи дифракційні методи.

При формуванні по технології JCOE трубний переділ не має негативного впливу на механічні властивості металу (розтяг та ударний вигин). Розкид властивостей трубної заготовки, знижується при експандуванні [5].

У процесі експандування напруження перевищують межу текучості на 0,3-1,5%. В роботі [5] виявлено, що залишкові напруження у металі труби зменшуються. Відмічається також, що релаксація залишкових напружень в металі відбувається також і вздовж труби.

Огляд релаксації залишкових напружень, що виникають в результаті різних виробничих процесів, та їх вплив на втомну поведінку наведено в роботі [6].

Мета статті. В роботі відповідно з постановленою проблемою визначено задачі з висвітлення результатів праці з розробок українських стандартів та ТУ з виробництва зварних труб великих діаметрів для умов України та з розробок розвинутого методу експериментально-аналітичного методу визначення залишкових напружень у металі готових труб (після експандування).

Виклад основного матеріалу. У зв'язку з анулюванням стандартів СРСР на трубу продукцію, серед виробників та споживачів ТВД гостро постало питання у розробці власних національних Українських стандартів та технічних умов.

Технічним комітетом стандартизації ТК 8 «Труби сталеві і балони» та споживачами трубної продукції за участю співавтора статті Овсяникова В.В. було розроблено та введено у дію:

- ДСТУ 9219:2023 Труби сталеві зварні для магістральних газонафтопроводів. Технічні умови [7];
- ДСТУ 9218:2023 Труби сталеві зварні прямошовні. Технічні умови [8];
- ТУ У 24.2–05757883–095:2022 Труби сталеві зварні прямошовні для магістральних газонафтопроводів [9].

Є також потреба в забезпеченні регламентованих механічних властивостей та в зменшенні рівня залишкових напружень у металі труб.

Застосували метод розрізання кілець для визначення рівня залишкових напружень у металі труб.

Експеримент провели при виробництві труб діаметром 630 мм з периметром 1981-1982 мм та з товщиною стінки 8 мм. Сталь S335. Стан поставки AR – гарячекатаний. Межа міцності 529 Н/мм². Межа плинності 403 Н/мм².

Після формовки труби розкриття кромки було 70-80 мм. Після доформовки кромки та зварки повздовжніх кромки вирізали чотири кільця з труби. Після розрізання кільця № 1 по зварному шву розкриття було 180 мм.

Кільця № 2, № 3, № 4 проекспандували з різними величинами відносного розширення відповідно 0,8%, 1,2% та 0,4%. Їх теж розрізали вздовж повздовжньої вісі труби в місці зварного шва (рис. 4).

Розкриття кільця № 2 склало 56 мм, кільця № 3 – 53 мм, кільця № 4 – 58 мм (таблиця 1).

Таблиця 1

Результати дослідження впливу експандування

№	Зовнішній периметр після зварки, мм	Експандування, %	Зовнішній периметр після експандування, мм	Розкриття, мм
№ 1	1982	0	1982	180
№ 2	1982	0,8	1998	56
№ 3	1982	1,2	2004	53
№ 4	1982	1,2	1990	58

Отримані результати вказують на те, що розкриття у зварній трубі після її експандування були майже у тричі меншими, ніж у труб після зварки шва без експандування. Цей результат

вказує на ефективність експандування зварних труб з точки зору зниження залишкових напружень у трубі, що були після зварки шва.



Рис. 4 – Розрізані кільця № 1, № 2, № 3, № 4 від труби розміром 630x8,0 мм

На трубах з різними величинами відносного збільшення зовнішнього діаметра труби від 0,4% до 1,2% величина розкриття розрізаної повздовж шва труби була майже однакова і дорівнювала 58-53 мм. Це вказує на те, що величина експандування в цьому діапазоні майже не впливає на величину зниження залишкових напружень у трубі, що вже має зварний шов.

Результати досліджень дозволили для зменшення залишкових напружень в металі труб для теплових мереж пропонувати застосовувати ДСТУ 9219:2023 не тільки для заміни ГОСТ 20295-85, але й ще для труб по ГОСТ 10706-76 (на зміну діє ДСТУ 9218:2023) для магістральних тепломереж діаметром більш 426 мм застосовувати експандування замість термічної обробки.

Отримані результати дослідження були представлені ТОВ НВП «УКРТРУБОІЗОЛ» на VII Міжнародній спеціалізованій виставці «НАФТОГАЗЕКСПО - 2023» у м. Київ.

Висновки

Експандування суттєво впливає на зменшення залишкових напружень, що мають місце після формовки та зварки труби. Розкриття кромки після розрізання кілець зменшуються майже у три рази. Величина експандування в дослідженому (0,4%-1,2%) діапазоні майже не впливає на величину зниження залишкових напружень у трубі, що вже має зварний шов.

Результати є корисними для підприємств, що виробляють та експлуатують труби великих діаметрів, а також для установ-проектантів нафто- та газопроводів і в тому числі для теплових мереж.

Перелік використаних джерел:

1. Виробництво труб – НВП «УКРТРУБОІЗОЛ». URL: <https://uti.ua/virobnitstvo-trub/> (дата звернення: 15.05.2023).
2. Процес експандування в технологіях виробництва труб великого діаметра для магістральних нафто- і газопроводів та металознавчі аспекти його використання / Лоскутов О.Ю., Овсяников В.В., Проців В.В., Григоренко В.У. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2021. № 65. С. 99-106. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.099>.
3. Проців В.В., Григоренко В.У. Особливості процесу експандування в технологіях виробництва труб великого діаметра для магістральних нафто та газопроводів. *Метал та лиття України*. 2021. № 3(326). С. 64-69. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>.
4. Prevéy P., Hornbach D. Residual Stress in Pipelines. *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook* / edited by R. Winston Revie. John Wiley & Sons, Inc. P, 2015. Pp. 73-97. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119019213.ch07>.
5. Study on the residual stress relaxation in girth-welded steel pipes under bending load using

- diffraction methods / N. Hempela, J.R. Bunnb, T. Nitschke-Pagela, E.A. Payzantb, K. Dilger. *Materials Science and Engineering: A*. 2017. Volume 688. Pp. 289-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.02.005>.
6. McClung R.C. A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2007. Vol. 30. Iss. 3. Pp. 173-205. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2007.01102.x>.
 7. ДСТУ 9219:2023. Труби сталеві зварні для магістральних газонафтопроводів. Технічні умови. [Чинний від 2023-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2023. 23 с. URL: <http://katalog.uas.org.ua/poznach2.php?poznach=%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3+9219> (дата звернення: 10.08.2023).
 8. ДСТУ 9218:2023. Труби сталеві зварні прямошовні. Технічні умови. [Чинний від 2023-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2023. 17 с. URL: <http://katalog.uas.org.ua/poznach2.php?poznach=%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3+9218> (дата звернення: 10.08.2023).
 9. ТУ У 24.2-05757883-095:2022. Труби сталеві зварні прямошовні для магістральних газонафтопроводів. [Чинний від 2023-02-23]. Дніпро: ДП «НДТ», 2023. 24 с.

References:

1. Vyrobnystvo trub – NVP «UKRTRUBOIZOL» (Production of pipes - NVP «UKRTRUBOIZOL») [Online]. Available: <https://uti.ua/virobnystvo-trub/>. Accessed on: May 15, 2023. (Ukr.)
2. O. Loskutov, V. Ovsyanikov, V. Protsiv, and V. Hryhorenko, «Protses ekspanduvannia v tekhnolohiiakh vyrobnystva trub velykoho diametra dlia mahistralnykh nafto- i hazoprovodiv ta metaloznavchi aspekty yoho vykorystannia» [«Process of expansion in production technologies of of large diameter pipes for main oil and gas pipelines and metal scientific aspects of its use»], *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho hirnychoho universytetu – The Collection of Research Papers of the National Mining University*, № 65, pp. 99-106, 2021. doi: **10.33271/crpmu/65.099**. (Ukr.)
3. V. Protsiv, and V. Hryhorenko, «Osoblyvosti ppotsecy ekspandyvnnia v texnolohiiakh vyrobnystva tryb velykoho diametra dlia mahistralnykh nafto ta hazoprovodiv» [«Peculiarities of the expansion process in the production technology of large-diameter pipes for main oil and gas pipelines»], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, № 3(326), pp. 64-69, 2021. doi: **10.15407/steelcast2019.10.064**. (Ukr.)
4. P. Prevéy, and D. Hornbach, «Residual Stress in Pipelines», in *Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook*, R. Winston Revie, John Wiley & Sons, Inc. P, 2015, pp. 73-97. doi: **10.1002/9781119019213.ch07**.
5. N. Hempela, J.R. Bunnb, T. Nitschke-Pagela, E.A. Payzantb, and K. Dilger, «Study on the residual stress relaxation in girth-welded steel pipes under bending load using diffraction methods», *Materials Science and Engineering: A*, vol. 688, pp. 289-300, 2017. doi: **10.1016/j.msea.2017.02.005**.
6. R.C. McClung, «A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue», *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 30, iss. 3, pp. 173-205, 2007. doi: **10.1111/j.1460-2695.2007.01102.x**.
7. *Truby stalevi zvarni dlia mahistralnykh hazonaftoprovodiv. Tekhnichni umovy* [Welded steel pipes for main gas and oil pipelines. Specifications], State standart 9219:2023, 2023. Available: <http://katalog.uas.org.ua/poznach2.php?poznach=%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3+9219>. Accessed on: August 10, 2023. (Ukr.)
8. *Truby stalevi zvarni priamoshovni. Tekhnichni umovy* [Straight welded steel pipes. Specifications], State standart 9218:2023, 2023. Available: <http://katalog.uas.org.ua/poznach2.php?poznach=%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3+9218>. Accessed on: August 10, 2023. (Ukr.)
9. *Truby stalevi zvarni priamoshovni dlia mahistralnykh hazonaftoprovodiv* [Welded straight-seam steel pipes for main gas and oil pipelines], Specifications U 24.2-05757883-095:2022, 2023. (Ukr.)

Рецензент: С.Б. Каргін,
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 23.09.2023
Стаття прийнята 18.10.2023

141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 621.311

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300061

© Чорна В.О.¹, Кудряшов О.О.², Біленко С.С.³

ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ КОМУНАЛЬНОГО ГОСПОДАРСТВА МІСТ

Використання альтернативних джерел енергії в житлово-комунальному секторі господарства України є актуальним питанням сьогодення. Живлення побутових споживачів або об'єктів життєзабезпечення від фотоелектричної станції дозволяє досягти енергетичної автономії, знизити витрати на електричну енергію, зменшити негативний вплив на оточуюче середовище. За останні десять років спостерігається значне зниження вартості елементів сонячних енергетичних станцій з одночасним підвищенням якісних характеристик устаткування. Це впливає на швидкість переходу різних груп споживачів, від побутових до промисловості, на альтернативні джерела енергоживлення або використання гібридної енергетичної системи. На ефективність та продуктивність фотоелектричних станцій впливають тип використовуваних технологій та фактори оточуючого середовища. В процесі перетворення сонячної енергії можуть виникати втрати, які пов'язані з ефективністю сонячних панелей, інверторів та інших компонентів системи. Під час проектування фотоелектричної станції необхідно враховувати широту місцевості, де планується її встановлення, та можливі зміни погодних умов, через які може зменшитись виробництво сонячної енергії. Для підвищення надійності енергоживлення устаткування в житлово-комунальному секторі господарства запропоновано виконати оснащення насосної станції підвищення тиску в водопровідній мережі дев'ятиповерхового житлового будинку сонячними панелями. Розрахунок кількості генерованої сонячною електростанцією енергії проведений з урахуванням кута встановлення панелей, обраним відповідно до широти регіону. Для розрахунків необхідної кількості панелей обрано метод, що враховує кількість прямої та розсіяної сонячної радіації, що поступає на поверхню сонячної панелі. За результатами розрахунків порівняно потенційний обсяг годинної генерованої потужності протягом року та споживаної годинної потужності. Встановлено, що потенційно високою є продуктивність станції в весняно-літній та літньо-осінній період, але забезпечити зростаючий в вечірній час попит на електроенергію вона не в змозі. У весняно-літній період ранковий максимум споживання енергії можливо забезпечити за рахунок фотоелектричної станції. За сприятливих погодних умов обсяг генерованої потужності буде більшим, ніж потужність споживання, а надлишок генерованої енергії може бути накопичений в акумуляторі та використаний у вечірній час. Розрахунок терміну окупності інвестицій в сонячну станцію розрахований за методом дисконтування та становить 1,6 роки.

Ключові слова: сонячна енергетика, сонячні панелі, енергія, потенціал, генерація, дисконтування, термін окупності.

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

³ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, sofibelyj@gmail.com

V.O. Chorna., O.O. Kudryashov, S.S. Bilenko. Assessment of the potential of solar energy to power municipal utilities. The use of alternative energy sources in the housing and utilities sector of Ukraine is a pressing issue today. Powering household consumers or life-support facilities from a photovoltaic power plant allows achieving energy autonomy, reducing electricity costs, and reducing the negative impact on the environment. Over the past ten years, there has been a significant reduction in the cost of solar power plant elements while improving the quality characteristics of the equipment. This affects the speed of transition of various consumer groups, from households to industry, to alternative energy sources or the use of a hybrid energy system. The efficiency and productivity of photovoltaic power plants are affected by the type of technology used and environmental factors. In the process of converting solar energy, losses may occur that are related to the efficiency of solar panels, inverters, and other system components. When designing a photovoltaic power plant, it is necessary to take into account the latitude of the area where it is planned to install it and possible changes in weather conditions that may reduce solar energy production. To increase the reliability of power supply to equipment in the housing and communal sector, it is proposed to equip the pumping station for increasing the pressure in the water supply network of a nine-story residential building with solar panels. The calculation of the amount of energy generated by the solar power plant is based on angle of panel installation, chosen in accordance with the latitude of the region. To calculate the required number of panels, a method was chosen that takes into account the amount of direct and scattered solar radiation received by the solar panel surface. Based on the results of the calculations, the potential amount of hourly generated power during the year and the consumed hourly power were compared. It was found that the potentially high productivity of the station is in the spring-summer and summer-autumn periods, but it is not able to meet the growing demand for electricity in the evening. In the spring and summer, the morning peak in energy consumption can be met by a photovoltaic plant. Under favorable weather conditions, the amount of generated power will be greater than the power consumption, and the excess energy can be accumulated in the battery and used in the evening. The payback period of the investment in the solar station was calculated using the discounted cash flow method and is 1,6 year.

Key words: solar energy, solar panels, energy, potential, generation, discounting, payback period.

Постановка проблеми. Насосні станції підвищення тиску (НСПТ) відіграють важливу роль в системах водопостачання. Вони забезпечують безперебійне водопостачання, підтримання необхідного тиску в водопровідній мережі та оптимальний розподіл води на ділянках мережі. Зазвичай, НСПТ мають високий ступінь надійності при належному технічному обслуговуванні та за умови дотримання вимог експлуатації устаткування. З енергетичної точки зору такі станції залежні від енергопостачальних організацій, тому при виникненні аварійної ситуації в енергетичній системі НСПТ залишаються знеструмленими до моменту ліквідації наслідків аварії. Використання альтернативних джерел електричної енергії або гібридної системи електропостачання спроможне зробити систему більш надійною та енергетично незалежною.

Метою даної роботи є дослідження технічної можливості та економічної доцільності використання потенціалу сонячної енергії для живлення технологічного обладнання підвищувальної насосної станції багатоповерхового житлового будинку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Численні наукові дослідження свідчать про те, що Україна має значний потенціал для розвитку альтернативної енергетики [1-3]. Середньорічний потенціал сонячної енергії в Україні є досить високим (1000-1350 кВт·год/м²). На території України є можливість ефективного використання фотоелектричного обладнання як на території північної частини (7 місяців протягом року), так і в південних регіонах (9 місяців). В зимовий період фотоелектричні станції (ФЕС) залишаються працездатними, хоч їх ефективність і зменшується. В [4-6] наведено результати порівняльного аналізу особливостей сонячних батарей, приведена оцінка різних фотоелектричних технологій в реальних умовах експлуатації. Як свідчать результати досліджень, серед монокристалічних, полікристалічних та тонкоплівкових

систем найбільш продуктивними є монокристалічні модулі, вони ж мають найбільший ККД. В [7] описано перспективи використання сонячного потенціалу в системах, розміщених на фасадах будинків, що дозволить інтенсифікувати процес виробництва електроенергії нетрадиційними джерелами. В [8] подані результати досліджень точності моделювання невеликих сонячних енергосистем з використанням різних вибірок даних. В [9] наведені порівняльна характеристика різних типів сонячних модулів та методика розрахунків сонячних елементів. В [10] проведені дослідження, націлені на з'ясування максимально можливих обсягів генерації електричної енергії з використанням фотоелектричного устаткування в межах Полтавської області. В статті показано, що використання сонячної енергії для електроживлення побутових приладів цілком можливе та економічно вигідне за умови встановлення в приватному секторі двозонного лічильника електричної енергії. Крім того, проведені дослідження свідчать про можливість та економічну доцільність реалізації генерованої енергії в мережу електропостачання. В [11] наведено методику розрахунків сонячного потенціалу для генерації енергоресурсів. Вона використана в представленій науковій роботі, проведеній в рамках підготовки випускної кваліфікаційної роботи магістра, в якості базової для розрахунків сонячної енергоустановки.

Виклад основного матеріалу. Загальновідомим є факт суттєвого зниження вартості елементів сонячних енергетичних установок протягом останнього десятиліття. Наприклад, зниження вартості сонячних модулів з 1,5-2 доларів за 1 Вт до 20-40 центів за 1 Вт обумовлено високою конкуренцією на ринку фотоелементів, вдосконаленням технічних та енергетичних якостей сонячних модулів, збільшенням обсягів їх виробництва. Вартість інверторів та акумуляторних батарей для фотоелектричних станцій за цей час знизилась в середньому вдвічі. І така тенденція буде спостерігатись надалі. Зниження вартісного показника ФЕС та покращення їх ефективності робить дану технологію привабливою для більш широкого кола споживачів. Крім того, суттєвою перевагою сонячної енергетики є доступність та екологічність. Останнє набуває особливої актуальності в контексті глобальних кліматичних змін.

З метою вивчення питання можливості та доцільності використання потенціалу сонячної енергії для підвищення надійності енергоживлення устаткування в житлово-комунальному секторі господарства в якості об'єкта дослідження було обрано насосну станцію підвищення тиску в водопровідній мережі дев'ятиповерхового житлового будинку м. Кременчук. З технічних даних станції відомо, що до складу технологічного устаткування входять два відцентрові насоси (основний та резервний) типу K20/30 з асинхронними електричними двигунами АІР100S2 потужністю 4 кВт та трубопровідна мережа з запірною-регулюючою апаратурою. Також відомий графік споживання води абонентами протягом доби (рис. 1).

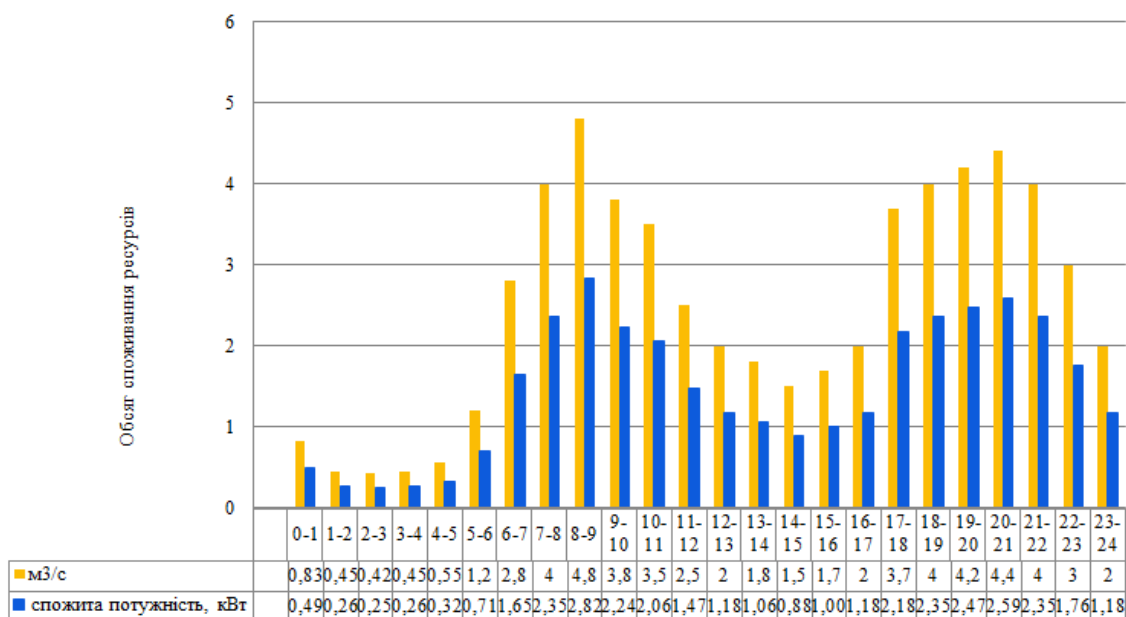


Рис. 1 – Добовий графік водопостачання та споживання електроенергії

Як видно з рисунку, графік споживання води має два пікові періоди – ранковий (з 6:00 до 11:00) та вечірній (з 17:00 до 22:00). Регулювання продуктивності насосного агрегата здійснюється в автоматичному режимі за допомогою частотного перетворювача, в результаті чого забезпечується не тільки підтримання на потрібному рівні тиску в трубопроводній мережі споживача, але й максимальна економія енергоносіїв. З точки зору надійності станція працює стабільно протягом року і повністю виконує свої функції, за винятком зупинки з причини виникнення аварійних ситуацій в системі енергопостачання. Так, протягом 2022 року таких випадків було 6, у 2023 році – 3. Для того, щоб уникнути знеструмлення основного технологічного устаткування станції при аварійному відключенні енергопостачання запропоновано оцінити можливість встановлення автономної системи енергоживлення на базі альтернативних джерел енергії, а саме сонячної енергоустановки.

Серед існуючих методів розрахунку ФЕС був обраний метод, в якому для визначення необхідної кількості фотоелектричних модулів враховується кількість сонячної радіації (прямої та розсіяної), що поступає на модулі, встановлені під певним кутом відносно горизонтальної поверхні.

Згідно методики, кількість енергії, яка надходить на горизонтальну поверхню, залежить від висоти Сонця над горизонтом:

$$h = \arcsin(\sin\mu \cdot \sin\sigma + \cos\mu \cdot \cos\sigma \cdot \omega), \quad (1)$$

де μ – широта місцевості, для якої планується встановлення ФЕС;

σ – значення кута сонячного відмінювання, визначається згідно формули Купера:

$$\sigma = 23,5 \cdot \sin\left(360 \frac{284+n}{365}\right), \quad (2)$$

де n – порядковий день року; ω – часовий кут руху сонця в певній точці в певний момент часу:

$$\omega = 15^\circ(t - t_c) + (\psi - \psi_{\text{зона } i}), \quad (3)$$

де t – фактичний місцевий час (розрахунок ведеться для сонячного півдня);

t_c – сонячний полудень обраного часового поясу;

ψ – фактична довгота точки;

$\psi_{\text{зона } i}$ – середня довгота регіону.

Кут падіння сонячних променів на поверхню, встановлену під кутом β до поверхні Землі:

$$\cos\theta = \cos(\mu - \beta) \cdot \cos\sigma \cdot \cos\omega + \sin\sigma \cdot \sin(\mu - \beta). \quad (4)$$

Інтенсивність прямого сонячного випромінювання на поверхню, перпендикулярну напрямку променів:

$$E_{\text{пр}} = \frac{1360h}{\sin h + \frac{1-P_{\text{пр}}}{P_{\text{пр}}}} \quad (5)$$

де $P_{\text{пр}}$ – коефіцієнт прозорості атмосфери.

Інтенсивність прямого сонячного випромінювання, що поступає на плоску горизонтальну поверхню:

$$E_{\text{пр } \Gamma} = E_{\text{пр}} \cdot \sin h. \quad (6)$$

Енергія, яка поступає на похилу поверхню, орієнтовану на південь:

$$E_c = 0,96(K_{\text{пр}}E_{\text{пр}}A + K_pE_pA), \quad (7)$$

де A – оптична характеристика сонячного модуля;

$K_{\text{пр}}, K_p$ – сталі величини, що враховують спосіб встановлення фотоелектричних модулів.

$$K_p = \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right). \quad (8)$$

Площа СЕС, яка дозволить отримати необхідну кількість енергії, розраховується за виразом:

$$S = \frac{E}{E'_c}, \quad (9)$$

де E – кількість енергії, яка виділяється при спалюванні палива;

E'_c – потенціал сонячної енергії, яку можна отримати з одиниці площі фотоелектричної установки.

$$E'_c = P_c \frac{q}{100}, \quad (10)$$

де P_c – сумарний річний потенціал;
 q – ККД сонячної панелі.

$$E = Nn, \quad (11)$$

де n – кількість енергії, що виділяється при спалюванні паливних ресурсів;
 N – обсяг споживання палива.

Знаючи добові витрати електроенергії (відповідно до графіка водопостачання), яку споживає основне обладнання НСПТ, отримано величину річного споживання енергії. За відомими показниками питомої теплоти згоряння природного палива (вугілля чи природного газу) обчислюється кількість палива, необхідна для виробництва електроенергії для забезпечення покриття попиту досліджуванним об'єктом.

Вихідними даними для розрахунків прийнято наступні: широта місцевості, для якої проводиться дослідження, 49°34' південної широти, орієнтація південна, кут встановлення сонячних модулів попередньо обраний рівним 40° (є найбільш розповсюдженим кутом орієнтації фотоелектричних станцій даного регіону), монокристалічні сонячні панелі Jinko Solar ЖКМ-570N (обрані за критерієм високих енергетичних показників, оскільки заявлений виробником ККД становить 22,07%). Розрахунки проводяться для періоду найменшої сонячної активності в регіоні – для грудня.

Результати розрахунків для грудня представлені в табличній формі на рис. 2. Згідно розрахунків, кількість сонячних модулів обраного типу, необхідних для покриття попиту на електроенергію досліджуванним об'єктом, становить 14, площа ФЕС – 36,17 м², встановлення сонячних панелей – на даху станції.

Грудень, 21									
Час, год	n	σ	ω	cos θ	h	Епр	Кр	Сумарна теплова енергія на поверхні, орієнтованій під певним кутом на південь, Вт/м.кв	Генерована потужність, Вт
Порядковий номер дня року	Схилення сонця	Годинний кут	Кут падіння сонячних променів	Висота Сонця над горизонтом	Інтенсивність дії прямої сонячної енергії	Коефіцієнт, що враховує орієнтацію СП відносно розсіяної радіації	Сумарна теплова енергія на поверхні, орієнтованій під певним кутом на південь, Вт/м.кв	Генерована потужність, Вт	
6	355	-23,50	90	-0,06	-14,660	-1961,3	1,383	-792,12	-6302,45
7		-23,50	75	0,17	-5,520	-393,6		-117,87	-937,82
8		-23,50	60	0,39	2,690	134,2		109,14	868,36
9		-23,50	45	0,58	9,610	381,3		215,38	1713,63
10		-23,50	30	0,72	14,790	507,7		269,75	2146,26
11		-23,50	15	0,81	17,820	566,6		295,08	2347,75
12		-23,50	0	0,84	18,410	577,0		299,56	2383,45
13		-23,50	-15	0,81	16,500	542,1		284,54	2263,88
14		-23,50	-30	0,72	12,270	450,8		245,30	1951,74
15		-23,50	-45	0,58	6,110	270,6		167,77	1334,88
16		-23,50	-60	0,39	-1,550	-91,6		12,01	95,52
17		-23,50	-75	0,17	-5,240	-368,3		-106,99	-851,25
18		-23,50	-90	-0,06	-13,210	-1553,5		-616,74	-4907,05

Рис. 2 – Приклад розрахунків потенціалу сонячної енергетики для грудня

На наступному етапі досліджень визначається потужність ФЕС, модулі якої встановлені під кутом до горизонту. Для цього використана наступна формула:

$$P = SqE_c, \quad (11)$$

де S – площа ФЕС.

В даній формулі відсутня складова величини кута нахилу сонячних модулів, оскільки вона врахована при обчисленні енергії E_c .

Розрахунки проведені для обраного дня кожного місяця року, під час розрахунків важливим було визначити потенціал сонячної енергетики згідно обраної методики в досліджуваному регіоні протягом року. Отримані результати, наведені на рис. 3, порівнюються з добовим графіком роботи системи водопостачання. Як видно з таблиці, найменше енергії можна отримати від ФЕС в грудні, що пояснюється значно меншою інтенсивністю сонячного випромінювання в цей період. Тривалість ефективного часу роботи установки протягом доби найнижча у січні та грудні, максимальна – в липні. Тобто взимку генерація енергії спостерігається не раніше 8 години ранку та завершується о 16 годині, що пов'язано з найменшою тривалістю світлового дня в році. В грудні захід Сонця відбувається в період між 15:00 та 16:00, чим пояснюється найменше значення годинної генерованої потужності в календарному році. Максимальне вироблення електроенергії фотоелектричними модулями, згідно проведених розрахунків, можливе опівдні в червні (з 12:00 до 13:00). Потенційно високою є продуктивність ФЕС в весняно-літній та літньо-осінній період. Але, незважаючи на це, забезпечити зростаючий попит на електроенергію в вечірній час вона не в змозі. Разом з тим, у весняно-літній період ранковий максимум споживання енергії цілком можливо забезпечити за рахунок ФЕС. При цьому з таблиці видно, що за сприятливих погодних умов обсяг генерованої потужності буде більшим, ніж потужність споживання. Надлишок генерованої енергії може бути накопичений в акумуляторі та використаний у вечірній час на електроживлення основного устаткування або, наприклад, на роботу системи освітлення прибудинкової території. Отже, можна зробити попередні висновки про доцільність застосування фотоелектричної установки в якості системи електроживлення насосного обладнання підвищувальної станції. Отже, для більшої ефективності та надійності ФЕС запропоновано оснащення станції інвертором та акумулятором. В якості інвертора може бути застосований гібридний інвертор (з перспективою підключення системи до мережі електропостачання та генерації енергії в мережу на умовах «зеленого» тарифу) LuxPower та акумулятори li-ion Pylontech us3000c (3,5 квт·год, 48 В).

Місяць	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень	Споживана годинна потужність, Вт
Час доби													
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	490
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	260
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	250
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	260
5	0	0	409	771	1547	1722	1416	0	0	0	0	0	320
6	0	0	605	1916	2334	2427	2252	1436	1155	0	0	0	710
7	0	727	1844	2566	2557	2881	2772	2283	2122	1425	290	0	1650
8	1027	1837	2503	2962	3141	3178	3107	2780	2659	2190	1488	868	2350
9	1862	2419	2882	3207	3343	3373	3322	3084	2974	2609	2094	1714	2820
10	2298	2740	3102	3353	3467	3493	3456	3267	3154	2837	2410	2146	2240
11	2514	2905	3215	3426	3529	3557	3527	3366	3239	2936	2547	2348	2060
12	2576	2956	3245	3436	3540	3571	3546	3397	3246	2931	2542	2383	1470
13	2502	2905	3198	3388	3500	3537	3515	3366	3177	2821	2383	2264	1180
14	2270	2740	3065	3271	3405	3453	3430	3267	3017	2578	2065	1952	1060
15	1809	2419	2818	3068	3239	3305	3279	3084	2732	2135	1431	1335	880
16	924	1837	2394	2737	2977	3074	3039	2780	2247	1320	172	96	1000
17	0	727	1650	2199	2573	2721	2252	2283	1388	0	0	0	1180
18	0	0	0	1282	1933	2182	2086	1436	0	0	0	0	2180
19	0	0	0	0	881	1335	1143	0	0	0	0	0	2350
20	0	0	0	0	0	0	409	0	0	0	0	0	2470
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2590
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2350
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1760
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1180
Годинна генерована потужність, Вт													

Рис. 3 – Результати розрахунків генерованої ФЕС протягом року

Слід зауважити, що крім географічного розташування ФЕС та сезонних змін в регіоні на ефективність та продуктивність установки впливають технічні фактори (тип фотоелектричних модулів, кут їх нахилу) та фактори оточуючого середовища (погодні умови, наявність об'єктів,

що можуть затіняти сонячні панелі). В процесі перетворення сонячної енергії можуть виникати втрати, які пов'язані з ефективністю сонячних панелей, інверторів та інших компонентів системи. Нові розробки в галузі сонячних панелей та інших компонентів системи генерації енергії мають високі вихідні показники і загальну продуктивність установки. Погодні умови, такі як хмарність, дощ, вітер, можуть зменшити виробництво сонячної енергії. Врахувавши перелічені фактори та проаналізувавши їх взаємодію, можна визначити потенціал сонячної енергії в конкретній місцевості. В представленій роботі питання впливу погодних умов на рівень генерації електроенергії не проводився.

Для оцінки економічної доцільності застосування фотоелектричних модулів в комунальному господарстві міст застосована методика оцінки ефективності інвестиційного проекту. Суть даної методики полягає в порівняльному аналізі обсягів капіталовкладень і майбутніх грошових надходжень [12]. Оскільки доходи та витрати відносяться до різних часових періодів, то важливо їх порівнювати з урахуванням зміни вартості первинних капіталовкладень. Необхідність проведення такого аналізу пояснюється процесом інфляції, небажаною динамікою інвестицій, падінням промислового виробництва, різними горизонтами прогнозування, змінами в податковій системі та ін.

Найбільш повно оцінити проект дозволяють методи, засновані на дисконтованих оцінках [12]. Як показують численні дослідження, методи дисконтованих оцінок є достатньо високоточними, що пояснюється врахуванням в їх методиках розрахунків різних показників. До них відносять: метод індексу рентабельності (PI), чистий дисконтований дохід (NPV) і внутрішню норму прибутковості (IRR).

Величина NPV є чистим дисконтованим доходом і визначається як сума поточних ефектів за весь розрахунковий період. При цьому величина дисконту може бути постійною або змінною.

$$NPV = \sum_{n=0}^N (R_n - S_n) \frac{1}{(1+r)^n}, \quad (12)$$

де R_n – результат, що досягається на n -му кроці розрахунку, тобто величина фінансового потоку, приведеного до теперішньої вартості, за весь період експлуатації проекту;

S_n – витрати, здійснювані на тому ж кроці, тобто капіталовкладення, використані для впровадження запропонованого рішення;

r – ставка (норма) дисконту, якій відповідає додатне розрахункове значення NPV.

Дисконтування можна пояснити нестабільною ціною фінансових активів. Різницю між поточною та майбутньою цінністю грошових коштів можна виразити у вигляді процентної ставки, що характеризує відносні зміни в їх оцінці за певний період [12]. Норма дисконту (або мінімальний коефіцієнт окупності) має бути рівною фактичній ставці відсотку за довгостроковими позичками на ринку капіталу.

Ставка дисконтування в Україні змінюється в залежності від багатьох факторів, включаючи економічні умови, монетарну політику та рівень інфляції. Цю ставку встановлює Національний банк України і вона може періодично змінюватись з метою регулювання фінансової системи країни. Станом на 01.12.2023 встановлена Нацбанком ставка дисконту дорівнює 15%. Через те, що протягом поточного року ця величина змінювалась декілька разів, прийнято рішення виконати розрахунки для поточного її значення та для величини 25%.

Під поняттям «дисконтований період окупності інвестицій» (PBP) прийнято розуміти час, протягом якого величина отриманих від реалізації проекту фінансів досягає значення вкладених у проект грошових коштів. Цей показник обчислюється згідно виразу:

$$PBP = (t_0 - 1) + \frac{IC - \sum PV_{(t_0-1)}}{PV_{t_0}}, \quad (13)$$

де t_0 – номер року, у якому дисконтований грошовий потік стає більшим за інвестиції $\sum PV \geq IC$; IC – сума інвестицій в проект; PV – дисконтовані грошові потоки.

Для порівняння були проведені розрахунки для двох значень ставки дисконту – 0,1 та 0,15. Результати розрахунків зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розрахунок чистого дисконтованого доходу

Рік реалізації проєкту	Інвестиційні кошти, грн	Грошовий потік CF, грн	Чистий грошовий потік, грн	Чистий дисконтований NPV, грн	Дисконтований період окупності інвестицій РВР,р
Ставка дисконту 0,15					
2022	269500	222796	193 735,65	- 75 764,35	
2023		222796	168 465,78	92 701,44	
2024		222796	146 491,99	239 193,42	
2025		222796	127 384,34	366 577,76	
2026		222796	110 768,99	477 346,75	
					1,37
Ставка дисконту 0,25					
2022	269500	222796	178 236,80	- 91 263,20	
2023		222796	142 589,44	51 326,24	
2024		222796	114 071,55	165 397,79	
2025		222796	91 257,24	256 655,03	
2026		222796	73 005,79	329 660,83	
					1,64

З таблиці видно, що окупність інвестицій в обох варіантах відбувається на другому році роботи проєкту, швидше при ставці дисконту 0,15 і повільніше при ставці, рівній 0,25.

Висновки

Використання технологій сонячної енергетики в житлово-комунальному господарстві є доцільним з екологічних, економічних та стратегічних поглядів. Проведені дослідження підтверджують технічну можливість та економічну доцільність застосування сонячної енергії для живлення технологічного устаткування насосної станції підкачки води в багатоповерхову будівлю. Термін окупності витрат на встановлення ФЕС, згідно розрахунків, становить півтора роки, що є відмінним показником для сфери комунального господарства міст.

Перелік використаних джерел:

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. 82 с.
2. Дослідження можливостей використання сонячної енергії для автономного живлення об'єкту / Казіміров О.О., Власов К.В., Куртов А.І., Потіхенський А.І. *Системи обробки інформації*. 2017. № 1(147). С. 58-61. DOI: <https://doi.org/10.30748/soi.2017.147.11>.
3. The solar API Toolkit. URL: <https://toolkit.solcast.com.au> (дата звернення: 11.08.2023).
4. Стрельцов О.А. Аналіз особливостей сонячних батарей. *Collection of Students' Scientific Paper. Automation and Development of Electronic Devices ADED-2022*. Kharkiv, 2022. Part 2. Pp. 89-94.
5. Experimental comparison between Monocrystalline, Polycrystalline, and Thin-film solar systems under sunny climatic conditions / O. Ayadiab, R. Shadid, A. Bani-Abdullah, M. Alrbai, M. Abu-Mualla, N. Balah. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. Supplement 9. Pp. 218-230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.121>.
6. Evaluation of the Performance of Polycrystalline and Monocrystalline PV Technologies in a Hot and Arid Region: An Experimental Analysis / M. Benganem, S. Haddad, A. Alzahrani, A. Mellit, H. Almohamadi, M. Khushaim, M.S. Aida. *Sustainability*. 2023. Vol. 15(20). Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152014831>.
7. Solar potential on facades at urban scale: an integrated approach combining solar and digital building modeling / Desthieux G., Gressin A., Raybaud B., Ingensand J. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2600. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2600/4/042004>.
8. Browne M.H., Williams A.A. The effect of time resolution on the modelling of domestic solar energy systems. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*. 2023. Vol. 8. Pp. 1-29. DOI: <https://doi.org/10.1051/rees/2023003>.

9. Риндюк Д.В., Шелешей Т.В., Беднарська І.С. Нетрадиційні джерела енергії. Практичні заняття : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 81 с.
10. Shokarov D., Chorna V., Bogodist K. Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. 2017. № 31(1253). С. 87-92.
11. Форкун Я.Б., Шкурпела О.О. Сонячна теплоенергетика : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. 88 с.
12. Майорова Т.В. Інвестиційна діяльність: навч. посіб. Київ : «Центр навчальної літератури», 2004. 376 с.

References:

1. *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy* [Atlas of the energy potential of renewable energy sources of Ukraine], S.O. Kudria, Ed., Kyiv, Ukraine: Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2020, 82 p. (Ukr.)
2. О.О. Kazimirov, K.V. Vlasov, A.I. Kurtov, and A.I. Potikhenskyi, «Дослідження можливостей використання сонячної енергії для автономного живлення об'єкту» [«Study the possibility of using solar energy for autonomous power supply facility»], *Systemy obrobky informatsii – Information processing systems*, № 1(147), pp. 58-61, 2017. doi: **10.30748/soi.2017.147.11**. (Ukr.)
3. The solar API Toolkit [Online]. Available: <https://toolkit.solcast.com.au>. Accessed on: August 11, 2023.
4. O.A. Streltsov, «Analiz osoblyvostei soniachnykh batarei» [«Analysis of features of solar batteries»], *Collection of Students' Scientific Paper. Automation and Development of Electronic Devices ADED-2022*, part 2, pp. 89-94, 2022. (Ukr.)
5. O. Ayadiab, R. Shadid, A. Bani-Abdullah, M. Alrbai, M. Abu-Mualla, and N. Balah, «Experimental comparison between Monocrystalline, Polycrystalline, and Thin-film solar systems under sunny climatic conditions», *Energy Reports*, vol. 8, supplement 9, pp. 218-230, 2022. doi: **10.1016/j.egypr.2022.06.121**.
6. M. Benganem, S. Haddad, A. Alzahrani, A. Mellit, H. Almohamadi, M. Khushaim, and M.S. Aida, «Evaluation of the performance of polycrystalline and monocrystalline PV technologies in a hot and arid region: an experimental analysis», *Sustainability*, vol. 15(20), pp. 1-24, 2023. doi: **10.3390/su152014831**.
7. G. Desthieux, A. Gressin, B. Raybaud, and J. Ingensand, «Solar potential on facades at urban scale: an integrated approach combining solar and digital building modeling», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2600, pp. 1-7, 2023. doi: **10.1088/1742-6596/2600/4/042004**.
8. M.H. Browne, and A.A. Williams, «The effect of time resolution on the modelling of domestic solar energy systems», *Renewable Energy and Environmental Sustainability*, vol. 8, pp. 1-29, 2023. doi: **10.1051/rees/2023003**.
9. D.V. Ryndiuk, T.V. Sheleshei, and I.S. Bednarska, *Netradytsiini dzherela enerhii. Praktychni zaniattia: navch. posib.* [Non-traditional sources of energy. Practical classes: study guide]. Kyiv, Ukraine: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute Publ., 2022. (Ukr.)
10. D. Shokarov, V. Chorna, and K. Bogodist, «Economic feasibility study of expediency of establishment of solar modules in the private household», *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Enerhetyka: nadiinist ta enerhoefektyvnist – *Bulletin of the National Technical University «KhPI»*. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency, № 31(1253), pp. 87-92, 2017.
11. Ya.B. Forkun, and O.O. Shkurpela, *Soniachna teploenerhetyka: konspekt lektsii* [Solar thermal energy: lecture notes]. Kharkiv, Ukraine: XNUMG named after O. M. Beketov Publ., 2020. (Ukr.)
12. T.V. Maiorova, *Investytsiina diialnist: navch. posib.* [Investment activity: study guide]. Kyiv, Ukraine: Tsentr navchalnoi literatury Publ., 2004. (Ukr.)

Рецензент: В.В. Прус
д-р техн. наук, проф., КрНУ ім. Михайла Остроградського

Стаття надійшла 16.09.2023
Стаття прийнята 07.10.2023

**МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ
УЗАГАЛЬНЕНОЇ ПОМПОВОЇ СТАНЦІЇ
З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВІДЦЕНТРОВИХ ПОМП**

На основі системного підходу та принципу електрогідродинамічної аналогії створено формалізовану математичну модель узагальненої системи асинхронних відцентрових помпових агрегатів багатоагрегатної помпової станції з асинхронним електроприводом відцентрових pomp. Одержану математичну модель верифіковано шляхом її адаптації до помпової станції заданої конфігурації. Проведено комп'ютерне симулювання ряду оперативних та аварійних режимів роботи помпової станції з чотирма гідравлічно з'єднаними помпами. Запропоновано сферу використання та шляхи вдосконалення розробленої моделі, а також напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: асинхронний двигун, відцентрова помпа, математична модель, трубопровід, помпова станція.

V.H. Lysiak. Modeling of dynamic modes of a generalized pumping station with an asynchronous electric drive of centrifugal pumps. Transportation of large volumes of liquid to distribution pipelines is provided by transit facilities - main pipelines and pumping stations, which consume significant amounts of electricity and are of strategic importance. The requirements for continuity, reliability, safety, fault finding, and diagnosis of existing, as well as requirements for the design of new strategic objects, are usually regulated by national legislation. The possibility of conducting physical experiments to analyze the modes of operation of such complexes is significantly limited by the inadmissibility of interrupting their functioning, as well as technical and financial risks. The use of a hybrid model consisting of a digital model of the power equipment and a physical model of the control system makes it possible to solve this problem. In this work, attention is focused on the digital model of power equipment. Based on the system approach and the principle of electrohydrodynamic analogy, a formalized mathematical model of the generalized system of asynchronous centrifugal pump units of a multi-unit pumping station with asynchronous electric drive of centrifugal pumps was created. The use of the principle of electrohydraulic analogy made it possible to apply the basic principles of the theory of electric circuits to form the equations of the hydraulic subsystem. The achieved formalization makes it possible to automate the formation of equations to obtain a model of an object of a specific configuration. The use of pump parameters in the model, which depend on the geometry of the internal elements, the speed of the impeller, and the physical properties of the liquid, makes it possible to investigate the impact of emergency and operational deviations of the equipment characteristics on the operating modes both at the level of individual modules and at the level of the pumping station as a whole. The obtained mathematical model was verified by adapting it to the pumping station of the given configuration. A computer simulation of several operational and emergency modes of operation of a pumping station with four hydraulically connected pumps was carried out. The scope of use and ways of improving the developed model are proposed, as well as the direction of further research.

Key words: asynchronous motor, centrifugal pump, mathematical model, pipeline, pumping station.

* канд. техн. наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів, ORCID: 0000-0002-8371-6455, vladyslav.h.lysiak@lpnu.ua

Постановка проблеми. Транспортування великих обсягів рідини до розподільних трубопроводів (ТП) забезпечують транзитні об'єкти – магістральні ТП та помпові станції (ПС), які споживають значні обсяги електроенергії та мають стратегічне значення. Високий ККД сучасних відцентрових pomp (ВП) створює відчутний потенціал енергоефективності в нестационарних режимах. Потужна ПС магістрального нафто- чи водопроводу є складним технологічним комплексом, підсистеми якого нерозривно об'єднані єдиним технологічним процесом і функціонують як єдина система. Вимоги до безперервності, надійності, безпеки, дефектоскопії та діагностики існуючих, а також вимоги до проектування нових таких стратегічних об'єктів, як правило, регламентуються національним законодавством (наприклад, в Україні – [1]). Можливість проведення фізичних експериментів для аналізу режимів роботи таких комплексів суттєво обмежена неприпустимістю переривання їх функціонування, а також технічними та фінансовими ризиками. Використання гібридної моделі, що складається з цифрової моделі енергетичного обладнання та фізичної моделі системи управління, дозволяє вирішити цю проблему [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Більшість робіт, в яких описано дослідження режимів роботи основного енергетичного обладнання ПС шляхом моделювання, можна розділити на чотири групи. Покажемо це на прикладі деяких публікацій. Перша з них характеризується поглибленим математичним описом лише гідравлічної [3], лише електромеханічної [4] або лише керуючої [5] підсистеми ПС або окремого асинхронного відцентрового помпового агрегату (АВПА), інша підсистема подана дуже спрощено. До цієї ж групи належать роботи з діагностики несправностей гідропідсистеми ПС на основі аналізу поведінки її електромагнітної підсистеми [6]. Використання такого підходу доцільно для вирішення обмеженої кількості вузьких задач. До другої групи робіт можна віднести імітаційні моделі [7], які корисні для розрахунку енергетичних показників режимів роботи, але не відображають фізичної природи процесів в жодній з підсистем ПС. Третя група робіт присвячена оптимізації загальних енергетичних показників режимів роботи окремих ПС і каскадів ПС [8]. Порівнянний ступінь деталізації математичного опису нерозривно поєднаних гідравлічної та електромеханічної підсистем ПС характеризує четверту групу ([9] і [10]). Це дає змогу досліджувати режими ПС з урахуванням взаємовпливу підсистем різної фізичної природи та параметрів їх внутрішніх елементів. Проте функціональні можливості моделі [9] обмежені можливістю дослідження динамічних режимів лише одноагрегатної ПС, а функціональні можливості моделі [10] багатоагрегатної ПС – можливістю дослідження лише усталених режимів.

Метою даної роботи є створення формалізованої математичної моделі узагальненої системи асинхронних відцентрових помпових агрегатів багатоагрегатної помпової станції з асинхронним електроприводом відцентрових pomp.

Виклад основного матеріалу. Схема з'єднань гідропідсистеми АВПА узагальненої багатоагрегатної ПС наведена на рис. 1. На цій схемі показані $N_{ПС}$ агрегатів з комбінованим з'єднанням гідротрактів ВП. Агрегати, помпи яких з'єднані послідовно, об'єднуються в N груп. Гідротракти агрегатів усіх груп з'єднані паралельно одним загальним трубопроводом. Кожна з груп агрегатів, гідротракти яких з'єднані паралельно, включає різну кількість окремих агрегатів, гідротракти pomp яких з'єднані послідовно. Символ M_j вказує на загальну кількість pomp, з'єднаних послідовно гідротрактами в j -й групі ($j = 1..N$ - порядковий номер групи). Для нумерації i -го окремого АВПА, асинхронного мотора (АМ), ВП в j -й групі використовується позначення i, j . Загальна кількість АВПА ПС становить:

$$N_{ПС} = \sum_{j=1}^N M_j \quad (1)$$

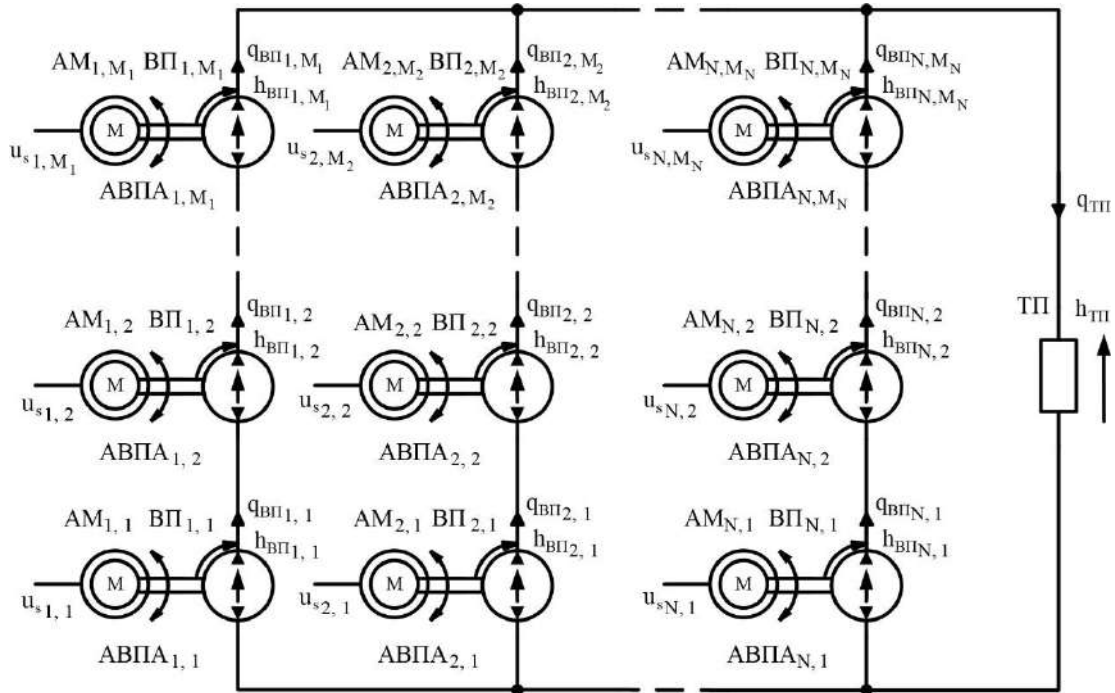


Рис. 1 – Схема з’єднань гідропідсистеми АВПА узагальненої багатоагрегатної ПС

Рівняння математичної моделі ВП записані на основі принципу електрогідродинамічної аналогії в системі обертових ортогональних d - q координат, жорстко зв’язаних робочим колесом ВП (на основі розробок, наведених у [11] і [12]). У цій системі координат еквівалентні гідравлічні опори та індуктивності ВП мають постійне значення, а тиски та витрати робочої рідини є гармонійними функціями часу, що дозволяє використовувати апарат комплексної змінної. Фактичні миттєві значення тисків і витрат розраховуються як модулі відповідних комплексних величин. Параметри ВП ідентифікуються за геометричними розмірами її внутрішніх елементів з урахуванням впливу на параметри кінематичної в’язкості та густини робочої рідини. Рівняння математичної моделі насиченої асинхронної машини (АМ) з метою подібності запису формуються в тій же системі координат [13]. Насичення враховується за допомогою поліноміальної апроксимації статичної нелінійної індуктивної намагніченню магнітопроводу АМ. Двигун і pompa з’єднані повністю жорстким валом. ТП представлений у вигляді статичного протинапору, еквівалентних гідравлічного опору й індуктивності. У всіх рівняннях і виразах використовується система відносних одиниць; винятком є загальний момент інерції АВПА J_{Σ} , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, час t , с, а також базові величини [9], що позначаються символом « b ».

Математична модель системи АВПА узагальненої багатоагрегатної ПС із комбінованим з’єднанням гідротрактів ВП представлена рівняннями (2)..(10). У цих рівняннях крапка над символами позначає комплексні змінні (координати d - q відповідають дійсній та уявній частинам):

$$\frac{dQ_{i,j}}{dt} = P_{i,j} \times Q_{i,j} + P_{0,i,j} \cdot \dot{h}_{0,i,j} + U_{i,j}; \quad (2)$$

$$h_{ВПd,i,j} q_{33q,i,j} - h_{ВПq,i,j} q_{33d,i,j} = 0; \quad (3)$$

$$\dot{h}_{0,i,j} = H_{0ном,i,j} \left(\frac{\omega_b}{\omega_{ВПb,i,j}} \right) \omega_{r,i,j}^2 e^{j\omega_{ВПb,i,j} \omega_{r,i,j} t}; \quad (4)$$

$$\frac{d\omega_{r_{i,j}}}{dt} = \frac{1}{J_{\Sigma_{i,j}} \omega_{AMB_{i,j}}} \cdot \left[M_{AMB_{i,j}} (\psi_{\delta_{i,j}} \dot{i}_{sq_{i,j}} - \psi_{\delta_{i,j}} \dot{i}_{sd_{i,j}}) - M_{ВПb_{i,j}} H_{0ном_{i,j}} \frac{\omega_{AMB_{i,j}}}{\omega_{ВПb_{i,j}}} \omega_{r_{i,j}} \times \right. \\ \left. \times \sqrt{(q_{11d_{i,j}} + q_{44d_{i,j}})^2 + (q_{11q_{i,j}} + q_{44q_{i,j}})^2} \right] \quad (5)$$

$$\left(\frac{Q_{ВПb_{i,j}}}{Q_b} \right)^2 (q_{33d_{i,j}}^2 + q_{33q_{i,j}}^2) = q_{33d_{i,j+1}}^2 + q_{33q_{i,j+1}}^2 \quad (6)$$

$$\left(\frac{H_{ВПb_{i,j}}}{H_b} \right)^2 (h_{ВПd_{i,j}}^2 + h_{ВПq_{i,j}}^2) = \left(\frac{H_{ВПb_{i,j}}}{H_b} \right)^2 (h_{ВПd_{i,j+1}}^2 + h_{ВПq_{i,j+1}}^2); \quad (7)$$

$$q_{ТП} = \sum_{j=1}^N \frac{Q_{ВПb_{i,j}}}{Q_b} \sqrt{q_{33d_{i,j}}^2 + q_{33q_{i,j}}^2}; \quad (8)$$

$$h_{ТП} = \sum_{i=1}^{M_j} \frac{H_{ВПb_{i,j}}}{H_b} \sqrt{h_{ВПd_{i,j}}^2 + h_{ВПq_{i,j}}^2}; \quad (9)$$

$$\frac{dq_{ТП}}{dt} = -\frac{r_{ТП}}{L_{ТП}} q_{ТП} + \frac{1}{L_{ТП}} h_{ТП} - \frac{1}{L_{ТП}} h_{cm}, \quad (10)$$

де $\mathbf{P}_{i,j}$ – параметри АВПА (детально див. табл. 1), $\mathbf{Q}_{i,j} = (\dot{q}_{11_{i,j}}, \dot{q}_{22_{i,j}}, \dot{q}_{33_{i,j}}, \dot{q}_{44_{i,j}}, \dot{i}_{s_{i,j}}, \dot{i}_{r_{i,j}}, \dot{e}_{\delta_{i,j}}, \dot{\psi}_{\delta_{i,j}})_t$ – координати режиму АВПА, $\mathbf{P}_{0_{i,j}} = (-L_{11_{i,j}}^{-1}, -L_{21_{i,j}}^{-1}, -L_{31_{i,j}}^{-1}, L_{m_{i,j}}^{-1}, 0, 0, 0, 0)_t$ – параметри ВП; $\mathbf{U}_{i,j} = (0, 0, 0, 0, \dot{u}_{s_{i,j}}, L_{m_{i,j}}^{-1}, 0, 0, 0)_t$ вимушувальні сили АВПА; $\omega_{s_{i,j}}$ – кутова частота напруги обмотки статора; $\omega_{r_{i,j}}$ – кутова швидкість обертання валу АВПА; h_{cm} – статичний протинапір ТП; $\dot{i}_{s_{i,j}}$ – струм статора АМ; $\dot{i}_{r_{i,j}}$ – струм ротора АМ, приведений до його статора; $\dot{u}_{s_{i,j}}$ – напруга обмотки статора АМ; $\dot{\psi}_{\delta_{i,j}}$ – потокозчеплення від магнітного потоку повітряного зазору АМ, приведені до його статора, $L_{s_{i,j}}$ – індуктивність розсіяння обмотки статора АМ; $R_{s_{i,j}}$ – опір обмотки статора АМ; $L_{r_{i,j}}$ – індуктивність розсіяння обмотки ротора АМ; приведена до його статора; $R_{r_{i,j}}$ – опір обмотки ротора АМ, приведений до його статора; $R_{\mu_{i,j}}(\psi_{\delta_{i,j}}) = (0.82 + 0.148 \cdot (\psi_{\delta_{i,j}}^2 + \psi_{\delta_{i,j}}^2)) + 0.044 \times (\psi_{\delta_{i,j}}^2 + \psi_{\delta_{i,j}}^2)^4 \cdot (x_{a_{i,j}} + x_{\sigma_{i,j}})^{-1}$ – статичний нелінійний магнітний опір магнітопроводу АМ; $x_{a_{i,j}}$ – номінальний індуктивний опір намагнічення АМ; $x_{\sigma_{i,j}}$ – номінальний індуктивний опір розсіяння АМ; $\dot{h}_{0_{i,j}}$ – розрахунковий тиск ідеалізованої ВП; $H_{0ном_{i,j}}$ – номінальний напір ідеалізованої ВП; $\dot{q}_{11_{i,j}}, \dot{q}_{22_{i,j}}, \dot{q}_{33_{i,j}}$ – розрахункові фіктивні об'ємні витрати ВП; $h_{ВП_{i,j}} = \sqrt{h_{ВПd_{i,j+1}}^2 + h_{ВПq_{i,j+1}}^2}$ – напір на виході з ВП; $q_{ВП_{i,j}} = \sqrt{q_{33d_{i,j}}^2 + q_{33q_{i,j}}^2}$ – об'ємна витрата на виході з ВП; $h_{ТП}$ – напір на вході в ТП; $q_{ТП}$ – об'ємна витрата на вході в ТП; $r_{m_{i,j}}(q_{ВП_{i,j}})$ – еквівалентний гідравлічний опір, що врахує втрати механічної енергії в ВП; $L_{ТП}$ – гідравлічна

індуктивність ТП; $r_{ТП}$ – гідравлічний опір ТП; $M_{AMB_{i,j}}$, $M_{AMB_{i,j}}$ – базові значення електромагнітного моменту АМ та механічного моменту ВП відповідно; $Q_{ВПb_{i,j}}$, $H_{ВПb_{i,j}}$ – базові значення об’ємної витрати робочої рідини та напору ВП відповідно; $\omega_{AMB_{i,j}}$, $\omega_{ВПb_{i,j}}$ – базові значення кутової частоти напруги обмотки статора АМ та кутової швидкості обертання валу АВПА відповідно; Q_b , H_b , ω_b – загальні для ПС базові значення об’ємної витрати робочої рідини, напору та кутової частоти відповідно.

Таблиця 1

Матриця $P_{i,j}$ параметрів АВПА

$\frac{r_{11,j}}{L'_{11,j}}$	$\frac{r_{21,j}}{L'_{12,j}}$	$\frac{r_{22,j}}{L'_{12,j}}$	$\frac{r_{32,j}}{L'_{13,j}}$	$\frac{r_{33,j}}{L'_{13,j}}$	$\frac{r_{23,j}}{L'_{12,j}}$	0	0	0	0	0
$\frac{r_{11,j}}{L'_{21,j}}$	$\frac{r_{21,j}}{L'_{22,j}}$	$\frac{r_{22,j}}{L'_{22,j}}$	$\frac{r_{32,j}}{L'_{23,j}}$	$\frac{r_{33,j}}{L'_{23,j}}$	$\frac{r_{23,j}}{L'_{22,j}}$	0	0	0	0	0
$\frac{r_{11,j}}{L'_{31,j}}$	$\frac{r_{21,j}}{L'_{32,j}}$	$\frac{r_{22,j}}{L'_{32,j}}$	$\frac{r_{32,j}}{L'_{33,j}}$	$\frac{r_{33,j}}{L'_{33,j}}$	$\frac{r_{23,j}}{L'_{32,j}}$	0	0	0	0	0
0	0	0	0	$\frac{-r_{m,j}(q_{ВПi,j})}{L_{m,j}}$	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	$\frac{-R_{s_{i,j}}}{L_{s_{i,j}}} - j\omega_{s_{i,j}}$	0	0	$\frac{-1}{L_{s_{i,j}}}$	$\frac{-j\omega_{s_{i,j}}}{L_{s_{i,j}}}$	0
0	0	0	0	0	0	$\frac{-\omega_{s_{i,j}}R_{r,j}}{L_{r,j}} - j(\omega_{s_{i,j}} - \omega_{r_{i,j}})$	$\frac{-\omega_{s_{i,j}}}{L_{r_{i,j}}}$	$\frac{j(\omega_{s_{i,j}} - \omega_{r_{i,j}})}{L_{r,j}}$	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	1	1	0	$-R_{\mu_{i,j}}(\psi \delta_{i,j})$	0

Рівняння (2)..(5) описують кожен окремий (i -й) АВПА; загальна кількість рівнянь $11 \cdot N_{PS}$, зокрема:

- рівняння (2) записується у матрично-векторній формі; описує стан електромагнітної (4 рівняння з комплексними змінними для кожної АМ) і гідравлічної (4 рівняння з комплексними змінними для кожного СР) підсистем АВПА ; $i = 1..M_j$, де $j = 1..N$; загальна кількість рівнянь $8 \cdot N_{PS}$;

- рівняння (3) описують колінеарність зображальних векторів напору та об’ємної витрати робочої рідини на виході кожної окремої ВП [11] (по 1 рівнянню для кожної ВП) ; $i = 1..M_j$, де $j = 1..N$; загальна кількість рівнянь N_{PS} ;

- рівняння (4) з комплексною змінною описують квадратичну залежність фіктивного напору ВП від кутової швидкості обертання їх робочих коліс; загальна кількість рівнянь N_{PS} ;

- рівняння (5) руху ротора АМ описують з’єднання електромагнітної та гідравлічної підсистем кожного конкретного АВПА за допомогою абсолютно жорсткого загального вала; $i = 1..M_j$, де $j = 1..N$; загальна кількість рівнянь N_{PS} ;

- рівняння (6) і (7) описують послідовне з’єднання гідротрактів ВП в кожній з N груп АВПА і паралельне з’єднання всіх N груп АВПА; загальна кількість рівнянь N_{PS} , зокрема:

- рівняння (6) описують рівність об’ємних витрат робочої рідини всіх послідовно з’єднаних гідротрактів ВП j -ї групи (по 1 рівнянню для i -ї та $i+1$ -ї ВП j -ї групи); $i = 1..M_j - 1$, де $j = 1..N$; загальна кількість рівнянь $N_{PS} - N$;

- рівняння (7) описують рівність напорів робочої рідини всіх N паралельно з’єднаних груп (по 1 рівнянню для j і $j+1$ групи) ; $j = 1..N - 1$; загальна кількість рівнянь $N_{PS} - 1$;

• рівняння (8) і (9) описують паралельний зв'язок усіх N груп АВПА і ТП; загальна кількість рівнянь 2, зокрема:

• рівняння (8) описує рівність об'ємної витрати робочої рідини на вході ТП сумі об'ємних витрат робочої рідини всіх N груп ВП; $j = 1..N$; i – довільне в діапазоні від 1 до M_j ; загальна кількість рівнянь 1;

• рівняння (9) описує рівність тиску робочої рідини на вході ТП сумі напорів усіх послідовно з'єднаних гідротрактів ВП довільної групи (1 рівняння для ТП і довільної ВП j -ї групи); $i = 1..M_j$, де j – довільне в діапазоні від 1 до N ; загальна кількість рівнянь 1.

• рівняння (10) описують стан ТП; загальна кількість рівнянь 1.

Таким чином, узагальнена модель системи АВПА багатоагрегатної ПС з послідовним з'єднанням гідротрактів ВП складається з $12 \cdot N_{ПС} + 2$ рівнянь.

Значення гідравлічних індуктивностей і опорів у табл. 1, обчислюють за виразами:

$$L'_{11,i,j} = \left(L_{12,i,j} L_{21,i,j} \left(L_{11,i,j}^2 L_{i,j}'' \right)^{-1} - L_{11,i,j}^{-1} \right)^{-1}; \quad L'_{22,i,j} = L_{i,j}''; \quad L'_{33,i,j} = \left(L_{32,i,j} L_{23,i,j} \left(L_{33,i,j}^2 L_{i,j}'' \right)^{-1} - L_{33,i,j}^{-1} \right)^{-1};$$

$$L'_{12,i,j} = L'_{21,i,j} = L_{11,i,j} L_{i,j}'' L_{12,i,j}^{-1}; \quad L'_{13,i,j} = L'_{31,i,j} = L_{11,i,j} L_{33,i,j} L_{i,j}'' \left(L_{12,i,j} L_{23,i,j} \right)^{-1}; \quad L'_{23,i,j} = L'_{32,i,j} = L_{33,i,j} L_{i,j}'' L_{23,i,j}^{-1};$$

$$; \quad L'' = L_{12,i,j} L_{21,i,j} L_{11,i,j}^{-1} - L_{22,i,j} + L_{23,i,j} L_{32,i,j} L_{33,i,j}^{-1}; \quad L_{11,i,j} = L_{тном,i,j} + L_{\mu Hном,i,j} + L_{\mu Qном,i,j};$$

$$L_{12,i,j} = L_{21,i,j} = L_{\mu Qном,i,j}; \quad L_{23,i,j} = L_{32,i,j} = L_{\Delta Qном,i,j}; \quad L_{33,i,j} = L_{\Delta Qном,i,j} + L_{\Delta Hном,i,j};$$

$$L_{22,i,j} = L_{\mu Qном,i,j} + L_{\Delta Qном,i,j}; \quad r_{11,i,j} = r_{12,i,j} = R_{\mu Qном,i,j}; \quad r_{22,i,j} = r_{23,i,j} = R_{\Delta Qном,i,j};$$

$$r_{33,i,j} = R_{\Delta Qном,i,j} + R_{\Delta Hном,i,j}, \text{ де } L_{тном,i,j}, L_{тном,i,j}, L_{\mu Hном,i,j}, L_{\mu Qном,i,j}, L_{\Delta Qном,i,j}, L_{\Delta Hном,i,j}, R_{\mu Qном,i,j}, R_{\Delta Qном,i,j}, R_{\Delta Hном,i,j} - \text{ номінальні розрахункові параметри ВП, які за методикою [11] обчислюються за геометричними розмірами її внутрішніх елементів.}$$

Коректність запропонованої математичної моделі та її працездатність верифіковано шляхом адаптації для 4-блокової системи АВПА ($N_{ПС} = 4$, $N = 2$, $M_1 = 2$, $M_2 = 2$). Агрегати АВПА_{1,1} і АВПА_{2,1} є підпірними, а АВПА_{1,2} та АВПА_{2,2} – основними агрегатами ПС. Параметри АМ і ВП цих агрегатів наведені в табл. 2..5.

Таблиця 2

Параметри АМ 4АН355М6У3 підпірних АВПА

$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ном}$	$U_{s.ном}$, В	$n_{ном}$, об/хв	$\cos \phi_{ном}$
250	0,935	380	985	0,9
p_0	$T_{макс}^*$	$T_{мін}^*$	$T_{пуск}^*$	$I_{пуск}^*$
3	2,2	0,9	1,4	7

Таблиця 3

Параметри АМ 4АЗМВ-1600/6000У2 основних АВПА

$P_{ном}$, кВт	$\eta_{ном}$	$U_{s.ном}$, В	$n_{ном}$, об/хв	$\cos \phi_{ном}$
1600	0,961	6300	2979	0,9
p_0	$T_{макс}^*$	$T_{мін}^*$	$T_{пуск}^*$	$I_{пуск}^*$
1	2,6	0,7	1,9	6

Таблиця 4

Параметри ВП 4НДс-Н підпірних АВПА

$H_{ном}, м$	$Q_{ном}, м^3 \cdot год^{-1}$	$\eta_{ном}$	$n_{ном}, об/хв$	$P_{гидр.ном}, кВт$
45	1260	0,809	980	154
$H_{0.ном}^*$	$R_{\Delta Q}^*$	$L_{\Delta Q}^*$	$R_{\Delta H}^*$	$L_{\Delta H}^*$
1,302	29,47	9,49	$6,627 \cdot 10^{-4}$	0,4144
L_I^*	$L_{\mu H}^*$	$L_{\mu Q}^*$	$R_{мех}^*$	$L_{мех}^*$
0,00876	0,0352	0,2375	7,180	0,02287

Таблиця 5

Параметри ВП 4QG300-2-100b основних АВПА

$H_{ном}, м$	$Q_{ном}, м^3 \cdot год^{-1}$	$\eta_{ном}$	$n_{ном}, об/хв$	$P_{гидр.ном}, кВт$
428	800	0,745	2980	932
$H_{0.ном}^*$	$R_{\Delta Q}^*$	$L_{\Delta Q}^*$	$R_{\Delta H}^*$	$L_{\Delta H}^*$
2,641	43,89	15,12	$5,897 \cdot 10^{-5}$	0,4675
L_I^*	$L_{\mu H}^*$	$L_{\mu Q}^*$	$R_{мех}^*$	$L_{мех}^*$
1,03311	0,3122	2,3111	20,377	0,00436

Загальна тривалість математичного експерименту становила 15 секунд. Електроживлення АМ допоміжних агрегатів подавалось у моменти часу 0,1 с ($АВПА_{1,1}$) та 0,6 с ($АВПА_{2,1}$), а основних – у моменти часу 1,5 с ($АВПА_{1,2}$) та 2,0 с ($АВПА_{2,2}$). Після стабілізації режиму агрегатів у момент часу 9,5 с відбулось гідравлічне з'єднання з трубопроводом послідовно з'єднаних підпірної ($АВПА_{1,1}$) і основної ($АВПА_{1,2}$) помп, а в момент часу 10,0 с – відповідних помп ($АВПА_{2,1}$) і ($АВПА_{2,2}$). Після повної розгерметизації трубопроводу, яка відбувалась у момент часу 12,5 с, у момент часу 13,5 с від нього було від'єднано всі агрегати. На рис. 2..8 наведено деякі основні результати верифікаційного математичного експерименту.

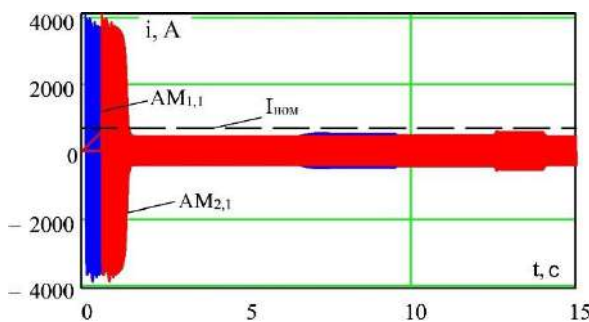


Рис. 2 – Струми обмоток статорів АМ підпірних АВПА, А

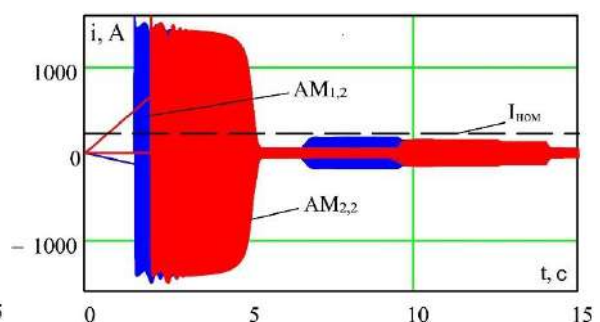


Рис. 3 – Струми обмоток статорів АМ основних АВПА, А

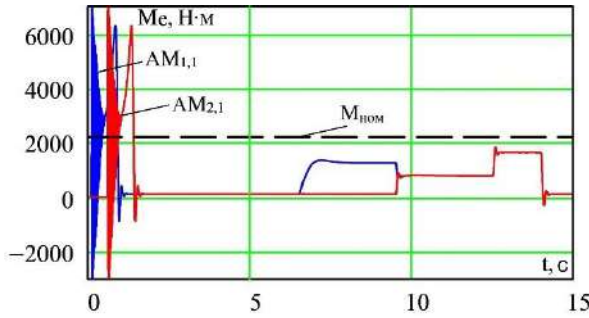


Рис. 4 – Електромагнітні моменти АМ підірних АВПА, Н·м

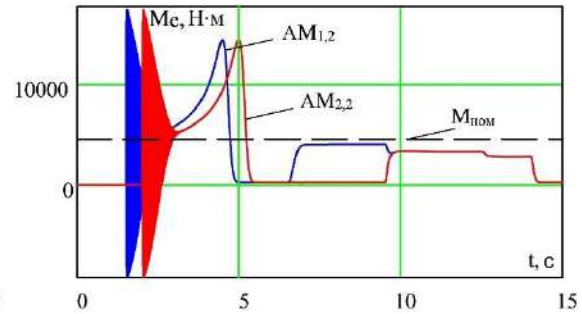


Рис. 5 – Електромагнітні моменти АМ основних АВПА, Н·м

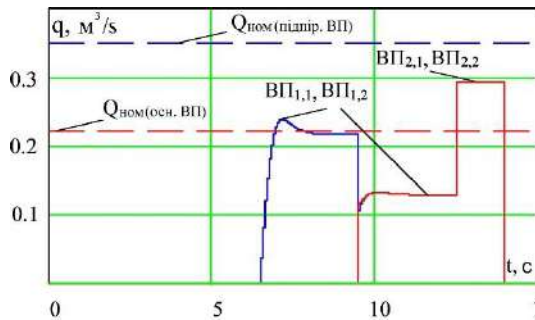


Рис. 6 – Об’ємні витрати робочої ВП АВПА, м³/с

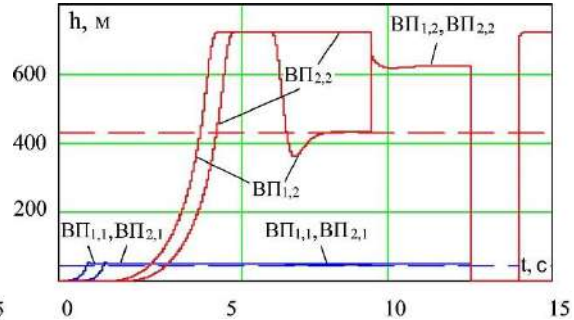


Рис. 7 – Напори робочої рідини ВП АВПА, м

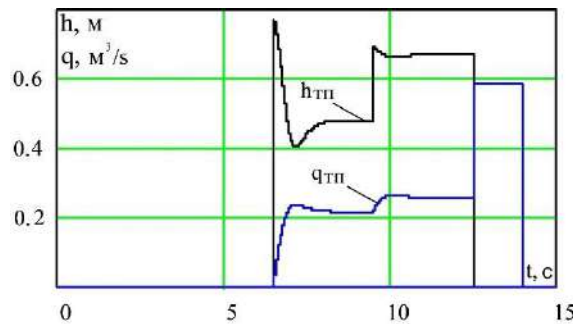


Рис. 8 – Об’ємна витрата робочої рідини ПС, м³/с та її напір, м

Висновки

Створено математичну модель узагальненої багатоагрегатної відцентрової помпової станції з асинхронним електроприводом pomp. Використання принципу електрогідравлічної аналогії дозволило застосувати основні положення теорії електричних кіл для формування рівнянь гідравлічної підсистеми. Досягнута формалізація дає змогу автоматизувати формування рівнянь для отримання моделі об’єкта конкретної конфігурації. Використання в моделі параметрів помпи, які залежать від геометрії внутрішніх елементів, швидкості робочого колеса та фізичних властивостей рідини, дає змогу дослідити вплив аварійних та експлуатаційних відхилень характеристик обладнання на режими роботи як на рівні окремих модулів, так і на рівні помпової станції в цілому. Модель може бути корисною як на етапі проектування нових, так і для комп’ютерного дослідження режимів роботи діючих помпових станцій. У перспективі можливо суттєво розширити функціональні можливості запропонованої моделі потужного обладнання помпової станції шляхом інтеграції в неї фізичної моделі її системи автоматичного керування. Це дозволить отримати високоефективний інструмент для дослідження таких об’єктів без проведення небезпечних фізичних експериментів на дорогому потужному обладнанні.

Перелік використаних джерел:

1. Про трубопровідний транспорт [Електронний ресурс]: Закон України від 15.05.1996 р. № 192/96-ВР. *Відомості Верховної Ради (ВВР)*. 1996. № 29. Ст. 139. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/192/96-%D0%B2%D1%80#Text>.
2. MMC-HVDC simulation and testing based on real-time digital simulator and physical control system / K. Ou, H. Rao, Z. Cai, H. Guo, X. Lin, L. Guan, T. Maguire, B. Warkentin, Y. Chen. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*. 2014. Vol. 2. Iss. 4. Pp. 1109-1116. DOI: <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2014.2337512>.
3. Janevska G. Mathematical modeling of pump system. *Electronic International Interdisciplinary Conference*. Žilina : EDIS, 2013. Vol. 2. Pp. 455-458.
4. Lozynskiy A., Kutsyk A., Kinchur O. The research of efficiency of the use of neuropredictor in the control system of water-supply pump electric drive. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. Iss. 1. Pp. 93-99.
5. Optimization design of centrifugal pump flow control system based on adaptive control / Y. Wang, H. Zhang, Z. Han, X. Ni. *Processes*. 2021. Vol. 9(9). Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9091538>.
6. Fault diagnosis of centrifugal pumps based on the intrinsic time-scale decomposition of motor current signals / S. Alabied, O. Hamomd, A. Daraz, F. Gu, A.D. Ball. *2017 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Huddersfield, UK, 07-08 September 2017. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.23919/ICAC.2017.8082027>.
7. PLC-based hardware-in-the-loop simulator of a centrifugal pump / Gevorkov L., Vodovozov V., Lehtla T., Raud Z. *2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Riga, Latvia, 11-13 May 2015. Pp. 491-496. DOI: <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2015.7266366>.
8. Kostyshyn V., Yaremak I. Mathematical model of reliability and efficiency of pumping unit of an oil pumping station. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. Iss. 5. Pp. 62-68.
9. Курляк П.О. Аналіз енергетичних потоків у системах різної фізичної природи електроприводних турбомашин. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 2(1). С. 12-17. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.41406>.
10. Paranchuk Y., Lysiak V. Energy efficient power supply system and automatic control of modes of the «power supply – Pumping station» complex. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2015. Iss. 3. Pp. 115-124. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-3/16>.
11. Костишин В.С. Моделирование режимов работы відцентрових насосів на основі електрогідравлічної аналогії : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.13. Івано-Франківськ, 2003. 342 с.
12. Kostyshyn V., Yaremak I., Kurlyak P. Creation of object-oriented model of centrifugal pump on the basis of electrohydrodynamic analogy method. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. Iss. 6. Pp. 72-79. DOI: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/11>.
13. Mathematical modeling and simulation of transients in power distribution systems with valve devices and dynamic loading / Gogolyuk P., Grechyn T., Ravlyk A., Grinberg I. *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*. Toronto, ON, Canada, 2003. Vol. 3. Pp. 1580-1585. DOI: <https://doi.org/10.1109/PES.2003.1267391>.

References:

1. Law of Ukraine. № 192/96-VR, 15.05.1996. *Pro truboprovodnyi transport* [About pipeline transport]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/192/96-%D0%B2%D1%80#Text>. (Ukr.)
2. K. Ou, H. Rao, Z. Cai, H. Guo, X. Lin, L. Guan, T. Maguire, B. Warkentin, and Y. Chen, «MMC-HVDC simulation and testing based on real-time digital simulator and physical control system», *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, iss. 4, pp. 1109-1116, 2014. doi: 10.1109/JESTPE.2014.2337512.
3. G. Janevska, «Mathematical modeling of pump system», *Electronic International Interdisciplinary Conference*, vol. 2, pp. 455-458, 2013.

4. A. Lozynskiy, A. Kutsyk, and O. Kinchur, «The research of efficiency of the use of neuropredictor in the control system of water-supply pump electric drive», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, iss. 1, pp. 93-99, 2017.
5. Y. Wang, H. Zhang, Z. Han, and X. Ni, «Optimization design of centrifugal pump flow control system based on adaptive control», *Processes*, vol. 9(9), pp. 1-14, 2021. doi: **10.3390/pr9091538**.
6. S. Alabied, O. Hamomd, A. Daraz, F. Gu, and A.D. Ball, «Fault diagnosis of centrifugal pumps based on the intrinsic time-scale decomposition of motor current signals», in *Proceedings of 23rd International Conference on Automation and Computing (ICAC)*, Huddersfield, UK, 2017, pp. 1-6, 2017. doi: **10.23919/ICoAC.2017.8082027**.
7. L. Gevorkov, V. Vodovozov, T. Lehtla, and Z. Raud, «PLC-based hardware-in-the-loop simulator of a centrifugal pump», in *Proceedings of IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, Riga, Latvia, 2015, pp. 491-496, 2015. doi: **10.1109/PowerEng.2015.7266366**.
8. V. Kostyshyn, and I. Yaremak, «Mathematical model of reliability and efficiency of pumping unit of an oil pumping station», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, iss. 5, pp. 62-68, 2017.
9. P. Kurlyak, «Analiz enerhetychnykh potokiv u systemakh riznoi fizychnoi pryrody elektroprivodnykh turbomashyn» [Analysis of energy flows in systems of different physical nature of electrically driven of turbomachines], *Tekhnolohycheskyi audyt y rezervi proyzvodstva – Technology audit and production reserves*, № 2(1), pp. 12-17, 2015. doi: **10.15587/2312-8372.2015.41406**. (Ukr.)
10. Y. Paranchuk, and V. Lysiak, «Energy efficient power supply system and automatic control of modes of the «power supply – pumping station» complex», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, iss. 3, pp. 115-124, 2015. doi: **10.29202/nvngu/2018-3/16**.
11. V.S. Kostyshyn, «Modeliuvannia rezhymiv roboty vidtsentrovnykh nasosiv na osnovi elektrohidravlichnoi analohii» [«Modeling of operating modes of centrifugal pumps based on electro-hydraulic analogy»], *Doct. of Sci. dissertation*, Ivano-Frankivsk, 2003. (Ukr.)
12. V. Kostyshyn, I. Yaremak, and P. Kurliak, «Creation of object-oriented model of centrifugal pump on the basis of electrohydrodynamic analogy method», *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, iss. 6, pp. 72-79, 2019. doi: **10.29202/nvngu/2019-6/11**.
13. P. Gogolyuk, T. Grechyn, A. Ravlyk, and I. Grinberg, «Mathematical modeling and simulation of transients in power distribution systems with valve devices and dynamic loading», *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*, vol. 3, pp. 1580-1585, 2003. doi: **10.1109/PES.2003.1267391**.

Рецензент: Ю.Л. Шелех
канд. техн. наук, доц., НУ «Львівська політехніка»

Стаття надійшла 03.09.2023
Стаття прийнята 05.10.2023

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.51:656.61.052

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300064

© Хлопенко М.Я.¹, Поливода В.В.², Шарко О.В.³, Онишко Д.М.⁴

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ УНИКНЕННЯ СЛЕМІНГУ СУДНА

Об'єктом дослідження є процеси автоматичного уникнення слемінгу при плаванні судна в шторм. Під час штормового плавання на судно діють зовнішні впливи від вітру та хвилювання, які призводять до сильних динамічних навантажень на корпус, збільшення кутів крену і диференту, zalivanja палуби. Знижується швидкість судна, погіршується його керованість. Одним із найнебезпечніших явищ при штормовому плаванні є слемінг. Поява слемінгу залежить від багатьох факторів: розмірів та форми корпусу судна, осадки носової частини корпусу, стану моря, курсу і швидкості судна. Слемінг характеризується ударами носової частини та днища корпусу судна об воду при русі назустріч хвилям, довжина яких приблизно дорівнює довжині судна. Удари супроводжуються здриганням корпусу, внаслідок різкого збільшення навантаження на днище, і повільно загасаючою вібрацією. Гідродинамічні удари по днищу і загальна вібрація є причинами порушення місцевої і загальної міцності корпусу. Слемінг та інші небезпеки штормового плавання є причиною сильного психоемоційного напруження судноводіїв, сприяє накопиченню втоми, що є передумовою аварій. У роботі розроблено метод автоматичного керування судном для запобігання слемінгу. Отримані результати пояснюються використанням бортового обчислювача, побудовою у бортовому обчислювачі небезпечної області слемінгу, використанням градієнтного методу знаходження оптимальної у часі траєкторії виводу фазової точки із небезпечної області, підтриманням засобами автоматичної системи керування оптимальної траєкторії. Використання розробленого методу дозволяє автоматично уникати слемінгу, зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити виснаженість екіпажу, зменшити ризики втрати судна і вантажу, підвищити безпеку судноплавства. Розроблений метод може використовуватися на судах, за умови інтегрування в існуючу автоматизовану систему бортового обчислювача для вирішення задачі автоматичного уникнення слемінгу під час штормового плавання.

Ключові слова: інтелектуальні системи транспорту, автоматичне керування, навігаційна безпека, людський чинник, слемінг, фазова точка.

M. Khlopenko, V. Polyvoda, O. Sharko, D. Onyshko. Automation of vessel slamming avoidance processes. The object of the research is the processes of slamming automatic avoidance when the vessel is sailing in a storm. During stormy sailing, the vessel is subjected to external influences from wind and waves, which lead to strong dynamic loads on the hull, increase in heel and trim angles, flooding of the deck. The vessel's speed decreases,

¹ д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7773-4721, khlopenko.mykola@ksma.ks.ua

² канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7742-255X, polyvodavv@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-6400-8528, sharko.oleksandr@ksma.ks.ua

⁴ ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0009-0005-8394-3091, onushkodn@gmail.com

its controllability deteriorates. Slamming is one of the most dangerous phenomena in storm sailing. The appearance of slamming depends on many factors: the size and shape of the vessel's hull, the draft of the bow, the state of the sea, the vessel's course and speed. Slamming is characterized by impacts of the bow and the bottom of the vessel's hull against the water when moving towards waves, the length of which is approximately equal to the length of the vessel. Impacts are accompanied by body shaking, due to a sharp increase in the load on the bottom, and a slowly fading vibration. Hydrodynamic shocks on the bottom and general vibration are the reasons for the violation of the local and general strength of the hull. Slamming and other dangers of stormy sailing are the cause of strong psycho-emotional stress of boatmen, contribute to the accumulation of fatigue, which is a prerequisite for accidents. In the article, a method of automatic control of the vessel to prevent slamming was developed. The obtained results are explained by the use of an on-board computer, the construction of a dangerous area of slamming in on-board computer, the use of a gradient method of finding the optimal trajectory in time of the phase point output from the dangerous area, and the maintenance of the optimal trajectory by means of an automatic control system. The use of the developed method allows you to automatically avoid slamming, reduce the influence of the human factor on control processes, reduce crew fatigue, reduce the risks of losing the ship and cargo, and increase the safety of navigation. The developed method can be used on vessels, provided it is integrated into the existing automated system of the on-board computer to solve the problem of automatic avoidance of slamming during stormy sailing.

Key words: *intelligent transport systems, automatic control, navigational safety, human factor, slamming, phase point.*

Постановка проблеми. Під час штормового плавання на судно діють зовнішні впливи від вітру та хвилювання, які призводять до сильних динамічних навантажень на корпус, збільшення кутів крену і диференту, заливання палуби. Знижується швидкість судна, погіршується його керованість. Одним із найнебезпечніших явищ при штормовому плаванні є слемінг. Поява слемінгу залежить від багатьох факторів: розмірів та форми корпусу судна, осадки носової частини корпусу, стану моря, курсу і швидкості судна. Слемінг характеризується ударами носової частини та днища корпусу судна об воду при русі назустріч хвилям, довжина яких приблизно дорівнює довжині судна. Зовнішнім проявом ударів є утворення потужних бризок води вздовж борта, що падають на палубу. Удари супроводжуються здриганням корпусу, внаслідок різкого збільшення навантаження на днище корпусу, і повільно загасаючою вібрацією. Існує також незатухаюча вібрація, викликана збудженням згинальних коливань корпусу під впливом періодично змінюваних гідродинамічних тисків на зустрічному хвилюванні. Гідродинамічні удари по днищу і загальна вібрація є причинами порушення місцевої і загальної міцності корпусу. Пошкодження зазвичай розвиваються повільно у вигляді накопичення пластичних деформацій обшивки та елементів, що формують обводи корпусу. Рух судна в шторм може супроводжуватися також додатковим попаданням великих мас води на палубу. Це відбувається зазвичай через носову частину корпусу судна при наявності зустрічного вітру. Таке затоплення вважається сильним, коли водою покривається до 15% довжини судна і більше. Якщо хвилі досягають лінії палуби в будь-якій точці корпусу і лише деякі з них перевищують її, то затоплення вважається помірним. Штормові умови є причиною сильного психоемоційного напруження вахтових помічників та команди в цілому, сприяють накопиченню втоми, що є передумовою аварій. Автори статті вважають, що найбільш перспективним напрямком боротьби зі слемінгом є використання автоматичних модулів керування рухом судна у автоматизованій системі. Це дозволить автоматично уникати слемінгу, пов'язаних з ним пошкоджень корпусу, втрати судна і вантажу, зменшити виснаженість екіпажу, підвищити безпеку судноплавства. Тому, розробка таких автоматичних модулів керування є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слемінг, як феномен, привертає значну увагу вчених та фахівців у галузі судноплавства. Дослідження, опубліковані в останні роки, зосереджені на різноманітних аспектах цього явища, спрямованих на розуміння та покращення безпеки судноплавства.

У роботі [1] описані фізичні процеси взаємодії судна і хвиль під час слемінгу. Розглянуті основні підходи до вивчення явища слемінгу: теорія імпульсу, яка використовувалася Лейбовіцем, Карманом, Пабстом; метод граничних елементів, розроблений для двовимірних впливів Грінхов (Greenhow) та Лін (Lin). Метод граничних елементів дозволяє отримати прийнятне рішення при незначних обчислювальних затратах. Недоліком методу автор називає фундаментальну проблему числового рішення, яка полягає у розриві потенціалу швидкості, що призводить до виникнення нескінченного тиску. Ця проблема пізніше була вирішена Огілві, який запропонував враховувати стисливість рідини; модель тривимірного слемінгу (теорія смуг) вперше запропонована Жао (Zhao) та у подальшому досліджувалася Квалсволдом (Kvålsvold), Самесом та ін., які практично довели, що кут нахилу судна має значний вплив на результуючу силу удару; статистичний метод Очі (Ochi). Використовувався для прогнозування ймовірності донного слемінгу. Ймовірність оцінювалася з використанням розподілу Релея. Недоліком методу було припущення, що перетин судна повинен повністю виходити із води а потім ударятися об воду. Метод виявився простим у використанні, що зробило його популярним; аналітичний метод Вагнера. Для знаходження рішення удару клину у плоску водну поверхню використана теорія потенціалу. Удосконалено наближений розв'язок задачі Добровольської удару клинів у вільну поверхню, відомий як рішення подібності. Також автором статті описані теми: Computational fluid dynamics, Structural aspects: hydroelasticity, Experimental techniques, Full-scale measurements.

У роботах [2-4] досліджувалися питання слемінгу під час випробувань на дослідницькому судні полярного класу у відкритій воді. Для оцінювання використовувалися підрахунок циклу, закон Майнера та часовий ряд деформації. Враховувалися низькочастотний та високочастотний хвильовий згин. Високочастотний хвильовий згин фіксувався шляхом вимірювання прискорення з подальшою обробкою алгоритмом виявлення слемінгу і операційного модального аналізу. Сильний слемінг спостерігався для хвиль, що ударялися в корму стоячого судна. У порівнянні із зустрічними хвилями, 14-кратне збільшення кількості ударів при попутному хвилюванні завдає у 46,3 разів більшої шкоди, причому в цій шкоді переважають збудження від вигину через удари.

Статті [5-6] присвячені розгляду механізмів виникнення слемінгу. Дослідження вказують на важливість врахування таких факторів, як форма хвиль, швидкість вітру та геометрія корпусу судна, для прогнозування і попередження виникнення цього явища.

В рекомендаціях [7] наведені експлуатаційні вимоги боротьби зі слемінгом за несприятливих погодних умов, описані критерії, що базуються на концепціях надійного проектування, інженерії та досвіду.

В публікації [8] розглянуті причини виникнення слемінгу, наведені рекомендації судноводіям щодо ефективних дій для його уникнення. Описано порядок підготовки судна до плавання в складних погодних умовах.

У роботі [9] досліджується вплив слемінгу на фізичну та емоційну втому екіпажу. Розглядаються аспекти, пов'язані з прийняттям рішень в умовах стресу та несприятливих погодних умов.

У статтях [10-15] наводяться математичні моделі та симуляції, які дозволяють більш точно передбачати вплив слемінгу на судно. Публікації включають використання числових методів та комп'ютерних програм для аналізу взаємодії судна з хвильовими полями.

В цілому, публікації останніх років свідчать про активний інтерес до проблеми слемінгу, а також націлені на розробку практичних рішень для підвищення безпеки та ефективності судноплавства в умовах штормів. Але всі наведені джерела не містять підходів щодо автоматичного розрахунку оптимальних параметрів керування рухом судна для уникнення слемінгу.

Метою статті є розробка методу, алгоритмічного та програмного забезпечення модуля автоматичного уникнення слемінгу, що дозволить автоматично контролювати область з підвищеною вірогідністю появи слемінгу, зменшити ризики втрати судна і вантажу, зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити виснаженість екіпажу, підвищити безпеку судноплавства.

Виклад основного матеріалу. Практичними спостереженнями встановлено, що слемінг виникає на зустрічному хвилюванні, коли довжина хвилі приблизно дорівнює довжині судна,

швидкість судна перевищує допустиму V_{sl} і курсові кути хвилі знаходяться у секторі $\pm 45^{\circ}$. Запишемо ці умови у вигляді системи нерівностей

$$\begin{cases} V_{sl} < V < V_{\max} \\ |q| \leq 45 \\ L \approx \lambda \end{cases}, \quad (1)$$

де V_{sl} – швидкість судна, при якій виникає слемінг, V_{\max} – максимальна швидкість судна, L – довжина судна, λ – довжина хвилі.

На рис. 1 побудована область слемінгу 1-2-3-4 у координатах " $V \sin q - V \cos q$ " із врахуванням умов системи (1). Якщо фазова точка А (поточне положення судна, виражене у координатах " $V \sin q - V \cos q$ "), рис. 1, попадає в область слемінгу, то можливими варіантами виходу із небезпечної області є маневр курсом, маневр швидкістю або комбінований маневр курсом і швидкістю. При маневрі курсом вправо або вліво, фазова точка А буде рухатися по колу, зображеному штриховою лінією, вздовж області слемінгу, що збільшує час знаходження у небезпечній зоні. При маневруванні швидкістю, фазова точка буде рухатися по радіусу даного кола, що у декілька разів зменшує довжину траєкторії виходу за межі небезпечної області. Маневр швидкістю можливий лише шляхом зменшення швидкості до $V < V_{sl}$. Збільшення швидкості не дозволяє вийти із небезпечної області, так як вона охоплює діапазон швидкостей від швидкості виникнення слемінгу V_{sl} до максимальної V_{\max} . При комбінованому маневруванні, фазова точка рухатиметься по траєкторії, довжина якої більша довжини траєкторії при маневруванні швидкістю, але менша довжини траєкторії при маневруванні курсом.

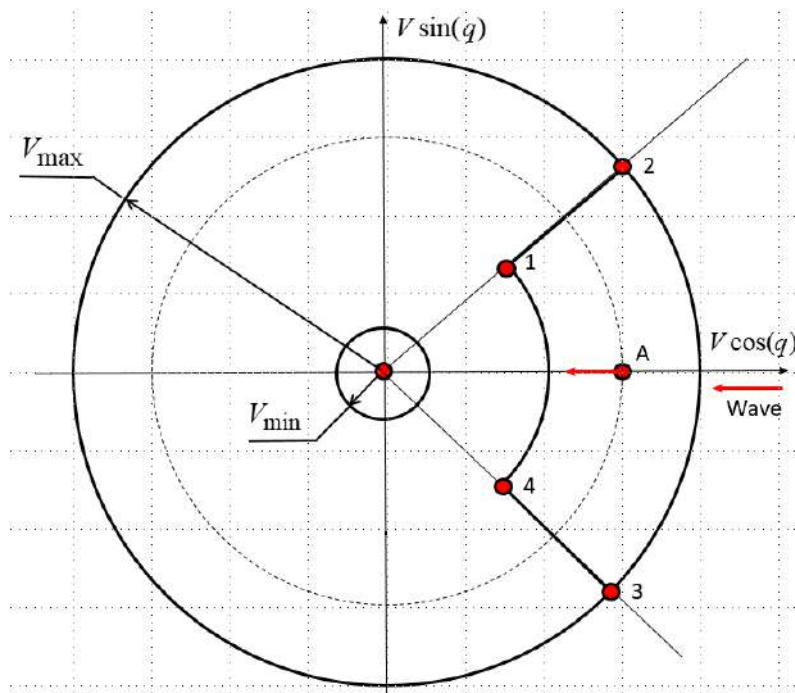


Рис. 1 – Область слемінгу 1-2-3-4 у координатах " $V \sin q - V \cos q$ "

У роботі [6] автором наведена діаграма частоти виникнення слемінгу $f(V, q)$, рис. 2, у залежності від швидкості судна V та курсового кута хвилі q .

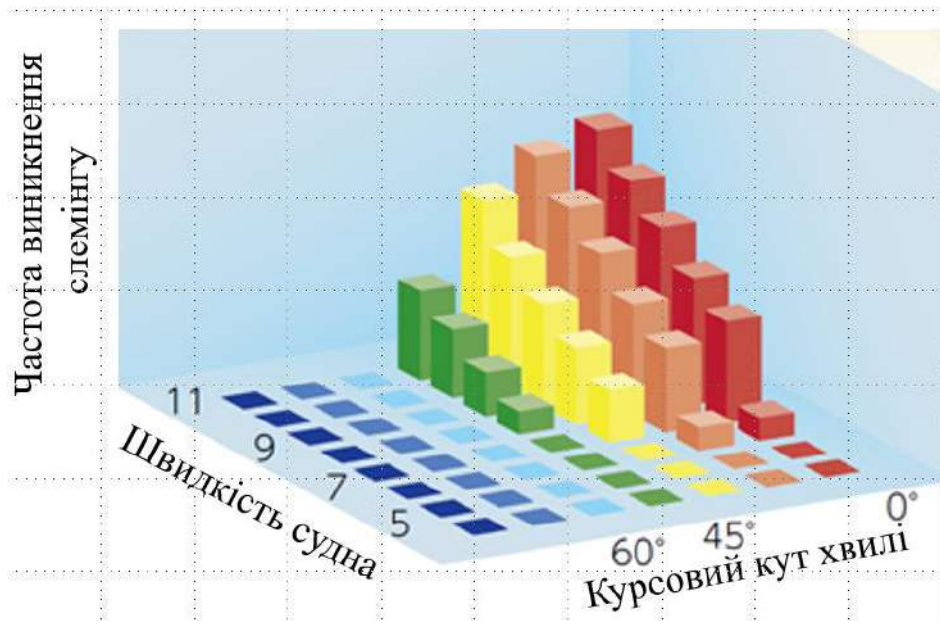


Рис. 2 – Діаграма частоти виникнення слемінгу

Дана діаграма містить більше інформації у порівнянні із діаграмою рис. 1, так як на ній додатково наведені дані про розподіл небезпеки (частоту виникнення слемінгу) всередині самої області. Дану інформацію можна використовувати для побудови більш ефективних алгоритмів. Для цього спочатку потрібно апроксимувати числові дані по частоті виникнення слемінгу, отримані для конкретного судна, випуклою функцією, наприклад,

$$f(V, q) = a_1V^2 + a_2V + b_1q^2 + b_2q. \quad (2)$$

Апроксимація (2) частоти виникнення слемінгу залежить від параметрів руху $T = (V, q)$. У такому випадку, задача керування зводиться до знаходження оптимальної у часі траєкторії $T(V^*, q^*)$ виходу із небезпечної області, на якій мінімізується цільова функція

$$f(V^*, q^*) = \min_{T(V, q)} f(V, q). \quad (3)$$

Траєкторія $T(V^*, q^*)$ у подальшому використовується як програмна і реалізується засобами системи керування.

Для визначення оптимальної траєкторії $T(V^*, q^*)$ скористаємося градієнтним методом. Знайдемо градієнт функції (2) по параметрам руху V, q :

$$\mathbf{grad} f(V, q) = \left(\frac{\partial f(V, q)}{\partial V}, \frac{\partial f(V, q)}{\partial q} \right). \quad (4)$$

$$\mathbf{grad} f(V, q) = (2a_1V + a_2, 2b_1q + b_2)$$

Градієнт (4) використовуємо для знаходження параметрів руху на наступному кроці обчислення n :

$$\mathbf{T}(n+1) = \mathbf{T}(n) - \mathbf{grad} f(V(n), q(n))h, \quad (5)$$

де h – крок ітерації.

Рівняння (4) і рекурентне співвідношення (5) дозволяють отримати оптимальну траєкторію мінімізації ризику слемінгу у часі.

Модельовання роботи алгоритму проведено на вибірках масиву даних рис. 2. Попередньо, масив даних занесено у таблицю 1.

Таблиця 1

Частота виникнення слемінгу					
V, вузли	q, гр	f(V,K)	V, вузли	q, гр	f(V,K)
6	0	3	7	0	13
	15	3		15	9
	30	0		30	6
	45	0		45	0
8	0	20	9	0	22
	15	18		15	19
	30	12		30	13
	45	3		45	6
10	0	22	11	0	27
	15	19		15	23
	30	15		30	18
	45	7		45	9

Для спрощення розрахунків, із повного масиву даних табл. 1 взяті лише 4 вузлові точки, виділені у таблиці жирним шрифтом. Автори не ставлять за мету максимально точно апроксимувати поверхню $f(V, q)$, що може бути зроблено із використанням більш складної апроксимуючої функції (2) або нейронної мережі, а хочуть лише показати можливість застосування даного підходу для формування оптимальної траєкторії.

Запишемо систему алгебраїчних рівнянь, використовуючи апроксимуючу функцію (2) і вузлові точки:

$$\begin{cases} a_1 6^2 + a_2 6 + b_1 0 + b_2 0 = 3 \\ a_1 8^2 + a_2 8 + b_1 (45)^2 + b_2 45 = 3 \\ a_1 11^2 + a_2 11 + b_1 (0)^2 + b_2 (0) = 27 \\ a_1 11^2 + a_2 11 + b_1 (30)^2 + b_2 30 = 18 \end{cases} \quad (6)$$

Із першого та третього рівняння системи (6) знаходимо коефіцієнти a_1 та a_2 :

$$\begin{cases} a_1 36 + a_2 6 = 3 \\ a_1 121 + a_2 11 = 27 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 6a_1 + a_2 = \frac{1}{2} \\ 11a_1 + a_2 = \frac{27}{11} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a_1 \approx 0,391 \\ a_2 = -1,851 \end{cases} \quad (7)$$

Із другого та четвертого рівняння системи (6) знаходимо коефіцієнти b_1 та b_2 :

$$\begin{cases} a_1 8^2 + a_2 8 + b_1 (45)^2 + b_2 45 = 3 \\ a_1 11^2 + a_2 11 + b_1 (30)^2 + b_2 30 = 18 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} b_1 (45)^2 + b_2 45 \approx -7,216 \\ b_1 (30)^2 + b_2 30 = -8,95 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} b_1 \approx 0,00925 \\ b_2 \approx -0,5776 \end{cases} \quad (8)$$

Із врахуванням знайдених коефіцієнтів, апроксимуюча поверхня (2) може бути записана у вигляді

$$f(V, q) = 0,391V^2 - 1,851V + 0,00925q^2 - 0,5776q \quad (9)$$

Враховуючи (4), градієнт функції $f(V, q)$ прийме вигляд

$$\mathbf{grad} f(V, q) = (0,782V - 1,851; 0,0185q - 0,5776) \quad (10)$$

На рис. 3 показана оптимальна траєкторія виводу фазової точки із області слемінгу для початкових умов $V(0) = 11$ вуз, $q(0) = 0$ град, отримана моделюванням у середовищі MATLAB.

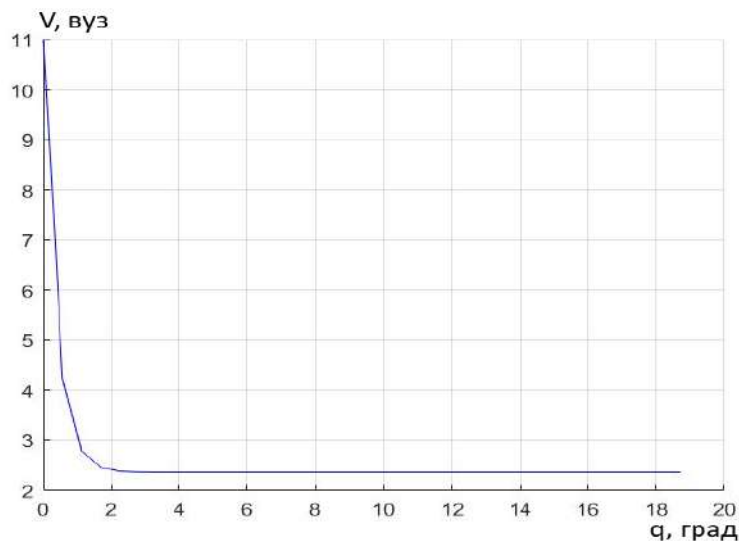


Рис. 3 – Оптимальна траєкторія виводу фазової точки із області слемінгу

Наведені результати підтверджують, що оптимальне виведення фазової точки пов'язане в першу чергу із зменшенням швидкості судна і лише потім із зміною курсового кута хвилі.

Висновки

Розроблено метод керування судном у шторм, який автоматизує процеси уникнення слемінгу, дозволяє зменшити ризики втрати судна і вантажу, зменшити вплив людського чинника на процеси керування судном, зменшити виснаженість екіпажу та в цілому підвищити безпеку судноплавства. Отриманий результат пояснюється використанням бортового обчислювача, побудовою у бортовому обчислювачі небезпечної області слемінгу, знаходженням оптимальної у часі траєкторії виводу фазової точки із небезпечної області із використанням градієнтних процедур, підтриманням засобами автоматичної системи керування оптимальної траєкторії. Розроблений метод може застосовуватися у бортовому обчислювачі автоматизованої системи або у бортовому обчислювачі автоматичного модуля керування рухом судна.

Перелік використаних джерел:

1. Kapsenberg G.K. Slamming of ships: where are we now? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2011. Vol. 369. Iss. 1947. Pp. 2892-2919. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0118>.
2. Pferdekämper K.-H., Bekker A. Investigation of vessel slamming and fatigue using a full-scale test sequence. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 144. Pp. 103883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103883>.
3. Pferdekämper K., Bekker A. Full-scale fatigue damage investigation of a slamming-prone vessel with unique section modulus characteristics. *Developments in the Analysis and Design of Marine Structures: Proceedings of the 8th Int. Conf. on Marine Structures, Trondheim, Norway, 7-9 June*

2021. London : CRC Press, 2021. Pp. 1-8.
4. Bekker A., van Zijl C., Saunders C. The detection of wave slamming from vibration measurements on a polar supply and research vessel. *MATEC Web Conf.: The 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC XIV)*. 2018. Vol. 211. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821111002>.
 5. Bereznitsky A. Local hydroelastic response of ship structures under impact loads from water (slamming): PhD Thesis. Delft, 2003. 150 p.
 6. Okada T. Marine Weather. Ship handling in rough sea. Head and countering / following seas. *P&I Loss prevention bulletin*. 2019. Vol. 45. 110 p.
 7. Resolution MSC.75(69). Adoption of amendments to the code on intact stability for all types of ships covered by imo instruments (resolution A.749(18)). [Adopted on 14 May 1998]. 1998. 19 p.
 8. Шторм. Управление судном в штормовых условиях: samvguvt. URL: <https://samvguvt.livejournal.com/48993.html> (дата звернення: 15.07.2023).
 9. Omer H., Bekker A. Human responses to wave slamming vibration on a polar supply and research vessel. *Applied Ergonomics*. 2017. Vol. 67. Pp. 71-82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.09.008>.
 10. Tavakoli S., Hirdaris S. Hydroelastic slamming in oblique seas. *ASME 2023: 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Melbourne, Australia, 11-16 June 2023. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2023-104304>.
 11. Zhang M., Tavakoli S., Hirdaris S. A deep learning method for the prediction of focused waves in a wave flume. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 12th International workshop on ship and marine hydrodynamics (IWSH-2023)*, Espoo, Finland, 28 August – 01 September 2023. Vol. 1288. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1288/1/012007>.
 12. Investigation of fluid added mass matrix during hydroelastic slamming of wedges / S. Feng, G. Zhang, C. Jiang, S. Jiang, O. el Moctar, Y. Ma. *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36. Iss. 1. Pp. 012133. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0180865>.
 13. On the treatment of hydroelastic slamming by coupling boundary element method and modal superposition method / S. Feng, G. Zhang, D. Wan, S. Jiang, Z. Sun, Z. Zong. *Applied Ocean Research*. 2021. Vol. 112. Pp. 102595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102595>.
 14. Geometric Effect of Bulbous Bows to the Hydrodynamic and the Probability of Slamming on Catamaran / Sulistyawati W., Sudjasta B., Suranto P., Saputra E. *CFD Letters*. 2023. Vol. 15. № 9. Pp. 166-174. DOI: <https://doi.org/10.37934/cfdl.15.9.166174>.
 15. Økland O., Lian G., Vestbøstad T. Validation of Measurement Techniques Used for Slamming. *ASME 2022: 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Hamburg, Germany, 5-10 June 2022. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2022-79068>.

References:

1. G.K. Kapsenberg, «Slamming of ships: where are we now?», *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 369, iss. 1947, pp. 2892-2919, 2011. doi: **10.1098/rsta.2011.0118**.
2. K.-H. Pferdekämper, and A. Bekker, «Investigation of vessel slamming and fatigue using a full-scale test sequence», *Applied Ocean Research*, vol. 144, pp. 103883, 2024. doi: **10.1016/j.apor.2024.103883**.
3. K. Pferdekämper, and A. Bekker, «Full-scale fatigue damage investigation of a slamming-prone vessel with unique section modulus characteristics», in *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Marine Structures «Developments in the Analysis and Design of Marine Structures»*, Trondheim, Norway, 2021, pp. 1-8.
4. A. Bekker, C. van Zijl, and C. Saunders. «The detection of wave slamming from vibration measurements on a polar supply and research vessel», in *Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC XIV) MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 211, pp. 1-6. DOI: **10.1051/mateconf/201821111002**.
5. A. Bereznitsky, «Local hydroelastic response of ship structures under impact loads from water (slamming)», PhD Thesis, Faculty Mechanical Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2003.

6. T. Okada, «Marine Weather. Ship handling in rough sea. Head and countering / following seas», *P&I Loss prevention bulletin*, vol. 45, 110 p., 2019.
7. Adoption of amendments to the code on intact stability for all types of ships covered by imo instruments (resolution A.749(18)), Resolution MSC.75(69). 1998.
8. Shtorm. Upravlenye sudnom v shtormovikh usloviyakh: samvguvt [Storm. Navigating a vessel in stormy conditions: samvguvt], 2020 [Online]. Available: <https://samvguvt.livejournal.com/48993.html>. Accessed on: July 15, 2023. (Rus.)
9. H. Omer, and A. Bekker, «Human responses to wave slamming vibration on a polar supply and research vessel», *Applied Ergonomics*, vol. 67, pp. 71-82, 2017. doi: **10.1016/j.apergo.2017.09.008**.
10. S. Tavakoli, and S. Hirdaris, «Hydroelastic slamming in oblique seas», in Proceedings of the 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering ASME 2023, Melbourne, Australia, 2023, pp. 1-8. doi: **10.1115/omae2023-104304**.
11. M. Zhang, S. Tavakoli, and S. Hirdaris, «A deep learning method for the prediction of focused waves in a wave flume», in Proceedings of the 12th International workshop on ship and marine hydrodynamics (IWSH-2023) «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering», Espoo, Finland, 2023, vol. 1288, pp. 1-11. doi: **10.1088/1757-899X/1288/1/012007**.
12. S. Feng, G. Zhang, C. Jiang, S. Jiang, O. el Moctar, and Y. Ma, «Investigation of fluid added mass matrix during hydroelastic slamming of wedges», *Physics of Fluids*, vol. 36, iss. 1, pp. 012133, 2024. doi: **10.1063/5.0180865**.
13. S. Feng, G. Zhang, D. Wan, S. Jiang, Z. Sun, and Z. Zong, «On the treatment of hydroelastic slamming by coupling boundary element method and modal superposition method», *Applied Ocean Research*, vol. 112, pp. 102595, 2021. doi: **10.1016/j.apor.2021.102595**.
14. W. Sulistyawati, B. Sudjasta, P. Suranto, and E. Saputra, «Geometric Effect of Bulbous Bows to the Hydrodynamic and the Probability of Slamming on Catamaran», *CFD Letters*, vol. 15, № 9, pp. 166-174, 2023. doi: **10.37934/cfdl.15.9.166174**.
15. O. Økland, G. Lian, and T. Vestbøstad, «Validation of Measurement Techniques Used for Slamming», in Proceedings of the 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering ASME 2022, Hamburg, Germany, 2022, pp. 1-9. doi: **10.1115/OMAE2022-79068**.

Рецензент: С.М. Зінченко

д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 18.09.2023

Стаття прийнята 10.10.2023

УДК 004.896.2:629.8.033.1

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300065

© Черниш Г.О.¹, Савенко О.С.²

СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ КУТА НАХИЛУ САМОБАЛАНСУЮЧОГО РОБОТА

Стаття присвячена розгляду системи стабілізації кута нахилу самобалансуючого робота. Об'єктом дослідження є самобалансуючі роботи, а предметом – системи стабілізації їхнього кута нахилу. Розглянуті принципи роботи та розвиток алгоритмів, які дозволяють роботу автоматично підтримувати стабільність при зміні кута нахилу. У статті проаналізовані різні рішення, що використовуються для

¹ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, gleb.chernysh.01@gmail.com

² канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-8108-2575, savenko.olja@gmail.com

створення системи стабілізації, і їхні переваги та недоліки. Наведена математична модель, у якій самобалансуючий робот представлений як перегорнутий маятник, тобто двоколісний транспортний засіб врівноважує себе у вертикальному положенні відносно землі. У якості регулятора запропонований LQR-регулятор, який забезпечує оптимальне керування замкнутою системою. Працездатність моделі та запропонованої системи стабілізації перевірені за допомогою імітаційного моделювання. Наведений приклад практичної реалізації робота та обрані основні компоненти.

Ключові слова: самобалансуючий робот, математична модель, перегорнутий маятник, лінійно-квадратичний регулятор, ПД-регулятор, гіроскоп, система стабілізації, стійкість, імітаційне моделювання.

H.O. Chernysh, O.S. Savenko. The angle stabilization system of the self-balancing robot.

The article is devoted to the consideration of the tilt angle stabilization system of a self-balancing robot. The object of research is self-balancing robots, and the subject is systems for stabilizing their tilt angle. A comprehensive analysis of the principles and algorithms used to ensure the stability of the robot when the tilt angle is changed is presented. The technical solutions underlying the stabilization system were studied and their effectiveness in relation to maintaining the robot in a vertical position was analyzed. A mathematical model is presented in which the self-balancing robot is represented as an inverted pendulum, i.e. a two-wheeled vehicle balances itself in a vertical position relative to the ground. It is assumed that the structure moves without friction. The main equations describing the movement of the balancing robot, taking into account the dynamics of the pendulum and the wheel, were obtained. As a regulator, the LQR regulator is proposed, which provides optimal control of a closed-loop system. The workability of the model and the proposed stabilization system was verified using simulation modeling. As a result of simulated modeling, oscillograms were obtained, which demonstrate that after an exciting effect, the system stabilizes and enters an equilibrium state. A controllability test was performed, which showed that the proposed controller can effectively control the system. Controllability ensures that a system can be subjected to a control signal in order to achieve the desired behavior. An example of the practical implementation of the robot and selected main components are presented.

Key words: self-balancing robot, mathematical model, inverted pendulum, linear quadratic controller, PID controller, gyroscope, stabilization system, stability, simulation modeling.

Постановка проблеми. При сучасному розвитку робототехніки і автоматизації, особливу увагу приділяють розробці та оптимізації самобалансуючих роботів, які можуть ефективно функціонувати в різноманітних умовах. Однак, не зважаючи на величезний прогрес у цьому напрямку, однією з ключових складнощів залишається досягнення ефективної системи стабілізації кута нахилу таких роботів.

Потреба у більш глибокому розумінні та вдосконаленні систем стабілізації кута нахилу самобалансуючих роботів обумовлена необхідністю уникнення несподіваних втрат стійкості та підвищення їхньої адаптивності до різних умов експлуатації. Проблема полягає в тому, щоб розробити та вдосконалити системи стабілізації, які забезпечать найвищу ступінь точності та надійності утримання вертикального положення навіть в умовах змінного середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для самобалансуючих роботів використовують різні типи регуляторів, що призначені для забезпечення стабільності та управління їхнім рухом. Одними з найпоширеніших та простих в реалізації є регулятори з лінійним законом регулювання [1]. До них відноситься, наприклад, ПД-регулятор. Значення коефіцієнта підсилення ПД-регулятора легко оцінити, оскільки система розглядається як чорний ящик і потребує лише значення похибки регулювання. Однак при використанні ПД-регулятора робиться припущення, що керована система є лінійною. Хоча, будучи загалом нелінійною, система є лінійною в області

$(\theta \pm 3^\circ)$ навколо точки рівноваги. Якщо робот працює в цій лінійній області, ПД-регулятор здатний стабілізувати кут нахилу [2].

Налаштування ПД-регулятора найчастіше виконується методом проб і помилок, що є виснажливим і вимагає багато експериментів. Тому у роботі [3] розглянутий метод автоматичного налаштування для ПД-регулятора. За допомогою частотного методу Циглера-Никольса був розроблений ПД-регулятор зі зменшеною похибкою в сталому режимі, часом наростання та часом стабілізації, хоча й з більшим перерегулюванням.

Але для керування системою за межами лінійного діапазону ПД-регулятора недостатньо. У статті [4] ПД-регулятор поєднується з лінійно-квадратичним регулятором (linear-quadratic regulator, LQR) для розширення робочого діапазону системи за межі лінійної області. Результати є багатообіцяючими, оскільки робот здатний знову стабілізуватися після досягнення кута нахилу в двадцять градусів. Але у статті не надано чіткої інформації про те, як поєднуються між собою два регулятора. У статті [5] представлені подібні результати при використанні лише LQR-регулятора без поєднання з ПД-регулятором. Але наведені результати використання LQR-регулятора лише для симуляції, а не для реального робота.

Врахування тертя та інерції при русі самобалансуючого робота запропоновано в [6]. З використанням моделей тертя Стрибека, Кулона та в'язкого тертя моделюється робота самобалансуючого робота. На основі цієї моделі представлено регулятор компенсації тертя у режимі ковзання (sliding mode controller, SMC). Розроблений регулятор забезпечує роботу за межами лінійної області, де в одному експерименті робот зміг стабілізуватися з початковим кутом 27 градусів і підтримувати баланс.

Більш складні регулятори, які оптимально працюють за межами лінійного діапазону, описані в [7, 8]. У роботі [7] використаний регулятор з прогнозуючими моделями (model predictive control, MPC), який працює краще, ніж автоматично налаштований ПД-регулятор. Адаптивне управління з еталонною моделлю (model referencing adaptive control, MRAC) використовується при моделюванні в роботі [8]. Експерименти з моделюванням роботи контролера показують, що він може впоратися з нахилом до двадцяти градусів з невеликим перерегулюванням. Тим не менш, і MPC, і MRAC методи вимагають, щоб точна математична модель робота була закладена у сам контролер.

Таким чином, існують різні способи стабілізації кута нахилу самобалансуючого робота, починаючи від простих контролерів, таких як ПД, і закінчуючи більш складними контролерами. Але варто підкреслити, що усі роботи з використанням складних контролерів завжди стосуються моделювання, а не фізичної реалізації.

Мета роботи – створення математичної моделі самобалансуючого робота та розробка системи управління для забезпечення стійкості та точного керування кутом нахилу.

Виклад основного матеріалу. Усі двоколісні балансуючі пристрої, незалежно від їхніх розмірів і ваги, для опису динамічних характеристик використовують класичні математичні рівняння. З метою спрощення розробки регуляторів та алгоритмів управління необхідно створити математичну модель об'єкта з можливістю її налаштування під конкретний балансуючий робот.

На рис. 1 зображена схема балансуючого робота, яка за своєю структурою представляє собою перегорнутий маятник на колесі. При цьому вважаємо, що дана конструкція рухається без тертя. Маятник представляє собою масу m_p , відхилену від вертикалі на кут θ , прикріплену на невагомий стрижень довжиною L до колеса. При цьому колесо розглядається як кільце радіусом r і масою m_w . На колесо діє момент двигун M_k , який обертає колесо на кут z від його початкового положення.

Для опису системи використане рівняння Ейлера-Лагранжа:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} (q, \dot{q}) = \tau, \quad (1)$$

де q – узагальнена координата, що описує положення системи у просторі; \dot{q} – похідна за часом від узагальнених координат; τ – узагальнені сили.

Положення центра колеса через кут повороту:

$$x = r \cdot z, \tag{2}$$

де z – відхилення центра мас колеса від вертикальної осі; r – радіус колеса, м.

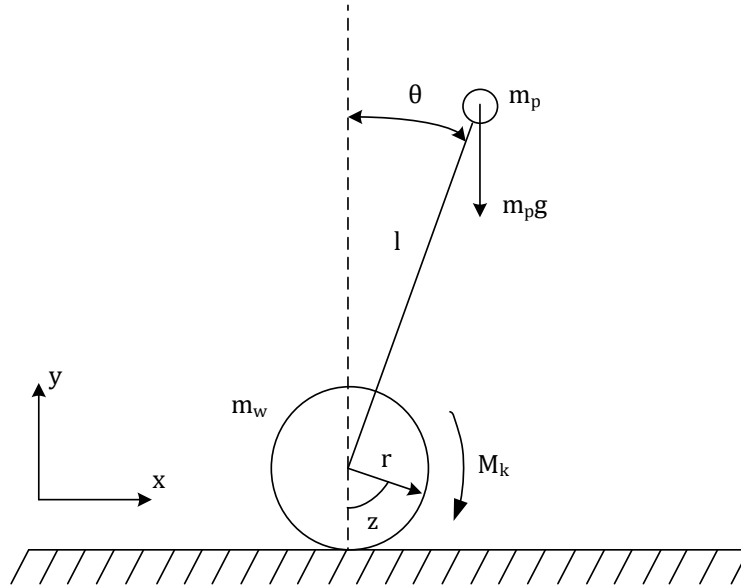


Рис. 1 – Схема самобалансуючого робота

Координати центра мас маятника знаходяться як:

$$x_g = x + l \sin(\theta), \tag{3}$$

$$y_g = l \cos(\theta), \tag{4}$$

де l – довжина маятника, яка визначає відстань від точки підвіса до центру мас маятника, м; θ – кут повороту маятника.

Кінетична енергія маятника:

$$T_p = \frac{1}{2} (m_p \dot{y}_g^2(t) + m_p \dot{x}_g^2(t)), \tag{5}$$

де m_p – маса робота, кг.

Кінетична енергія колеса:

$$T_w = \frac{1}{2} (m_w \dot{x}^2(t) + m_w r^2 \dot{z}^2(t)), \tag{6}$$

де m_w – маса колеса, кг.

Повна кінетична енергія:

$$T = \frac{1}{2} m_p l^2 \dot{\theta}^2 \sin^2(\theta) + \frac{1}{2} m_p r^2 \dot{z}^2 + \frac{1}{2} m_p l^2 \dot{\theta}^2 \cos^2(\theta) + m_w r^2 \dot{z}^2 + \frac{1}{2} m_p l^2 \dot{\theta}^2. \tag{7}$$

Повна потенціальна енергія дорівнює:

$$U = m_p g l \cos(\theta) + m_w g r z, \tag{8}$$

де g – прискорення вільного падіння.

Функція Лагранжа L :

$$L = T - U = \frac{1}{2} m_p l^2 \dot{\theta} \sin(\theta)^2 + \frac{1}{2} m_p r^2 \dot{z}^2 + \frac{1}{2} m_p l^2 \dot{\theta}^2 \cos(\theta)^2 + m_w r^2 \dot{z}^2 + \frac{1}{2} m_p l^2 \dot{\theta}^2 - m_p g l \cos(\theta). \quad (9)$$

В якості узагальнених координат прийняті кути повороту колеса і маятника. Тоді вектор узагальнених координат представляється у вигляді:

$$q = \begin{pmatrix} z \\ \theta \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Вектор узагальнених сил:

$$\tau = \begin{pmatrix} M_k \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

де M_k – момент дії двигуна на колесо, Н·м.

Підставивши в рівняння Лагранжа похідні, отримаємо рівняння руху:

$$r \cos(\theta) l m_p \ddot{\theta} + r^2 (m_p + 2m_w) \ddot{z} - r \sin(\theta) \theta^2 l m_p = M_k, \quad (12)$$

$$\ddot{z} \cos(\theta) l m_p r - m_p g l \sin(\theta) + 2 m_p l^2 \ddot{\theta} = 0. \quad (13)$$

Тоді основні рівняння, що описують рух балансуєчого робота з врахуванням динаміки маятника та колеса:

$$\ddot{z} = \frac{-r \cos(\theta) l m_p \ddot{\theta} + r \sin(\theta) \theta^2 l m_p + M_k}{r^2 (m_p + 2m_w)}, \quad (14)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{-\ddot{z} \cos(\theta) l m_p r + m_p g l \sin(\theta)}{2 m_p l^2}. \quad (15)$$

Через складнощі з підбором коефіцієнтів ПІД-регулятора був обраний лінійно-квадратичний регулятор, який забезпечує оптимальне керування замкнутою системою при мінімізації квадратичного функціоналу якості. На відміну від ПІД-регулятора, при формуванні сигналів зворотного зв'язку квадратичний регулятор не обчислює похідні, а використовує змінні стани системи.

Для побудови регулятора виконана лінеаризація отриманих рівнянь руху (12)-(13) в околиці нульового положення маятника:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = AX + BM_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-m_p g}{r(m_p + 4m_w)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{g(m_p + 2m_w)}{l(m_p + 4m_w)} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \\ \dot{z} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2}{r^2(m_p + 4m_w)} \\ 0 \\ \frac{1}{lr(m_p + 4m_w)} \end{bmatrix} M_k, \quad (16)$$

де A – матриця стану системи, яка відображає динаміку системи; B – матриця входу системи, що представляє вплив керуючого імпульсу на стани системи.

Для перевірки системи на керованість потрібно виконання наступної умови:

$$\det(B|AB|A^2B|A^3B) = \frac{g^2}{l^4 r^6 (m_p + 4m_w)^4} > 0. \quad (17)$$

Перевірка динамічної системи на керованість після лінеаризації необхідна, оскільки вона дозволяє переконатися, що в околі рівноважного стану системи існує керування, яке зможе перемістити систему з цього стану в будь-який інший бажаний стан. Керованість гарантує, що систему можна піддати впливу сигналу керування з метою досягнення необхідної поведінки.

Коректність запропонованої моделі та обраних алгоритмів керування в динаміці перевірена в графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink пакета Matlab. Моделювання проводилось для наступних параметрів системи: $m_p = 0,3$ кг; $m_w = 0,02$ кг; $l = 0,5$ м; $r = 0,035$ м; $g = 9,804$ м/с². На рис. 2 представлений загальний вигляд побудованої моделі.

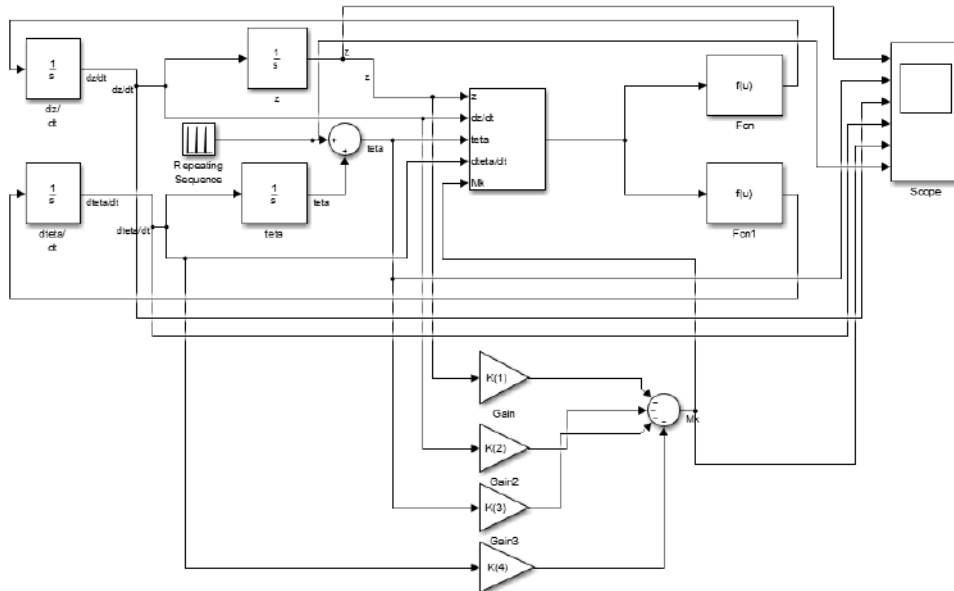


Рис. 2 – Загальний вигляд імітаційної моделі

В якості збуджуючої дії було використане джерело Repeating Sequence, осцилограма зміни сигналу наведена на рис. 3а. Осцилограми зміни параметрів побудованої системи представлені на рис. 3б-г. Отримані осцилограми демонструють, що після збуджуючого впливу система стабілізується та виходить у рівноважний стан.

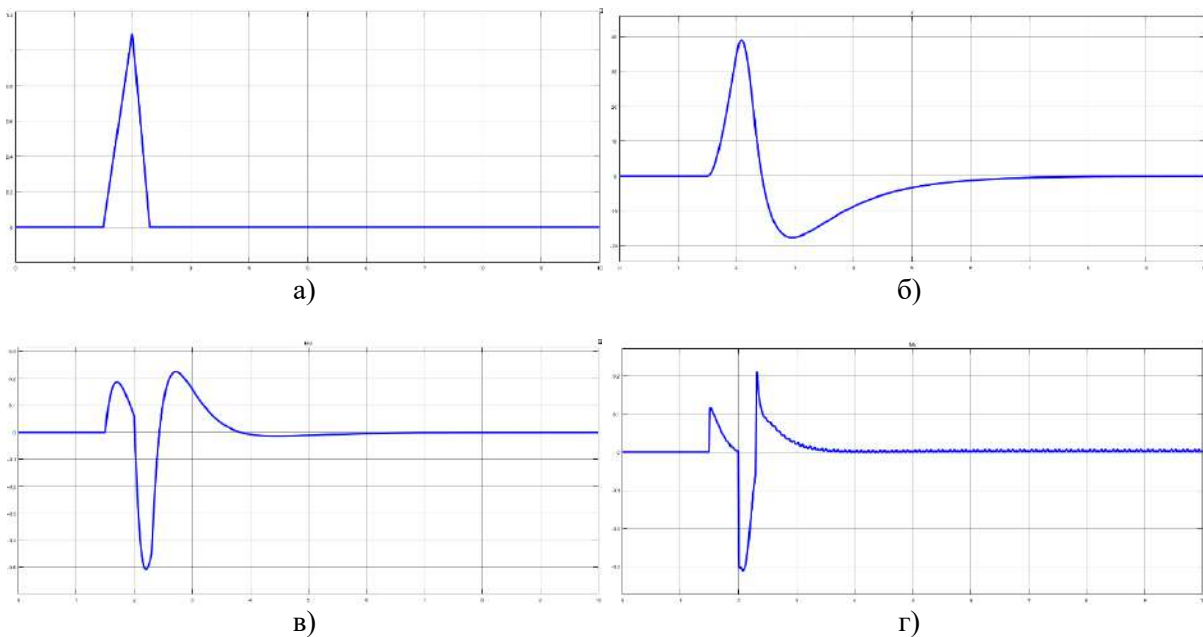


Рис. 3 – Осцилограма зміни: а) вихідного сигналу блоку Repeating Sequence; б) кута відхилення центра мас колеса z ; в) кута повороту маятника θ ; г) моменту дії двигуна на колесо M_k

Перевірка керованості системи згідно з виразом (17) показала, що система є керованою, отже, запропонований регулятор може ефективно управляти системою.

На рис. 4 наведений варіант практичної реалізації самобалансуючого робота.

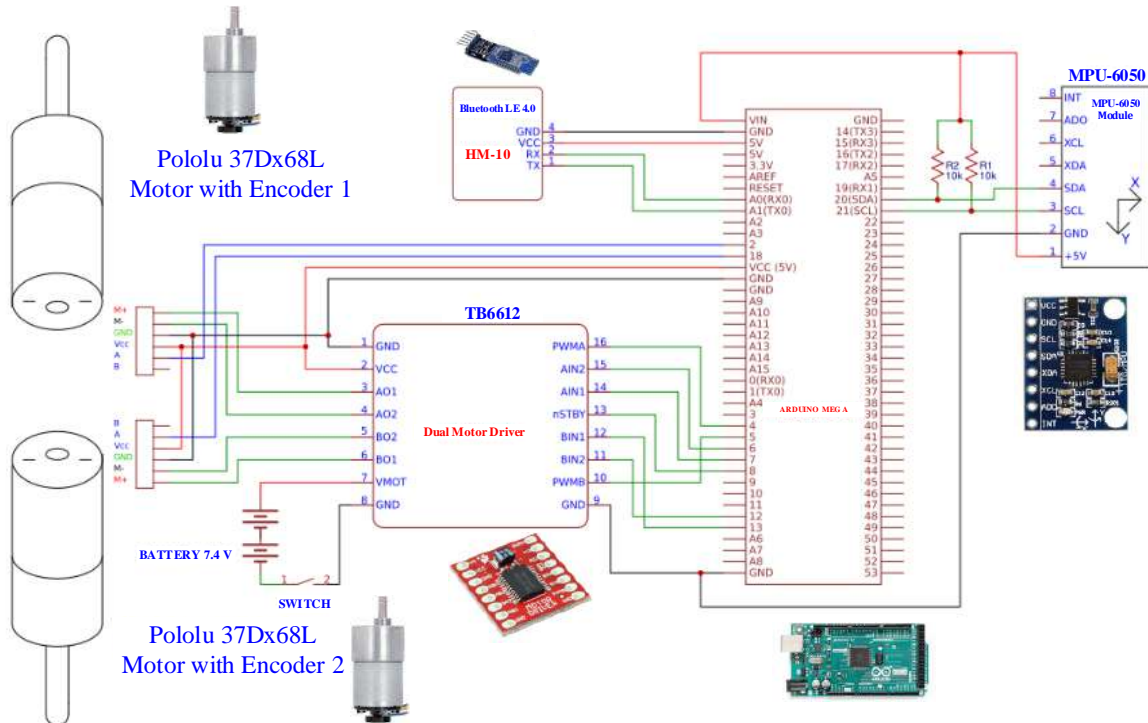


Рис. 4 – Принципова схема самобалансуючого робота

Обрані наступні компоненти: плата Arduino Mega 2560, яка побудована на мікроконтролері ATmega2560, акселерометр і гіроскоп MPU-6050, драйвер TB6612, Bluetooth модуль HM-10 та мотор з енкодером Pololu 37Dx68L. Arduino Mega виступає у ролі керуючого «мозку» системи, взаємодіючи з датчиками MPU-6050 для вимірювання кутів нахилу та кутової швидкості. Драйвер TB6612 забезпечує управління двигунами, а мотори з енкодерами Pololu 37Dx68L виконують функцію приводу, забезпечуючи необхідну потужність та зворотний зв'язок для ефективного балансування робота. Bluetooth модуль може бути використаний для зв'язку із зовнішніми пристроями чи системами, дозволяє здійснювати надсилання налаштувань, відлагодження та моніторинг робота та отримувати віддалений доступ до системи самобалансування для виконання діагностики, відлагодження та вирішення можливих проблем.

Висновки

1. Наведена математична модель самобалансуючого робота, у якій робот розглядається як перегорнутий маятник. Отримані основні рівняння, що описують рух балансуєчого робота з врахуванням динаміки маятника та колеса.
2. На основі математичної моделі створена імітаційна модель в графічному середовищі імітаційного моделювання Simulink пакета Matlab, яка дозволяє перевірити роботу системи у динаміці.
3. У якості регулятора запропонований LQR-регулятор, який забезпечує оптимальне керування замкнутою системою.
4. У результаті імітаційного моделювання отримані осцилограми, які демонструють, що після збуджуючого впливу система стабілізується та виходить у рівноважний стан. Виконана перевірка на керованість, яка показала, що запропонований регулятор може ефективно управляти системою.
5. Наведений приклад практичної реалізації самобалансуючого робота на базі плати Arduino Mega. Також виконаний вибір інших компонентів робота.

Перелік використаних джерел:

1. Man Chan R.P., Stol K.A., Halkyard C.R. Review of modelling and control of two-wheeled robots. *Annual Reviews in Control*. 2013. Vol. 37. Iss. 1. Pp. 89-103. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2013.03.004>.
2. Azliy Bin Junoh S. Two-wheeled balancing robot controller designed using PID. 2015. 61 p.
3. Saleem O., Mehmood-ul Hasan K., Anas Imtiaz M. Attitude control and stabilization of a two-wheeled self-balancing robot. *Control Engineering and Applied Informatics*. 2015. Vol. 17. № 3. Pp. 98-104.
4. Sun L., Gan J. Researching of two-wheeled self-balancing robot base on LQR combined with PID. *2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications*, Wuhan, China, 22-23 May 2010. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWISA.2010.5473610>.
5. Uddin N., Nugroho T.A., Pramudito W.A. Stabilizing two-wheeled robot using linear quadratic regulator and states estimation. *2nd International conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE)*, Yogyakarta, Indonesia, 01-02 November 2017. Pp. 229-234. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICITISEE.2017.8285501>.
6. Dai F. A two-wheeled inverted pendulum robot with friction compensation. *Mechatronics*. 2015. Vol. 30. Pp. 116-125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2015.06.011>.
7. Optimal controller design for self-balancing two-wheeled robot system / Zad H.S., Ulasyar A., Zohaib A., Hussain S.S. *International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*, Islamabad, Pakistan, 19-21 December 2016. Pp. 11-16. DOI: <https://doi.org/10.1109/FIT.2016.011>.
8. Uddin N. Adaptive control system design for two-wheeled robot stabilization. *12th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC)*, Yogyakarta, Indonesia, 12-13 March 2018. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/SEATUC.2018.8788880>.

References:

1. R.P. Man Chan, K.A. Stol, and C.R. Halkyard, «Review of modelling and control of two-wheeled robots», *Annual Reviews in Control*, vol. 37, iss. 1, pp. 89-103, 2013. doi: **10.1016/j.arcontrol.2013.03.004**.
2. S. Azliy Bin Junoh, *Two-wheeled balancing robot controller designed using PID*, 2015.
3. O. Saleem, K. Mehmood-ul Hasan, and M. Anas Imtiaz, «Attitude control and stabilization of a two-wheeled self-balancing robot», *Control Engineering and Applied Informatics*, vol. 17, № 3, pp. 98-104, 2015.
4. L. Sun, and J. Gan, «Researching of two-wheeled self-balancing robot base on LQR combined with PID», in Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications, Wuhan, China, 2010, pp. 1-5. doi: **10.1109/IWISA.2010.5473610**.
5. N. Uddin, T.A. Nugroho, and W.A. Pramudito, «Stabilizing two-wheeled robot using linear quadratic regulator and states estimation», in Proceedings of the 2nd International conferences on Information Technology, Information Systems and Electrical Engineering (ICITISEE), Yogyakarta, Indonesia, 2017, pp. 229-234. doi: **10.1109/ICITISEE.2017.8285501**.
6. F. Dai, «A two-wheeled inverted pendulum robot with friction compensation», *Mechatronics*, vol. 30, pp. 116-125, 2015. doi: **10.1016/j.mechatronics.2015.06.011**.
7. H.S. Zad, A. Ulasyar, A. Zohaib, and S.S. Hussain, «Optimal controller design for self-balancing two-wheeled robot system», in Proceedings of the International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT), Islamabad, Pakistan, 2016, pp. 11-16. doi: **10.1109/FIT.2016.011**.
8. N. Uddin, «Adaptive control system design for two-wheeled robot stabilization», in Proceedings of the 12th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC), Yogyakarta, Indonesia, 2018, pp. 1-5. doi: **10.1109/SEATUC.2018.8788880**.

Рецензент: В.І. Мірошніченко

канд. техн. наук, доц., ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Стаття надійшла 10.10.2023

Стаття прийнята 08.11.2023

263 ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 614.89:001.894.01.012.3

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300066

© Кухар В.В.¹, Кас'яненко С.Ф.², Бурко В.А.³**УДОСКОНАЛЕННЯ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ВІД
ПАДІННЯ З ВИСОТИ МЕТОДАМИ ФОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ ТА
КОНТРОЛЬНИХ ЗАПИТАНЬ**

Мета дослідження – удосконалити засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) від падіння з висоти. В процесі дослідження виявити основні причини невикористання працівниками ЗІЗ від падіння з висоти, проаналізувати загальні запропоновані вимоги діючого законодавства України. Проаналізувати публікації, які стосуються даної проблеми, та розглянути аналогічні запропоновані шляхи удосконалення існуючих систем. Методами фокальних об'єктів та контрольних запитань запропоновано рішення по удосконаленню поясу запобіжного лямкового шлямком об'єднання його функцій та функцій захисної куртки.

Ключові слова: падіння з висоти, засоби індивідуального захисту, пояс запобіжний лямковий, працівники, які працюють на висоті, удосконалення, метод фокальних об'єктів, метод контрольних запитань.

V.V. Kukhar, S.F. Kasianenko, V.A. Burko. Improvement of individual protection equipment against falls from a height using the methods of focal objects and control questions. The article discusses the issues of improving methods of individual protection against falls from a height using the methods of focal objects and control questions. Work at heights comes to work with increased insecurity, and behind the statistics there are great indicators of viral injuries both in Ukraine and in the world in many areas of activity. Specialists from all over the world are working hard on the problem of reducing the number of viral injuries in the workplace. During the study, the main reasons for non-compliance with fall protection PPE by workers will be identified, and an analysis of the general requirements of the current legislation of Ukraine will be conducted. Publications addressing this issue will be reviewed, and similar proposed methods for enhancing existing systems will be examined. Using the methods of focal objects and control questions, a solution is proposed to improve the safety harness by combining its functions with those of a protective jacket. The method of focal objects is a fairly common heuristic method for improving the processes of objects, but it is not universally accepted for monitoring nutritional defense and improving the methods of individual protection. A review of the literature showed positive results from the use of the focal lens method with a high level of objective refinement, design processes and non-standard and associative design. The methods developed in the research made it possible to refine the webbing side belt, replacing its design with the same purpose. The duties of the guard, who will be in charge of the worker and will stand up to him for recognition when he rises to heights, have been thoroughly confirmed, in order to change the certainty that the worker will not be taken advantage of by him.

Key words: fall from height, personal protective equipment, safety harness, workers at height, improvement, focal objects method, control questions method.

¹ д-р техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com

² магістрант, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, serhiy.kasyanenko@mipolytech.education

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-7384-4226, burko_v_a@pstu.edu

Постановка проблеми. Роботи на висоті відносяться до робіт з підвищеною небезпечністю та за статистикою мають великі показники виробничого травматизму як в Україні, так і в світі в багатьох сферах діяльності. Над проблемою зниження виробничого травматизму при виконанні робіт на висоті працюють спеціалісти зі всього світу, про що свідчать результати наукових публікацій [1-4]. Проте, статистичні показники виробничого травматизму Державної служби України з питань охорони праці за період 2021-2023 рр. (див. рис. 1 та рис. 2) залишаються без особливих змін та свідчать про займання смертельними випадками в наслідок падіння з висоти «сумного» другого місця у загальному статистичному переліку [5].

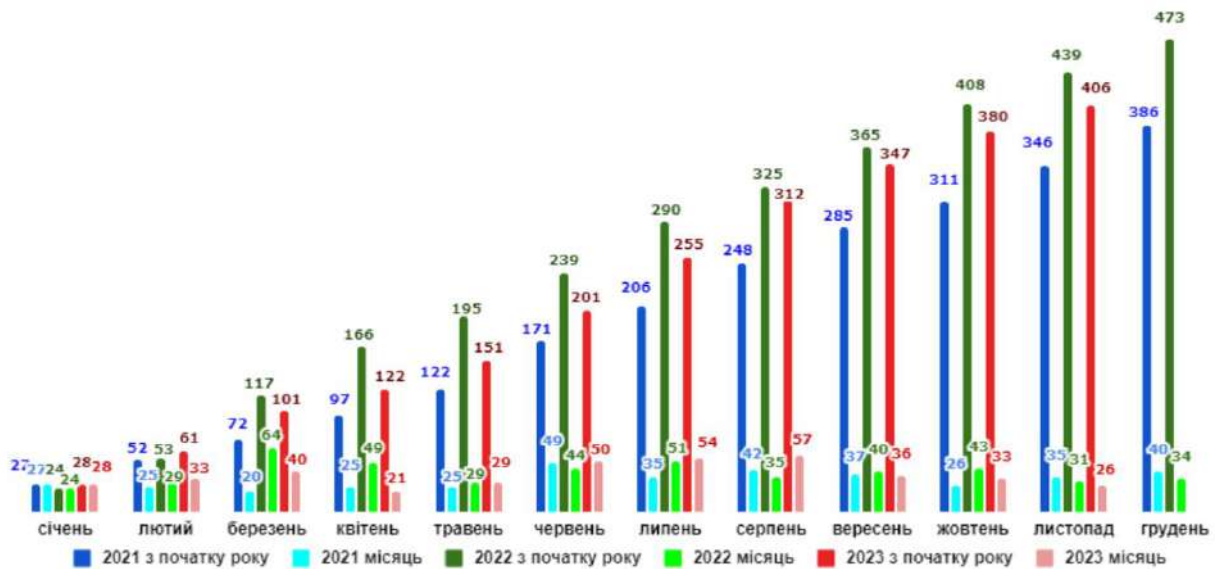


Рис. 1 – Стан виробничого травматизму зі смертельними наслідками в Україні у 2021-2023 рр. (кількість осіб) [5]

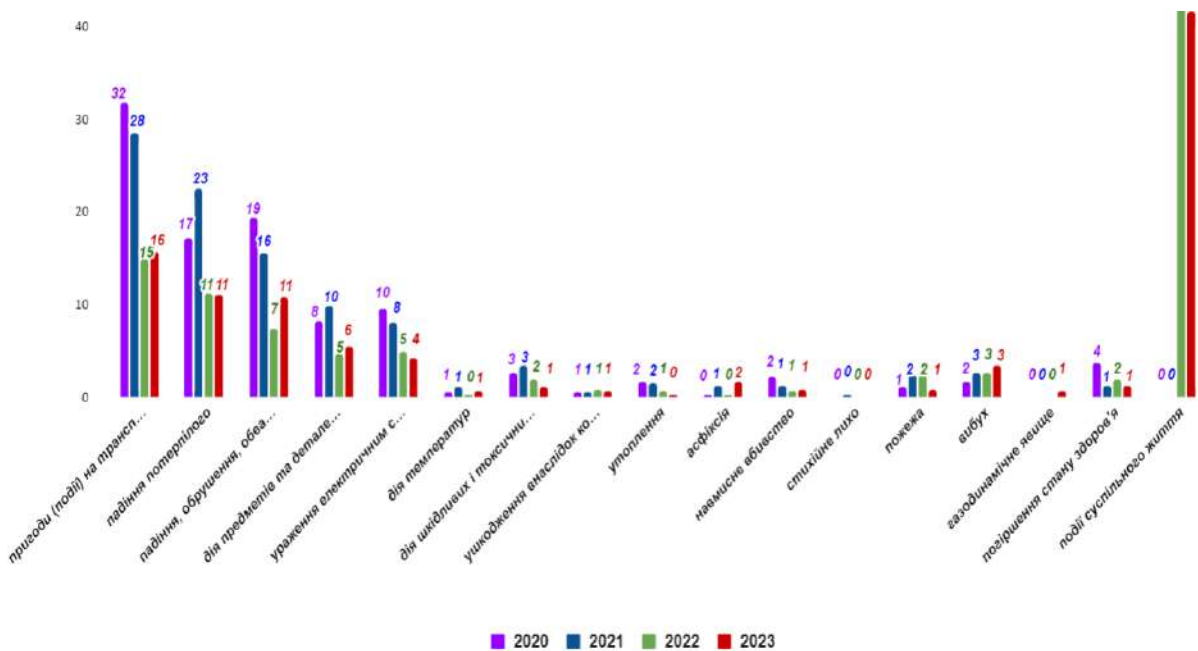


Рис. 2 – Динаміка подій, що призвели до нещасних випадків зі смертельним наслідком за 11 місяців 2022–2023 рр. (% від загальної кількості загиблих) [5]

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зменшення ризиків виробничого травматизму при виконанні робіт на висоті (далі РНВ) всесторонньо розглядалося багатьма авторами, при цьому особлива увага приділялася використанню запобіжних поясів [6-12]. У вказаних працях враховували фактори розробки безпечної технології виконання робіт, вибору та модернізації засобів доступу на висоту, характеристик матеріалів поясів, навчання персоналу і відпрацювання практичних навичок виконання робіт. У дослідженнях [3, 13-15] запропоновано проводити оцінку ризиків перед виконанням робіт різноманітними методиками, аналіз виконання робіт та різні види контролю застосування працівниками ЗІЗ при роботі на висоті. При цьому слід відзначити обмежену кількість робіт, які стосуються зміни та/або модернізації конструкцій ЗІЗ для РНВ, а саме лямкових запобіжних поясів, що запропоновувались би для доповнення вимог [16] стосовно конструкцій та ергономіки.

В процесі дослідження було проаналізовано публікації автоматизованих перевірок безпечності будівельних моделей та графіків під час планування та проектування будівництва [17], використання вбудованих у смартфон акселерометрів для виявлення ознак падіння [18], методи сканування Python для визначення використання працівниками ЗІЗ, які виконують РНВ [19], більшість розглянутих наукових публікацій направлені на здійснення контролю за виконанням робіт, а не на самому виконанні. При виконанні РНВ найефективнішими способами забезпечення безпеки є уникнення виконання робіт або мінімізація перебування працівника на висоті. Якщо ми не можемо це змінити, в нас залишається використання ЗІЗ, які повинні забезпечувати/унеможливити падіння працівника, тобто працівник повинен знаходитись в безперервному страхуванні при підйомі, виконанні та спуску з висоти. Якщо працівник не використовує ЗІЗ, це означає, що цей ЗІЗ робітнику незручний та заважає виконувати роботу або відсутній в потрібний час на робочому місці. В ДСТУ EN 363:2017 [16] в загальних вимогах до систем обмежування, утримування, канатного доступу, зупинення падіння та порятунку однією з вимог є «ергономічні рекомендації, наприклад, відповідні ремені та кріпильні елементи для мінімізації дискомфорту та стресу організму». Тобто якщо працівник його не використовує, то необхідна модернізація ЗІЗ. В дослідженні китайських вчених [20], що присвячено аналізу критичних факторів використання чи невикористання засобів індивідуального захисту будівельниками, також підкреслено, що факти незастосування ЗІЗ мають вирішальне значення для розробки ефективних стратегій, політики та заходів щодо розширення використання працівниками відповідних ЗІЗ на робочих місцях. В огляді [21], що присвячено питанням падіння з висоти у галузі будівництва, австралійськими дослідниками розглянуто 297 статей і виділено провідні чинники настання нещасних випадків, серед яких на другому місці індивідуальні характеристики, які включають людську поведінку (неправильна оцінка, ставлення, небезпечна поведінка та недбалість тощо), до якої слід віднести також прийняття рішення про застосування ЗІЗ.

Метою даної роботи є вдосконалення засобів індивідуального захисту для виконання робіт на висоті, а саме удосконалення конструкції лямкового запобіжного поясу для покращення його зручності й функціональності, забезпечення функції постійності перебування з працівником та покращення виконання основної функції – захисту від падіння.

Виклад основного матеріалу. Метод фокальних об'єктів (МФО) є достатньо розповсюдженим евристичним методом удосконалення процесів чи об'єктів [22], але він не є загальноприйнятим для дослідження питань охорони праці чи удосконалення ЗІЗ. При проведенні дослідження було розглянуто основні результати статті [23], в якій показано позитивні результати використання методу фокальних об'єктів при вирішенні завдань удосконалення об'єктів, процесів та проектування за допомогою нестандартного та асоціативного мислення.

Використання МФО для вдосконалення. Фокальний об'єкт: Пояс запобіжний лямковий (рис. 3). В якості випадкових об'єктів (та їх властивостей) обрано: фрак (має вузькі фалди); органайзер (відзначається багатофункціональністю); крісло (має підлокітники, зручне для відпочинку); лінь (характеризується бажанням виконувати меншу кількість операцій); час (має характеристики плину, спливає). Шляхом використання вільних асоціацій або навіть зворотних асоціацій отримуємо нові сполучення властивостей, які потрібно мати поясу запобіжному лямковому.

Пояс: (1) Комбінований; (2) Зручний; (3) Завжди з робітником; (4) Швидко вдягається.

Для удосконалення конструкції пропонується удосконалення монтажного поясу розміщенням у захисну куртку. Для цього необхідно:

- в захисну куртку вшити лямки поясу (зробити багатофункціональну куртку) з виводом двох анкерних точок на грудях та між лопатками;
- конструктивно виконати облегшений кістяк ременів, який буде вшитий до куртки, щоб працівник не відчував дискомфорт при його використанні;
- з двома вшитими ременями ззаду (хвостами фрака), які перед виконанням робіт на висоті одним кінцем би відстібувались від задньої частини куртки та заводились би через ноги, охоплюючи їх, та кріпились за передню частину куртки;
- в захисних куртках всі виконують роботи, вдягнувши їх на початку зміни, а перед виконанням робіт треба йти за поясом та вдягати його, тобто завдяки вдосконаленню не треба буде витрачати час на доставку поясу та його вдягання, що багатьом виконувати ліньки.

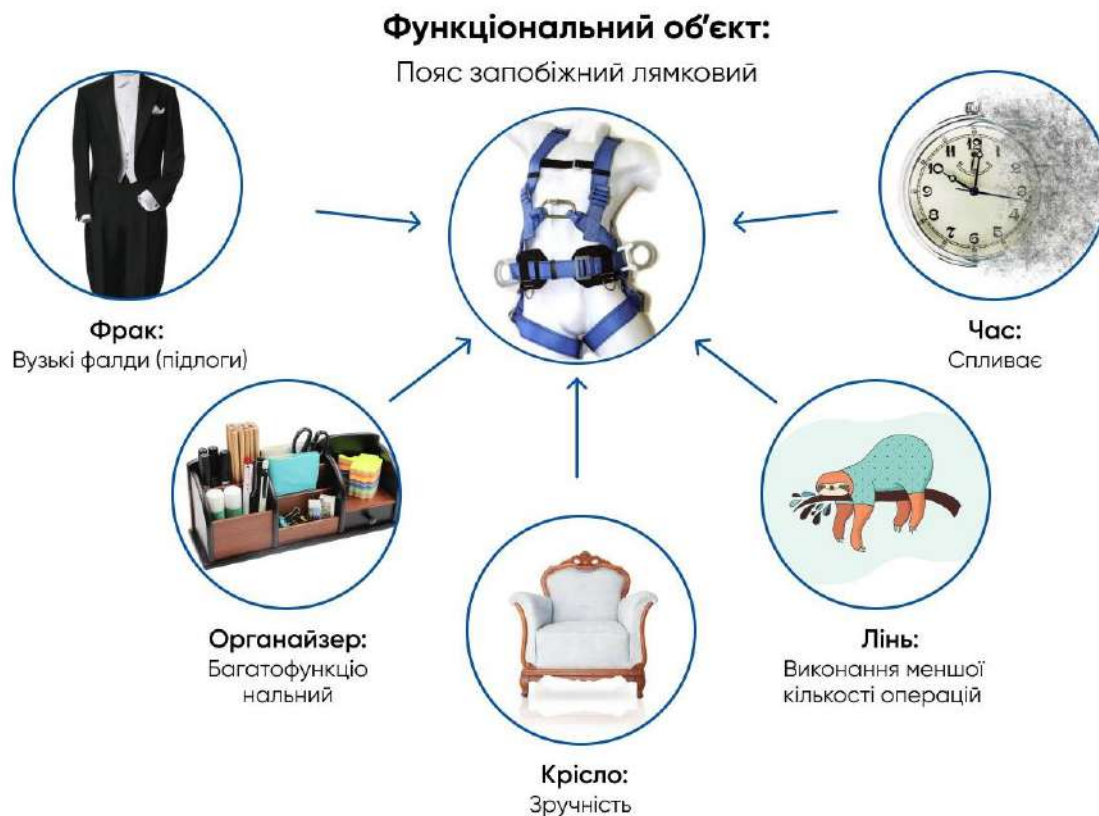


Рис. 3 – Фокальний об'єкт, випадкові об'єкти та етапи застосування методу

Таким чином, змінюючи тип ЗІЗ шляхом об'єднання властивостей двох старих об'єктів, ми отримуємо новий об'єкт, який виконує декілька захисних функцій.

Метод контрольних запитань (МКЗ). Винахідники намагалися сформулювати такі списки питань, які дозволили б інтенсифікувати процес мислення для вирішення поставлених задач, тому на сьогоднішній день раціональним шляхом є уточнення постановки задачі з використанням спеціально сконструйованої сукупності питань [24]. Серед відомих переліків запитань отримали розповсюдження контрольні запитання за списком А. Осборна та Т. Ейлоарта. Використовували вибірково запитання і записували відповіді на них.

Використання списку запитань за А. Осборном:

1. *Яке нове застосування технічному об'єктові Ви можете запропонувати? Чи можливі нові способи застосування? Як модифікувати відомі способи застосування?*

Інтегрувати лямки поясу в захисну куртку, вшити (зробити багатофункціональну куртку). Об'єднати функції куртки та лямкового поясу. Тим самим змінивши спосіб застосування, з цільового використання на комбіноване.

2. Чи можливо розв'язати винахідницьку задачу шляхом пристосування, спрощення, скорочення? Що нагадує даний технічний об'єкт? Чи викликає аналогія нову ідею? Чи відомі в минулому аналогічні проблемні ситуації, які можна використати? Що можна скопіювати? Який технічний об'єкт необхідно випереджати?

З двох засобів захисту зробити один, спростити спосіб застосування, вдягання. Пояс нагадує підтяжки для підтримки штанів, в нашій ситуації працівника. Проблеми в використанні: перед виконанням робіт треба йти або готувати заздалегідь та вдягати його.

3. Що можна збільшити в технічному об'єкті? Що можна приєднати? Чи можливим є збільшення терміну використання пристрою, взаємодії? Чи є потреба збільшувати частоту, розміри, міцність, підвищити якість? Чи можливо приєднати новий інгредієнт, продублювати? Чи можливі мультиплікації робочих органів чи інших елементів? Чи є доцільним збільшення, гіперболізація елементів чи всього об'єкта?

При об'єднанні двох засобів захисту технічний об'єкт буде інший. Захисну куртку, запобіжний пояс з двома ременями ззаду, які перед виконанням робіт на висоті одним кінцем будуть відстібуватись від задньої частини куртки та заводитись через ноги, охоплюючи їх, закріплюватись за передню частину куртки.

4. Що можна в технічному об'єкті зменшити або замінити? Чи можна що-небудь уцілювати, стиснути, згустити, сконденсувати, застосувати методом мініатюризації, вкоротити, звузити, відокремити, роздрібнити?

Змінити конструктив запобіжного лямкового поясу, завдяки вшиттю лямок поясу в куртку, при падінні працівника зміниться розподіл динамічних навантажень на тіло працівника (не лямки будуть врізатись навколо плечей та ніг, а вся захисна куртка буде охоплювати працівника, якщо ремені вшити вздовж рукавів, поясу та навхрест спини). Довжина ременів зменшиться, отже стане легше. Недоліком буде проведення випробувань куртки/поясу, з'явиться необхідність розробки методики випробувань. Також необхідно буде розглянути для яких саме робіт та у якій сфері використання даного об'єкту актуальне.

5. Що в технічному об'єкті можна змінити? Що і наскільки можна замінити в ньому: використати інший інгредієнт, матеріал, процес, джерело енергії, розташування, колір, звук, освітлення?

Для досягнення мети необхідно об'єднати два об'єкта захисну куртку та лямковий пояс, при цьому необхідно замінити матеріал куртки на більш міцніший, зменшити кількість швів при крою куртки, що також вплине на підвищення міцності. Зменшиться довжина ременів.

Використання списку запитань за Т. Ейлоартом:

1. Сформулювати задачі зрозуміло. Спробувати нові формулювання. Визначити другорядні та аналогічні задачі. Виділити головні.

Модернізувати засоби захисту для виконання робіт на висоті. Спростити існуючі засоби.

2. Вказати недоліки вже відомих розв'язків, їх основні принципи, нові припущення.

Для виконання робіт на висоті використовуються лямкові запобіжні пояси, недоліками яких є незручність у використанні та в їх вдяганні.

3. Навести фантастичні, біологічні, економічні, молекулярні та інші аналогії.

Виконувати роботи на висоті у повітрі за допомогою реактивних ранців (jet pack, rocket pack, rocket belt) чи їх модифікацій, щоб працівник літав у повітрі. Роботизувати виконання робіт на висоті, без необхідності підйому працівника на висоту.

4. Побудувати математичну, гідравлічну, електронну, механічну та інші моделі (вони точніше виражають ідею, ніж аналогії).

На рис. 4 схематично зображено запропоноване технічне рішення.

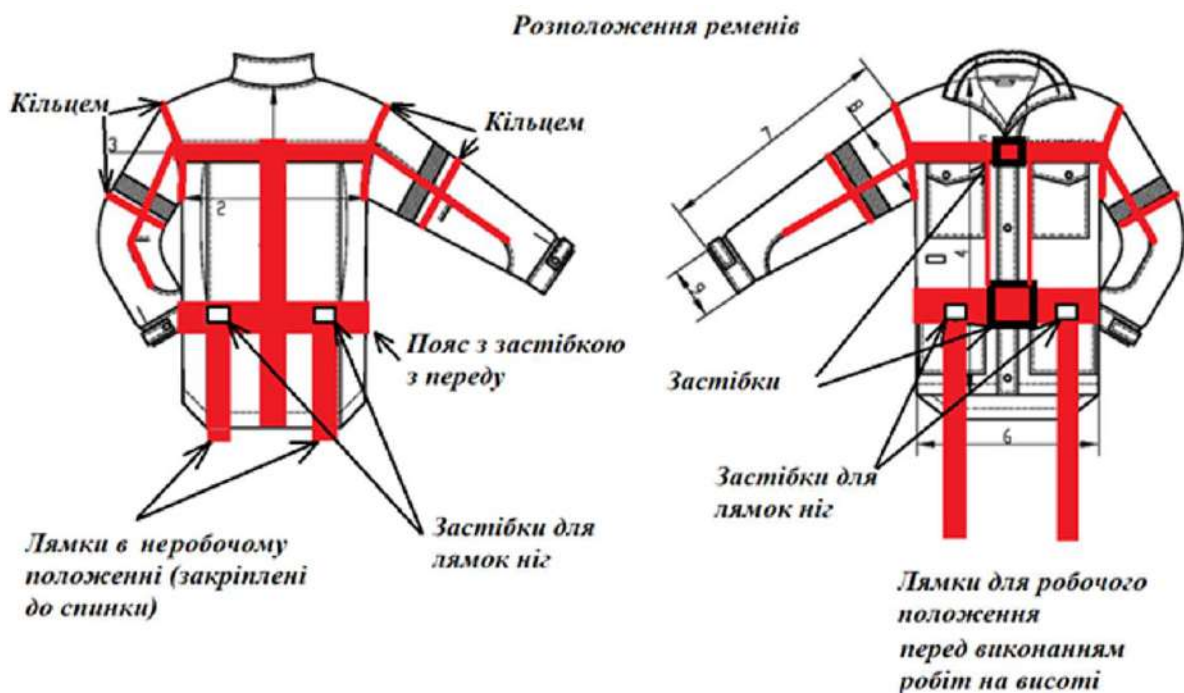


Рис. 4 – Технічне рішення (Примітка: Анкерні точки на грудях та між лопатками на схемі не зображені)

5. Спробувати різні види матеріалів та енергії: газ, рідину, тверде тіло, піну, пасту тощо; тепло, магнітну енергію, світло, силу удару і т. д.; різну довжину хвилі, поверхневі властивості та ін.; перехідні стани – замерзання, конденсацію, перехід через точку Кюрі тощо; ефекти Джоуля-Томсона, Фарадея та ін.

Тканини бавовняні і змішані для одягу повинні відповідати характеристикам, наведеним у табл. 1 [25].

Таблиця 1

Розривне навантаження та стійкість до стирання готових тканин [25]

Найменування тканини	Розривне навантаження смужки тканини розміром 50 x 200 мм, Н (кгс), не менше		Стійкість до стирання по площині, цикли, не менше
	по основі	по утку	
Одяг з поверхневою щільністю, г/м ² :			
до 220 включ.	490 (50)	255 (26)	1500
понад 220 > 275 >	569 (58)	343 (35)	1700
> 275 > 300 >	638 (65)	392 (40)	2000
> 300	785 (80)	490 (50)	2500

Костюми від загальних виробничих забруднень та механічних впливів (ЗМВ) виготовляються з тканин, у яких щільність в середньому 250 г/м², згідно табл. 1, розривне зусилля якої 569/343 Н (для стрічки завширшки 50 мм без швів). Пояс лямок з поліамідної стрічки чи поліефірних волокон проходить випробування з зусилля 15 000 Н для кожного кріпильного елемента, а повний комплект лямок повинен витримувати 10 000 Н [16].

Можна розглянути арамідну тканину замість поліамідної стрічки чи поліефірних волокон. Це синтетичне волокно з високою міцністю та модулем. Його вага становить 1/5 сталі, міцність у 5-6 разів більше сталі, модуль міцності в 2-3 рази більше за сталь. Його плетуть переважно з пара-арамідного (Kevlar, Twaron) волокна 200D, 400D, 600D, 800D, 1000D, 1500D, 3000D, яке має такі властивості: хороші показники ізоляції; теплостійкість, стійкість до старіння, вогнестійкий, висока міцність, високий модуль, стійкість до корозії, гарне у в'язанні [26].

Порівняти ці характеристики складно, оскільки даних про випробування захисних курток не знайдено.

Додаткові пропозиції. В захисній куртці необхідно змінити розташування кишень або зменшити їх кількість, в залежності від способу реалізації ідеї. Необхідно проведення експериментів, адже з'явилося декілька варіантів вирішення задачі:

1. Змінити матеріал захисної куртки з монтажем анкерних точок на грудях та поміж лопаток, вшити ножні ремені та при необхідності посилити елементи куртки.
2. Вшити ремені, як показано на рис. 4
3. Існуючі конструкції поясів типу ПЛ-2 вшити в захисну куртку, не проводячи зміни у конструкції поясу, а змінюючи тільки конструкцію куртки.

Таким чином контрольні запитання дозволили поглянути на поставлену задачу з різних ракурсів та виконали роль підказок по її вирішенню. В процесі формулювання відповідей на питання з'явилися нові технічні рішення (тобто питання виступили як каталізаторами для вирішення задач).

Висновки

Використані в дослідженні методи дозволили удосконалити лямковий запобіжний пояс, замінивши його конструкцію та призначення. Через те, що на сьогоднішній день в нормативних документах є чіткі вимоги до конструкцій поясів, проведений аналіз виявив необхідність розширення класифікації засобів захисту від падіння з висоти. Запропоноване вдосконалення ЗІЗ, яке буде знаходитись на працівнику та використовуватись за призначенням при його підйомі на висоту, зменшить ймовірність того, що працівник не буде користуватися ним. При цьому працівнику перед підйомом на висоту необхідно виконати менше операцій. В перспективі, для подальшого впровадження ідеї, необхідно провести випробування захисної куртки на динамічні навантаження (наприклад, за відомою методикою [27]) для отримання числових значень характеристик міцності, що дасть підстави для прийняття рішення щодо заміни матеріалу куртки або посилення її елементів ременями. Запропоноване рішення дасть змогу виконувати роботи на висоті зручніше та безпечніше.

Перелік використаних джерел:

1. Chetan S., Malaviya R. Review of occupational health and safety management system and hazards controls in the motion & industrial automation products manufacturing industries. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*. 2023. Vol. 3. Iss. 3. Pp. 342-358. DOI: <https://doi.org/10.48175/ijarsct-11456>.
2. Analysis of falls from height variables in occupational accidents / Rey-Merchán M.d.C., Gómez-de-Gabriel J.M., López-Arquillos A., Choi S.D. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. Iss. 24. Pp. 13417. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph182413417>.
3. FMEA method application based on occupational risks in the construction industry on work at height: A theoretical contribution / Uchoa J.G.L., Sousa M.J.A. de, Silva L.H.V., Cavaignac A.L.D.O. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*. 2019. Vol. 6. Iss. 10. Pp. 261-278. DOI: <https://doi.org/10.22161/ijaers.610.40>.
4. Preventing fall-from-height injuries in construction: Effectiveness of a regulatory training standard / L.S. Robson, H. Lee, B.C. Amick III, V. Landsman, P.M. Smith, C.A. Mustard. *Journal of Safety Research*. 2020. Vol. 74. Pp. 271-278. Режим доступу: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2020.06.007>.
5. Державна служба України з питань праці. Стан виробничого травматизму в Україні 2021-2023 pp. URL: <https://dsp.gov.ua/stan-vyrobnychoho-travmatyzmu> (дата звернення: 15.09.2023).
6. Craciun N. The personal protective equipment against falls from height at the limit between risk and security. *Sustainable development through quality and innovation in engineering and research* : Proceedings of the 7-th International Multidisciplinary Symposium, Bucharest, 11-14 January 2017. Vol. 18. Iss. S1. Pp. 140-145. Режим доступу: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/personal-protective-equipment-against-falls/docview/1855034701/se-2>.
7. Baszeczyński K. Effects of safety harnesses protecting against falls from a height on the user's

- body in suspension. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2023. Vol. 20. Iss. 1. Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20010071>.
8. Crăciun N. Behaviour of the ropes constituents under the action of risk factors that exist in the work environment. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. 2016. Vol. 7. Iss. 3. Pp. 77-86. URL: <http://www.iaeme.com/IJARET/issues.asp?JType=IJARET&VType=7&IType=3>.
 9. Singh J.P., Uttam M., Shakyawar D.B. Designing high performance safety belts. *Journal of Textile Science & Engineering*. 2016. Vol. 6. Iss. 5. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.4172/2165-8064.1000275>.
 10. Baszczyński K. Modelling the performance of selected textile elements of personal protective equipment protecting against falls from a height during fall arrest. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*. 2013. Vol. 21. Iss. 4(100). Pp. 130-136. URL: <http://www.fibtex.lodz.pl/article963.html>.
 11. Baszczyński K. Effect of safety harness design on the pressures exerted on the user's body in the state of its suspension. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2022. Vol. 28. Iss. 3. Pp. 1894-1903. DOI: <https://doi.org/10.1080/10803548.2021.2024707>.
 12. Design and test of self-rescue safety belt for power line operation at heights / Z. Zhao, J. Zhang, Y. Hua, C. Fei, J. Fu, J. Wu, J. Gao, H. Fang. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 729. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/729/1/012053>.
 13. Nguyen L.D., Tran D.Q., Chandrawinata M.P. Predicting safety risk of working at heights using bayesian networks. *Journal of Construction Engineering and Management*. 2016. Vol. 142. Iss. 9. Pp. 04016041. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001154](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001154).
 14. A review and assessment of technologies for addressing the risk of falling from height on construction sites / M.T. Newaz, M. Ershadi, L. Carothers, M. Jefferies, P. Davis. *Safety Science*. 2022. Vol. 147. Pp. 105618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105618>.
 15. Risk assessment of fatal accidents due to work at heights activities using fault tree analysis: Case study in Malaysia / Zermane A., Tohir M.Z.M., Baharudin M.R., Yusoff H.M. *Safety Science*. 2022. Vol. 151. Pp. 105724. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105724>.
 16. ДСТУ EN 363:2017. Індивідуальне спорядження для захисту від падіння. Системи індивідуального захисту від падіння (EN 363:2008, IDT). [На заміну ДСТУ EN 363:2006; чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 14 с.
 17. BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning / S. Zhang, K. Sulankivi, M. Kiviniemi, I. Romo, C.M. Eastman, J. Teizer. *Safety Science*. 2015. Vol. 72. Pp. 31-45. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.001>.
 18. Dzung R.-J., Fang Y.-C., Chen I.-C. A feasibility study of using smartphone built-in accelerometers to detect fall portents. *Automation in construction*. 2014. Vol. 38. Pp. 74-86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.11.004>.
 19. YOLOv5s-gnConv: detecting personal protective equipment for workers at height / Chen H., Li Y., Wen H., Hu X. *Frontiers in public health*. 2023. Vol. 11. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1225478>.
 20. Wong T.K.M., Man S.S., Chan A.H.S. Critical factors for the use or non-use of personal protective equipment amongst construction workers. *Safety science*. 2020. Vol. 126. Pp. 104663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104663>.
 21. Falls from height in the construction industry: a critical review of the scientific literature / E.A. Nadhim, C. Hon, B. Xia, I. Stewart, D. Fang. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2016. Vol. 13. Iss. 7. Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph13070638>.
 22. Струмінська Т.В., Прасол С.І. Метод пошуку творчих рішень, як засіб створення нових дизайн-об'єктів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія : Технічні науки*. 2015. № 2. С. 172-176. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vknutdtn_2015_2_27.
 23. Angelova D. Experimental application of the method of focal objects in design education. *Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design*. 2021. Vol. 2. Iss. 20. Pp. 82-87. URL: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20220215904>.
 24. Глущенко Л.Д. Передпланові заходи у науково-технологічних проектах. *Наукові праці*

- Кіровоградського національного технічного університету. Економічні науки. 2012. Вип. 22 (2). С. 211-217. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npkntu_e_2012_22\(2\)_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npkntu_e_2012_22(2)_37).
25. ДСТУ ГОСТ 21790:2008. Тканини бавовняні і змішані для одягу. Загальні технічні умови. [На заміну ДСТУ ГОСТ 21790:2003; чинний від 2008-10-01]. Вид. офіц. ДП «УкрНДНЦ», 2008. 11 с.
26. Специфікація ткани арамідної тканини. URL: <https://guodunarmor.com/uk/продукт/ткане-арамідне-полотно-шолома> (дата звернення: 10.07.2023).
27. ДСТУ EN 361:2017. Індивідуальне спорядження для захисту від падіння з висоти. Спорядження для всього тіла (EN 361:2002, IDT). [На заміну ДСТУ EN 361-2001; чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 12 с.

References:

1. S. Chetan, and R. Malaviya, «Review of occupational health and safety management system and hazards controls in the motion & industrial automation products manufacturing industries», *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, vol. 3, iss. 3. pp. 342-358, 2023. doi: **10.48175/ijarsct-11456**.
2. M.d.C. Rey-Merchán, J.M. Gómez-de-Gabriel, A. López-Arquillos, and S.D. Choi, «Analysis of falls from height variables in occupational accidents», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, iss. 24. pp. 13417, 2021. doi: **10.3390/ijerph182413417**.
3. J.G.L. Uchoa, M.J.A. de Sousa, L.H.V. Silva, and A.L.D.O. Cavaignac, «FMEA method application based on occupational risks in the construction industry on work at height: A theoretical contribution», *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 6, iss. 10, pp. 261-278, 2019. doi: **10.22161/ijaers.610.40**.
4. L.S. Robson, H. Lee, B.C. Amick III, V. Landsman, P.M. Smith, and C.A. Mustard, «Preventing fall-from-height injuries in construction: Effectiveness of a regulatory training standard», *Journal of Safety Research*, vol. 74, pp. 271-278, 2020. doi: **10.1016/j.jsr.2020.06.007**.
5. Derzhavna sluzhba Ukrainy z pytan pratsi. Stan vyrobnychoho travmatyzmu v Ukraini 2021-2023 rr (State Service of Ukraine on Labor Issues. The state of industrial injuries in Ukraine in 2021-2023) [Online]. Available: <https://dsp.gov.ua/stan-vyrobnychoho-travmatyzmu>. Accessed on: September 15, 2023. (Ukr.)
6. N. Craciun, «The personal protective equipment against falls from height at the limit between risk and security», in Proceedings of the 7-th International Multidisciplinary Symposium «Sustainable development through quality and innovation in engineering and research», Bucharest, 2017, vol. 18, iss. S1, pp. 140-145.
7. K. Baszczyński, «Effects of safety harnesses protecting against falls from a height on the user's body in suspension», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 20, iss. 1, pp. 1-14, 2023. doi: **10.3390/ijerph20010071**.
8. N. Crăciun, «Behaviour of the ropes constituents under the action of risk factors that exist in the work environment», *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*, vol. 7, iss. 3, pp. 77-86, 2016.
9. J.P. Singh, M. Uttam, and D.B. Shakyawar, «Designing high performance safety belts», *Journal of Textile Science & Engineering*, vol. 6, iss. 5. pp. 1-6, 2016. doi: **10.4172/2165-8064.1000275**.
10. K. Baszczyński, «Modelling the performance of selected textile elements of personal protective equipment protecting against falls from a height during fall arrest», *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, vol. 21, iss. 4 (100), pp. 130-136, 2013.
11. K. Baszczyński, «Effect of safety harness design on the pressures exerted on the user's body in the state of its suspension», *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 28, iss. 3, pp. 1894-1903, 2022. doi: **10.1080/10803548.2021.2024707**.
12. Z. Zhao, J. Zhang, Y. Hua, C. Fei, J. Fu, J. Wu, J. Gao, and H. Fang, «Design and test of self-rescue safety belt for power line operation at heights», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 729, pp. 1-6, 2019. doi: **10.1088/1757-899X/729/1/012053**.
13. L.D. Nguyen, D.Q. Tran, and M.P. Chandrawinata, «Predicting safety risk of working at heights using bayesian networks», *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 142, iss. 9, pp. 04016041, 2016. doi: **10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001154**.
14. M.T. Newaz, M. Ershadi, L. Carothers, M. Jefferies, and P. Davis, «A review and assessment of

- technologies for addressing the risk of falling from height on construction sites», *Safety Science*, vol. 147, pp. 105618, 2022. doi: [10.1016/j.ssci.2021.105618](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105618).
15. A. Zermane, M.Z.M. Tohir, M.R. Baharudin, and H.M. Yusoff, «Risk assessment of fatal accidents due to work at heights activities using fault tree analysis: Case study in Malaysia», *Safety Science*, vol. 151, pp. 105724, 2022. doi: [10.1016/j.ssci.2022.105724](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105724).
 16. *Indywidualne sportazhennia dlia zakhystu vid padinnia. Systemy individualnoho zakhystu vid padinnia* [Personal fall protection equipment. Personal fall protection systems], State standart EN 363:2017, 2019. (Ukr.)
 17. S. Zhang, K. Sulankivi, M. Kiviniemi, I. Romo, C.M. Eastman, and J. Teizer, «BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning», *Safety Science*, vol. 72, pp. 31-45, 2015. doi: [10.1016/j.ssci.2014.08.001](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.001).
 18. R.-J. Dzung, Y.-C. Fang, and I.-C. Chen, «A feasibility study of using smartphone built-in accelerometers to detect fall portents», *Automation in construction*, vol. 38, pp. 74-86, 2014. doi: [10.1016/j.autcon.2013.11.004](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.11.004).
 19. H. Chen, Y. Li, H. Wen, and X. Hu, «YOLOv5s-gnConv: detecting personal protective equipment for workers at height», *Frontiers in public health*, vol. 11, pp. 1-13, 2023. doi: [10.3389/fpubh.2023.1225478](https://doi.org/10.3389/fpubh.2023.1225478).
 20. T.K.M. Wong, S.S. Man, and A.H.S. Chan, «Critical factors for the use or non-use of personal protective equipment amongst construction workers», *Safety science*, vol. 126, pp. 104663, 2020. doi: [10.1016/j.ssci.2020.104663](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104663).
 21. E.A. Nadhim, C. Hon, B. Xia, I. Stewart, and D. Fang, «Falls from height in the construction industry: a critical review of the scientific literature», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 13, iss. 7, pp. 1-20, 2016. doi: [10.3390/ijerph13070638](https://doi.org/10.3390/ijerph13070638).
 22. T.V. Struminska, and S.I. Prasol, «Metod poshuku tvorchykh rishen, yak zasib stvorennia novykh dyzain-objektiv» [«Method find creative solutions, as a means of creating new design objects»], *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriya: Tekhnichni nauky – Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. Series: Technical sciences*, № 2, pp. 172-176, 2015. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vknutdtn_2015_2_27. (Ukr.)
 23. D. Angelova, «Experimental application of the method of focal objects in design education», *Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design*, vol. 2, iss. 20, pp. 82-87, 2021. Available: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/pdf/10.5555/20220215904>.
 24. L.D. Hlushchenko, «Peredplanovi zakhody u naukovo-tekhnologichnykh proektakh» [«Preplanning activities in science and technology projects»], *Naukovi pratsi Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Ekonomichni nauky – Scientific works of the Kirovohrad National Technical University. Economic sciences*, iss. 22(2), pp. 211-217, 2012. Available: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npkntu_e_2012_22\(2\)_37](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npkntu_e_2012_22(2)_37). (Ukr.)
 25. *Tkanyny bavovniiani i zmishani dlia odiahu. Zahalni tekhnichni umovy* [Cotton and blended fabrics for clothing. General technical conditions], State standart 21790:2008, 2008. (Ukr.)
 26. Spetsyfikatsiia tkanoi aramidnoi tkanyny (Specification of woven aramid fabric) [Online]. Available: <https://guodunarmor.com/uk/product/tkane-aramid-cloth-helmet>. Accessed on: July 10, 2023. (Ukr.)
 27. *Indywidualne sportazhennia dlia zakhystu vid padinnia z vysoty. Sportazhennia dlia vsoho tila* [Individual equipment for protection against falling from a height. Full body equipment], State standart EN 361:2017, 2019. (Ukr.)

Рецензент: О.А. Хлестова
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 13.09.2023
Стаття прийнята 20.10.2023

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗСЛІДУВАННЯ НЕЩАСНИХ
ВИПАДКІВ НА ВИРОБНИЦТВІ МЕТОДОМ ФОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ**

Одним із важливих завдань реалізації державної політики в галузі охорони праці є забезпечення проведення швидкого та об'єктивного розслідування нещасних випадків на виробництві. Цільовим призначенням дослідження є підвищення якості правового супроводження процесів розслідування та об'єктивності розслідування нещасних випадків. У роботі розглянуто питання вдосконалення процесу розслідування нещасних випадків на виробництві із застосуванням евристичних методів, зокрема методу фокальних об'єктів. Досліджено процес застосування методу фокальних об'єктів із зазначенням всіх основних етапів та ключових властивостей випадкових об'єктів. Виконано стислий огляд публікацій авторів щодо удосконалення процесу розслідування нещасних випадків на виробництві. Розглянуто питання взаємозв'язку процесів спеціального розслідування та розслідування в рамках кримінального провадження. Проаналізовано праці дослідників щодо можливості використання евристичних методів для отримання нових модифікацій способів, процесів шляхом застосування методу фокальних об'єктів. В результаті аналізу сучасних методів дослідження обґрунтовано можливість та ефективність використання методу фокальних об'єктів не тільки до предметів, але й до процесів, зокрема до процесу розслідування нещасних випадків. В статті запропоновано набір інструментарію для отримання, формування та оцінки ідей, шляхом вільних асоціацій, які виникають в процесі сполучень різних властивостей фокальних об'єктів. Запропоновано підхід до формування окремих елементів та структури складу ключових властивостей випадкових об'єктів. Наведено результати досліджень, які базуються на отриманих ідеях у вигляді конкретних корисних рішень. Вказані шляхи синхронізації процесів спеціального розслідування, що здійснюється комісією з розслідування нещасних випадків та розслідування, що здійснюється в рамках кримінального провадження органами досудового розслідування. Розглянуто питання розробки стратегій та заходів, спрямованих на покращення процесу правового супроводження розслідування нещасних випадків на виробництві.

Ключові слова: спеціальне розслідування, досудове розслідування, нещасний випадок, фокальний об'єкт, вільні асоціації, інсайт, правове супроводження, корисне рішення.

V.V. Kukhar, V.V. Sliuta. Improving the process of investigating industrial accidents using the focal object method. One of the important tasks of implementing the state policy in the field of labor protection is to ensure prompt and objective investigation of industrial accidents. The purpose of the study is to improve the quality of legal support for the investigation process and the objectivity of accident investigation. The article deals with the issues of improving the process of investigation of industrial accidents using heuristic methods, in particular, the method of focal objects. The process of applying the focal object method is investigated, indicating all the main stages and key properties of random objects. A brief review of the authors' publications on improving the process of investigating industrial accidents is made. The author considers the issues of interrelation between the processes of special investigation and investigation within criminal proceedings. The author analyzes the works of researchers on the possibility of using heuristic

¹ д-р техн. наук, професор, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0000-0002-4863-7233, kvv.mariupol@gmail.com

² магістрант, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, vasyl.slyuta@mipolytech.education

methods to obtain new modifications of methods and processes by applying the focal object method. As a result of the analysis of modern research methods, the author substantiates the possibility and effectiveness of applying the focal object method not only to objects, but also to processes, in particular, to the process of accident investigation. The article proposes a set of tools for obtaining, forming and evaluating ideas through free associations that arise in the process of combining various properties of focal objects. An approach to the formation of individual elements and the structure of the composition of key properties of random objects is proposed. The results of research based on the obtained ideas are presented in the form of specific useful solutions. The author indicates the ways of synchronizing the processes of special investigation carried out by the accident investigation commission and the investigation carried out within the framework of criminal proceedings by pre-trial investigation bodies. The author also considers the issues of developing strategies and measures aimed at improving the process of legal support for the investigation of industrial accidents.

Key words: *special investigation, pre-trial investigation, accident, focal object, free associations, insight, legal support, useful solution.*

Постановка проблеми. Проблема виробничого травматизму в Україні є достатньо гострою, а її дослідження проводять в розрізі хронології та причин виникнення по регіонах і галузях [1-4]. Складність виробничих ситуацій вимагає підвищення ефективності процесу розслідування нещасних випадків для забезпечення заходів протидії їх виникненню. Актуальність удосконалення процесу розслідування нещасних випадків важлива з різних причин. По-перше, нещасні випадки можуть мати серйозні наслідки для людини, включаючи втрату життя, інвалідність, травми та матеріальну шкоду. Одержання об'єктивної та детальної інформації про причини таких випадків допомагає уникнути повторення подібних ситуацій у майбутньому і забезпечити безпеку на робочих місцях. По-друге, удосконалення розслідування нещасних випадків сприяє встановленню винних осіб і відповідальності за них, що є важливим для забезпечення справедливості та виплат відшкодування потерпілим. Відсутність належної відповідальності створює негативні наслідки для виробничої дисципліни, невпевненість у дієвості законів і недовіру до правоохоронних органів. По-третє, удосконалення розслідування нещасних випадків допомагає з'ясувати системні проблеми або недоліки, які призвели до створення небезпечної ситуації. Це може стосуватися як людського фактору, так і організаційних або технічних аспектів. В роботі [5] автори вказують, що основні причини приховування нещасних випадків на виробництві лежать у площині свідомо некоректної взаємодії роботодавця з робітником та законодавством, що неприпустимо.

Динаміка та стан виробничого травматизму зі смертельними наслідками в Україні у 2021-2023 рр. (див. рис. 1) [6] свідчить про те, що процес розслідування таких подій потребує постійного пошуку методів його вдосконалення. Налагодження заходів для запобігання виникненню нещасних випадків на виробництві є важливим для забезпечення безпеки та покращення якості життя людей. Отже, удосконалення процесу розслідування нещасних випадків має велике суспільне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі дослідження та публікації [7, 8], що присвячено загальним проблемам розслідувань нещасних випадків, які, в основному, пов'язані з підвищенням об'єктивності розслідування, якості правового супроводження процесів розслідування та синхронізації процесів спеціального розслідування, що здійснюється комісією з розслідування нещасних випадків, та кримінального розслідування, яке здійснюється правоохоронними органами.

Про недосконалий механізм розслідування нещасних випадків на виробництві згадується в працях В.М. Стасюка [9] та Р.Т. Чернеги [10], зокрема він зазначає, що для сфери охорони праці властиві як застарілість правового забезпечення співпраці між органами публічної влади, роботодавцями та працівниками, так і прогалини у нормативно-правовій базі щодо розслідування нещасних випадків на виробництві.

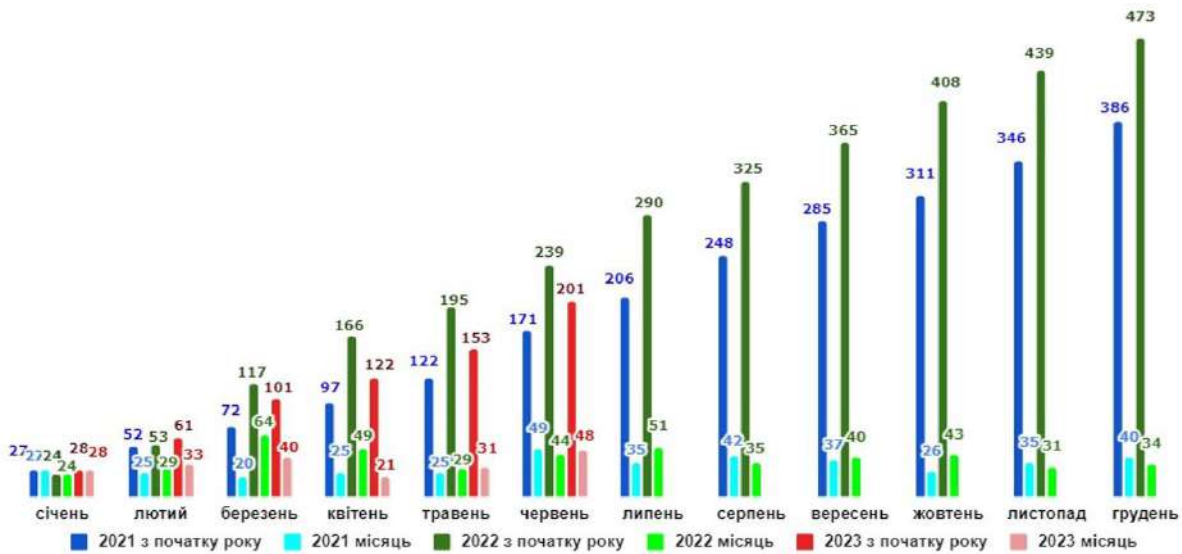


Рис. 1 – Кількість випадків виробничого травматизму зі смертельними наслідками в Україні в 2021-2023 рр. [6]

Вагомий внесок у вдосконалення процесу розслідування нещасних випадків зроблено О.В. Таран [11], зокрема вона вказує на те, що розслідування вимагає перегляду застарілих та існуючих наукових концепцій, розвитку та формування сучасної методології. У іншій роботі О.В. Таран [12], як і у роботі К.О. Спасенко [13], вказано на необхідність синхронізації процесів спеціального розслідування та розслідування в рамках кримінального провадження.

Важливість ролі інженерно-технічних досліджень для об'єктивності розслідування відмічають В.В. Горбенко та ін. [14]. Про необхідність проведення наукових досліджень та удосконалення рекомендацій з розслідувань нещасних випадків на виробництві, пов'язаних з постійним науково-технічним прогресом виробничих процесів, зазначає Ю.С. Безгинський [15]. Він вказує на те, що високий рівень виробничого травматизму, низька ефективність боротьби зі злочинами проти безпеки виробництва, недосконалість правової регламентації відповідальності за порушення законодавчих та інших нормативно-правових актів про охорону праці, а також санітарних правил та гігієнічних нормативів в нормах кримінального закону свідчить про недостатність правового інструментарію для боротьби зі злочинами цієї категорії [15]. Викликає питання і ефективність використання вже наявних в арсеналі правозастосовувача засобів протидії, яка нерідко є вкрай низькою.

Слід відзначити внесок в дослідження проблем розслідування нещасних випадків роботи Ю.С. Соколан та О.В. Романішиної [16], які вказали на доцільність створення на підприємствах баз даних з питань аналізу та обліку нещасних випадків для забезпечення їх належного контролю за своєчасністю та об'єктивністю розслідування.

Аналіз праць дослідників вказує, що для вдосконалення процесу розслідування нещасних випадків ними використовується низка методів. Так О.В. Таран [11, 12] при виконанні досліджень застосовувала наступні методи: системно-структурний, наукової абстракції, логіко-аргументаційний, історико-правовий, моделювання, статистичний, соціологічний. Варто відзначити, що вкрай мало уваги приділено вдосконаленню процесів розслідування нещасних випадків за допомогою евристичних методів (зокрема, методу фокальних об'єктів), які широко застосовують при створенні нових продуктів у техніці та маркетингу [17]. Про можливість отримання позитивних результатів при пошуку нових модифікацій способів, процесів та засобів навчання шляхом застосування методу фокальних об'єктів, вказують у своїх працях А.В. Іванчук [18], О.Ю. Черноусенко [19] та ін., також на це звертає увагу О.В. Дубовик у роботі [20].

Згідно з основами методу фокальних об'єктів [18-20] удосконалюваний об'єкт умовно розміщають у фокус переносу властивостей з інших (випадкових) об'єктів. Відповідно, оцінювання одержаних результатів та відбір корисних рішень є результатом генерування ідей, які формуються шляхом вибору 3-4 випадкових об'єктів та складання списків їх ознак. О. Загородня та

В. Серединська [21], розглядаючи деякі питання практичного використання евристичних методів у розв'язанні аналітичних завдань, констатують, що методи евристичного пошуку є надзвичайно різноманітними і ефективними. У результаті застосування гірлянд асоціацій при методі фокальних об'єктів виникає низка варіантів вирішення проблеми [21]. Н.Д. Панкратова [22] наголошує на тому, що, наприклад, морфологічний аналіз дає змогу розглядати в системі лише характерні для неї ознаки, але якщо на удоскональовану систему або об'єкт перенести ознаки інших випадково вибраних об'єктів, то кількість незвичних, несподіваних варіантів різко зростає. Ця ідея є основою методу фокальних об'єктів [22]. Про рівноцінність та можливість використання евристичних методів на рівні з іншими, такими як побудування математичної моделі чи аналогії, вказують автори праці [17]. Серед особливостей застосування методу фокальних об'єктів для підвищення ефективності розслідування випадків виробничого травматизму слід відзначити те, що метод буде застосований нами до процесу («розслідування»), а не до об'єкту у вигляді предмету чи конструкції, що потребує розвитку його методологічних засад.

Мета дослідження. Метою роботи є розробка практичних рекомендацій щодо контролю та підвищення ефективності процесу розслідування нещасних випадків на виробництві із застосуванням методу фокальних об'єктів.

Цільові завдання дослідження:

1. Підвищення об'єктивності розслідування.
2. Підвищення якості правового супроводження процесів розслідування.
3. Синхронізація процесів спеціального розслідування, що здійснюється комісією з розслідування нещасних випадків, та розслідування, що здійснюється в рамках кримінального провадження органами досудового розслідування.

Додатковим завданням є розвиток методології евристичних підходів для застосування для удосконалення процесу (на відміну від конструкції).

Виклад основного матеріалу. Як відомо, під нещасним випадком розуміють обмежену в часі подію, яка полягає у критичному впливі на працівника небезпечного виробничого фактору чи середовища та сталася у процесі виконання трудових обов'язків, внаслідок яких працівнику заподіяно шкоду здоров'ю або настала його смерть.

В досліджуваному випадку фокальним об'єктом (об'єктом дослідження) виступає процес (порядок, процедура) розслідування нещасного випадку на виробництві, який може складатися з процедур спеціального розслідування та досудового (поліцейського) розслідування, що відбуваються паралельно (рис. 2).

Спеціальне розслідування.

Процедура проведення розслідування визначається «Порядком розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві», який затверджено постановою Кабінету Міністрів України від 17 квітня 2019 р. № 337 [23].

Ключові етапи спеціального розслідування:

1. Створення на підприємстві, де стався нещасний випадок, комісії з розслідування нещасних випадків.
2. Проведення засідання комісії з розслідування нещасного випадку, на якому розглядається інформація про нещасний випадок.
3. Обстеження місця, де стався нещасний випадок, та складення відповідного протоколу.
4. Вивчення наявних на підприємстві документів та матеріалів стосовно нещасного випадку.
5. Визначення виду події, що призвела до нещасного випадку, причини нещасного випадку та обладнання, устаткування, машин, механізмів, транспортних засобів, експлуатація яких призвела до настання нещасного випадку.
6. Визначення відповідності умов праці та її безпеки вимогам законодавства про охорону праці.
7. Визначення необхідності проведення лабораторних досліджень, випробувань, технічних розрахунків, експертизи тощо для встановлення причин настання нещасного випадку.
8. З'ясувати обставини та причини настання нещасного випадку.
9. Визначення, пов'язаний чи не пов'язаний нещасний випадок з виробництвом.
10. Установлення осіб, які допустили порушення вимог нормативно-правових актів з охорони праці.



Рис. 2 – Алгоритм методу фокальних об'єктів для удосконалення процесу розслідування нещасного випадку на виробництві

Досудове розслідування.

Процедура досудового розслідування, що здійснюється в рамках кримінального провадження органами досудового розслідування здійснюється у відповідності із Кримінальним процесуальним кодексом України.

Ключові етапи досудового розслідування:

1. Обстеження місця, де стався нещасний випадок, та складення відповідного протоколу огляду.
2. З'ясувати обставини та причини настання нещасного випадку шляхом допиту учасників/очевидців.
3. Вивчення наявних на підприємстві документів та матеріалів стосовно нещасного випадку, шляхом отримання до них тимчасового доступу.
4. Визначення необхідності проведення слідчого експерименту для отримання вихідних даних для проведення інженерно-технічних досліджень.
5. Призначення судової експертизи для встановлення: причин настання нещасного випадку, установлення осіб, які допустили порушення, наявності причинно-наслідкового зв'язку між порушеннями і наслідками.
6. Після отримання висновків експертів, проведення всіх необхідних слідчих дій – пред'явлення підозри винним особам на направлення кримінального провадження в суд або закриття кримінального провадження у зв'язку із відсутністю складу злочину.

Як можливо побачити із вищевикладеного, процеси встановлення обставин події в обох випадках схожі як за джерелами інформації, так і за методами. По суті ці процеси є паралельними, взаємопов'язаними та при належній синхронізації та взаємодії можуть позитивно вплинути на якість та об'єктивність як на спеціального, так і на досудового розслідування.

Порядок застосування методу фокальних об'єктів, згідно з традиційними уявленнями [19], полягає у реалізації наступного алгоритму дій: 1) вибір фокального об'єкта; 2) вибір наявних декількох (трьох-п'яти) випадкових об'єктів; 3) складання списків ознак випадкових об'єктів; 4) генерування ідей приєднанням до фокального об'єкта ознак випадкових об'єктів; 5) розвиток одержаних поєднань вільними асоціаціями; 6) оцінювання одержаних ідей та відбір корисних рішень. Через те, що об'єктом дослідження виступає процес, для забезпечення розвитку методології дослідження запропоновано в якості випадкових об'єктів обирати не предмети, а процеси, з подальших формуванням переліку властивостей кожного випадкового процесу.

Враховуючи наявний вибір фокального об'єкта, було запропоновано п'ять етапів дослідження, сутність яких наведено на рис. 2 та викладено нижче.

Етап 1 «Вибір випадкових допоміжних об'єктів». Як випадкові об'єкти (процеси) обрано (див. рис. 1):

- 1) «переміщення сировини на конвеєрі»;
- 2) «поширення електромагнітних хвиль»;
- 3) «електричний струм»;
- 4) «ремонт обладнання»;
- 5) «внесення даних».

Етап 2 «Складання списків характерних ознак», тобто ключових властивостей випадкових об'єктів. Ключові властивості обраних процесів наведено у табл. 1 – табл. 5.

Вказані у табл. 1 три властивості допомагають оцінити ефективність та безпеку процесу переміщення сировини на конвеєрі.

Таблиця 1

Ключові властивості процесу «Переміщення сировини на конвеєрі»

№	Властивість	Опис	Характеристика
1.	Ефективність пересування	Визначає, наскільки ефективно і швидко сировина переміщується на конвеєрі від одного пункту до іншого.	Може бути вимірювана часом, потрібним для переміщення сировини, і кількістю сировини, яку конвеєр здатен обробляти протягом певного часу.
2.	Безпека та стабільність	Визначає, наскільки процес переміщення сировини забезпечує безпеку для працівників та стабільність конвеєрного обладнання.	Містить аспекти безпеки праці, захист від аварій та стабільність операцій
3.	Автоматизація та моніторинг	Вказує на ступінь автоматизації та можливість моніторингу процесу переміщення сировини	Містить наявність систем автоматизації для контролю за рухом сировини, виявлення несправностей та відповіді на них

Вказані у табл. 2 три властивості допомагають розуміти основні характеристики процесу поширення електромагнітних хвиль і мають важливе значення в різних областях, включаючи телекомунікації, радіаційну безпеку та наукові дослідження.

Таблиця 2

Ключові властивості процесу «Поширення електромагнітних хвиль»

№	Властивість	Опис	Характеристика
1.	Швидкість поширення	Визначає швидкість, з якою електромагнітні хвилі рухаються через середовище	Може бути визначена шляхом відстані, пройденої хвилею за певний час
2.	Частота та довжина хвиль	Визначає частоту та довжину електромагнітних хвиль у даному спектрі	Частота вимірюється в герцах (Гц), довжина хвилі - в метрах (м)
3.	Поглиблення та відбивання	Вказує на те, як електромагнітні хвилі взаємодіють з різними матеріалами або середовищами	Може бути виражена коефіцієнтом поглиблення та коефіцієнтом відбивання, які вказують на втрати енергії чи відбиття від поверхні

Вказані у табл. 3 три властивості допомагають зрозуміти основні характеристики електричного струму і визначити ключові аспекти, які важливі для ефективності та безпеки в електротехнічних системах.

Вказані у табл. 4 три властивості допомагають зрозуміти основні характеристики електричного струму і визначити ключові аспекти, які важливі для ефективності та безпеки в електротехнічних системах.

Вказані у табл. 5 три властивості допомагають зорієнтувати увагу на ключових аспектах процесу внесення даних і покращити якість, ефективність та безпеку цього процесу в рамках інформаційних систем.

Таблиця 3

Ключові властивості процесу «Електричний струм»

№	Властивість	Опис	Характеристика
1.	Напруга та струм	Визначає величини напруги та струму, що переносяться в системі	Містить значення напруги (вольти) та струму (ампери), які можуть змінюватися в часі
2.	Потужність та ефективність передачі	Визначає, наскільки ефективно відбувається передача електроенергії в системі	Містить вимірювання потужності (вати) та ефективності системи передачі електроенергії
3.	Безпека електричного струму	Визначає заходи та властивості, спрямовані на забезпечення безпеки під час роботи з електричним струмом	Містить заходи для запобігання ураження електричним струмом, захист від перенапруг, заземлення та інші стандартні процедури безпеки

Таблиця 4

Ключові властивості процесу «Ремонт обладнання»

№	Властивість	Опис	Характеристика
1.	Якісний ремонт	Визначає якість та ефективність виконаного ремонту обладнання	Може бути виміряна за допомогою аналізу тривалості робіт, витрат матеріалів та результатів функціональних тестів після ремонту
2.	Безпека працівників під час ремонту	Визначає, наскільки забезпечена безпека працівників під час виконання ремонтних робіт	Містить заходи безпеки, дотримання норм та стандартів охорони праці та наявність необхідних засобів індивідуального захисту
3.	Мінімізація витрат та тривалості ремонту	Визначає, наскільки оптимізованим є процес ремонту з точки зору витрат часу та ресурсів	Може бути виміряна часом, необхідним для завершення ремонту, і обсягом витрат, таких як матеріали, робоча сила та інструменти

Таблиця 5

Ключові властивості процесу «Внесення даних»

№	Властивість	Опис	Характеристика
1.	Якісний ремонт	Визначає, наскільки точно та якісно введені дані в систему	Може бути виміряна за допомогою аналізу помилок введення, перевірки відповідності введених даних вимогам інформаційної системи
2.	Часова ефективність введення даних	Визначає, наскільки швидко та ефективно введення даних здійснюється в систему	Може бути виміряна часом, який потрібен для введення конкретного обсягу даних, а також швидкістю реагування на введення
3.	Забезпечення конфіденційності та безпеки даних	Визначає, наскільки добре забезпечена конфіденційність та безпека введених даних	Містить заходи безпеки, такі як шифрування, обмеження доступу до інформації та заходи для запобігання несанкціонованому доступу

Етап 3 «Розвиток сполучень шляхом вільних асоціацій», тобто вибір кращих варіантів для подальшого опрацювання, знаходження до них певних асоціацій. Метод фокальних об'єктів дозволяє зосередитися на конкретних аспектах удосконалення процесу розслідування нещасних випадків на виробництві та впровадженні правового супроводження.

Аналіз різних об'єктів та їх властивостей надає різноманітні інсайти для ефективної оптимізації та покращення вказаних цілей. Про використання інсайтів для сприяння розвитку сполучень шляхом вільних асоціацій немає достеменних відомостей, що підкреслює новизну науково-методологічного підходу.

Надамо інсайти, отримані за методом фокальних об'єктів по кожному з п'яти випадкових об'єктів, для ефективної оптимізації та покращення процедури розслідування нещасних випадків на виробництві:

1. Переміщення сировини на конвеєрі:

1.1. Ефективність пересування. *Інсайт*: Впровадження систем моніторингу та аналізу шляхів оптимізації для підвищення швидкості та ефективності переміщення сировини.

1.2. Безпека та стабільність. *Інсайт*: Вдосконалення систем безпеки та стабільності для уникнення нещасних випадків, можливе використання новітніх технологій.

1.3. Автоматизація та моніторинг. *Інсайт*: Впровадження автоматизованих систем для більш ефективного моніторингу руху сировини та виявлення можливих ризиків.

2. Поширення електромагнітних хвиль:

2.1. Швидкість поширення. *Інсайт*: Дослідження можливостей збільшення швидкості поширення інформації для ефективнішого реагування на нещасні випадки.

2.2. Частота та довжина хвиль. *Інсайт*: Визначення оптимальних параметрів частоти та довжини хвиль для забезпечення найкращої якості передачі інформації.

2.3. Поглиблення та відбивання. *Інсайт*: Розробка нових матеріалів або технологій для мінімізації поглиблення та відбивання електромагнітних хвиль.

3. Електричний струм:

3.1. Напруга та струм. *Інсайт*: Використання ефективних методів регулювання напруги та струму для оптимізації безпеки та якості передачі енергії.

3.2. Потужність та ефективність передачі. *Інсайт*: Впровадження новітніх технологій для підвищення ефективності передачі електроенергії та зменшення втрат.

3.3. Безпека електричного струму. *Інсайт*: Посилення заходів безпеки та використання інноваційних методів для уникнення нещасних випадків пов'язаних з електричним струмом.

4. Ремонт обладнання:

4.1. Якісний ремонт. *Інсайт*: Розробка стандартів та процедур для забезпечення якісного ремонту обладнання та контроль за їх виконанням.

4.2. Безпека працівників під час ремонту. *Інсайт*: Вдосконалення навчання та впровадження додаткових заходів безпеки для працівників під час ремонтних робіт

4.3. Мінімізація витрат та тривалості ремонту. *Інсайт*: Оптимізація процесу ремонту, використання передових технологій та методів для зменшення витрат часу та ресурсів.

5. Внесення даних:

5.1. Точність та якість введених даних. *Інсайт*: Вдосконалення систем введення даних, можливо, впровадження автоматизованих методів для підвищення точності.

5.2. Часова ефективність введення даних. *Інсайт*: Впровадження ефективних інструментів та методів для швидкого введення даних у систему.

5.3. Забезпечення конфіденційності та безпеки даних. *Інсайт*: Застосування сучасних засобів шифрування та інших методів для забезпечення конфіденційності та безпеки введених даних.

Вказані інсайти надають основу для розробки стратегій та заходів, спрямованих на покращення процесу правового супроводження розслідування нещасних випадків на виробництві. Щоб отримати більшу кількість асоціацій, необхідно розглянути кожний випадковий об'єкт, його властивості та інсайти, які розвинено в контексті напрямку дослідження та представлено в структурованому вигляді (див. рис. 3).

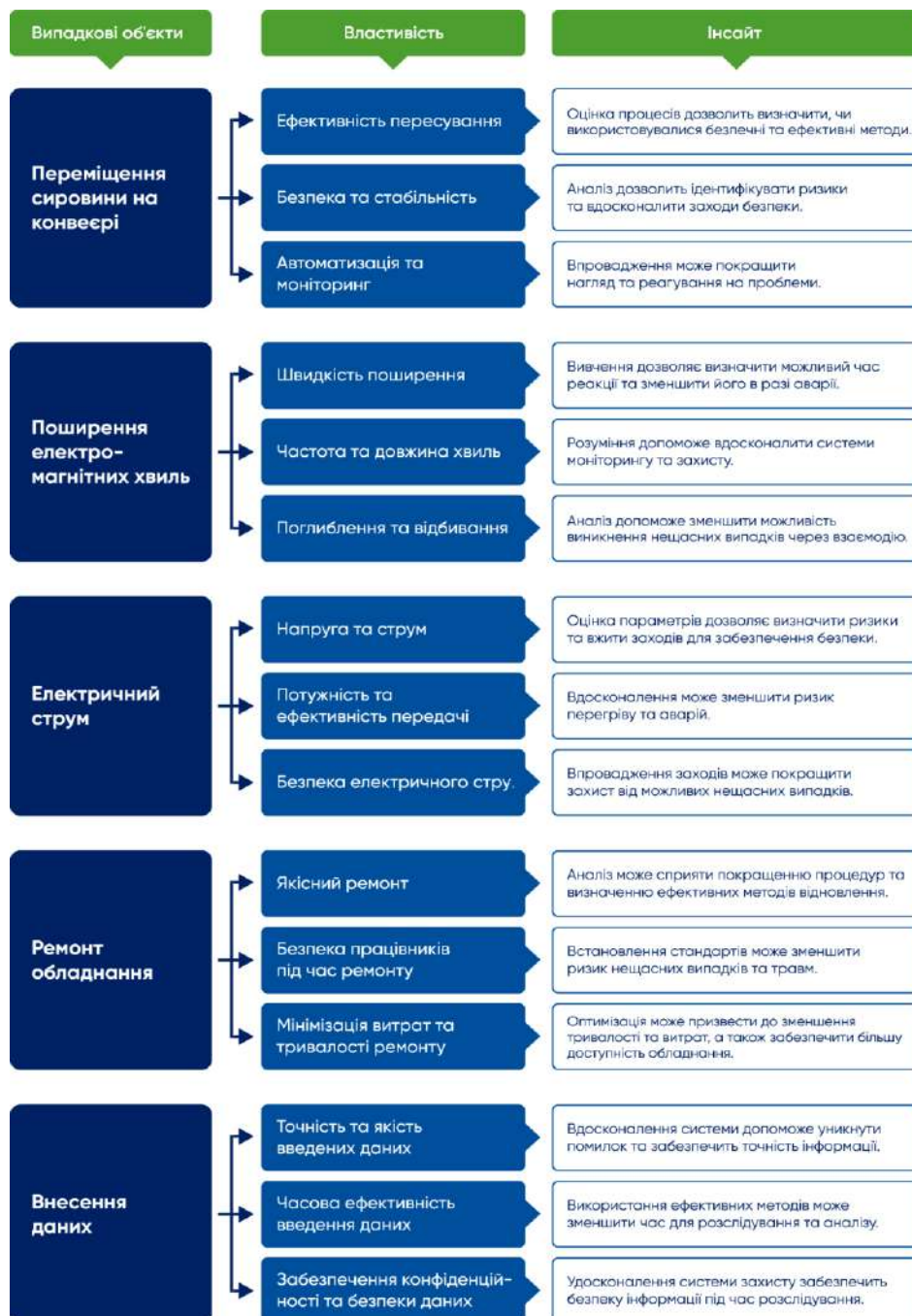


Рис. 3 – Випадкові об'єкти (процеси), їх властивості та інсайти

Етап 4 «Формулювання та оцінка отриманих ідей». На основі отриманих асоціацій сформульовано ідеї, що найбільш наближені до завдань дослідження:

- Поєднання автоматизованих систем моніторингу та безпеки може покращити реакцію на небезпечні ситуації.
- Впровадження програм підготовки персоналу щодо безпеки праці та процедур ремонту може зменшити кількість нещасних випадків.
- Використання технічних засобів для підвищення точності введення даних та їх конфіденційності є ключовим аспектом удосконалення процедур розслідування.
- Збільшення уваги до точності та безпеки введення даних допоможе уникнути помилок та зберегти конфіденційність інформації.

Етап 5 «Відбір корисних рішень». На даному етапі важливо врахувати наступні критерії для прийняття вірних рішень:

1. Оцінювання та зважування ідей: Аналіз кожної ідеї, яка була згенерована на попередньому етапі, та оцінювання рішень шляхом ранжування за значущістю. Проводили зважування кожної ідеї з урахуванням її переваг та недоліків, сили, достовірності та релевантності до поставлених завдань. Для ранжування рішень може бути застосований метод експертної оцінки (залучання експертів для оцінки та рекомендацій).

2. Врахування контексту: Розглядали контекстуальні фактори і обмеження, що впливають на вибір рішення. Враховували наявні ресурси, ризики, технічні аспекти, часові рамки, оговорені у законодавстві та інші фактори, які можуть вплинути на прийняття рішення.

3. Реалістичність: Враховували реалістичність та можливість впровадження обраного рішення у реальних умовах.

На основі аналізу сукупності результатів досліджень, базуючись на отриманих ідеях, сформульовані корисні рішення, які найбільш відповідають поставленим завданням та можуть бути запропоновані у вигляді практичних рекомендацій з удосконалення процесу розслідування нещасних випадків на виробництві (див. табл. 6).

Таблиця 6

Практичні рекомендації

Ранг за значущістю рішення	Корисне рішення	Зміст рішення
1.	Розробка та впровадження нормативними актами на підприємстві програм підготовки персоналу, зокрема алгоритмів дій щодо дотримання безпеки праці на об'єктах підвищеної небезпеки на виробництві та процедур ремонту, може зменшити кількість нещасних випадків на виробництві.	Розробка та впровадження програм підготовки персоналу, які включають алгоритми дій для забезпечення безпеки праці на об'єктах з підвищеною небезпекою та під час ремонту, може призвести до покращення свідомості та відповідальності працівників. Це може включати правила та процедури, спрямовані на запобігання нещасних випадків та правильне використання обладнання.
2.	Розробка та впровадження нормативними актами на підприємстві автоматизованих систем моніторингу та безпеки праці на об'єктах підвищеної небезпеки на виробництві – збільшить точність введення даних, що допоможе зменшити кількість помилок та підвищити об'єктивність розслідування.	Розробка та впровадження програм підготовки персоналу, які включають алгоритми дій для забезпечення безпеки праці на об'єктах з підвищеною небезпекою та під час ремонту, може призвести до покращення свідомості та відповідальності працівників. Це може включати правила та процедури, спрямовані на запобігання нещасних випадків та правильне використання обладнання.

Продовження таблиці 6

Ранг за значущістю рішення	Корисне рішення	Зміст рішення
3.	Надання юристу, який надає правові консультації посадовим особам підприємства з приводу розслідування нещасного випадку на виробництві, своєчасної та об'єктивної інформації – це сприяє синхронізації процесів спеціального розслідування нещасного випадку та кримінального розслідування, яке проводиться правоохоронними органами, що в свою чергу підвищить об'єктивність обох видів розслідувань.	Юридична підтримка забезпечить передачу юристові своєчасної та об'єктивної інформації щодо розслідування нещасного випадку. Це може включати правові аспекти, документацію та інші елементи, необхідні для синхронізації процесів спеціального розслідування та кримінального розслідування, що підвищить їхню об'єктивність.

Корисні рішення у табл. 6 наведено у ранжованому вигляді: від максимально ефективного до мінімально ефективного.

Висновки

У роботі розвинуто методологічні основи застосування методу фокальних об'єктів для удосконалення процедур розслідування нещасних випадків на виробництві, що дозволило запропонувати корисні рішення, спрямовані на підвищення об'єктивності розслідування, якості правового супроводження та ефективності синхронізації процесів розслідування, що проводяться паралельно спеціальною комісією та правоохоронними органами.

Встановлено шляхи удосконалення алгоритму дій під час проведення спеціального та судового розслідувань на основі методу фокальних об'єктів, який дозволяє синтезувати нові властивості об'єкта (процесу). В якості розвитку методу слід вказати на його адаптацію до дослідження саме процесу, а не предмету чи конструкції.

Показано позитивний досвід використання технології «інсайтів» для сприяння розвитку сполучень шляхом вільних асоціацій та формулювання ідей, які покладено в основу удосконалення процесу розслідування нещасних випадків на виробництві. Про використання технології «інсайтів» для розвитку методу фокальних об'єктів в теперішній час немає достеменних відомостей, що підкреслює новизну науково-методологічного підходу.

Перелік використаних джерел:

1. Трус О.М., Прокопенко Е.В. Оцінка стану виробничого травматизму по регіонах України за 2020 рік. *Modern scientific research: achievements, innovations and development prospects* : Proceedings of the 1st International scientific and practical conference, Berlin, Germany, 4-6 July 2021. С. 82-86. Режим доступу: <http://surl.li/olqhu>.
2. Левчук К.О., Копил О.В. Виробничий травматизм в Україні: причини та шляхи запобігання. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Технічні науки*. 2016. Вип. 1. С. 208-214. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2016_1_41.
3. Левченко О.Г., Ільчук О.С. Аналіз та оцінка стану виробничого травматизму в галузі машинобудування. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2016. Вип. 30. С. 171-176. DOI: <https://doi.org/10.20535/2079-5688.2016.30.61226>.
4. Березовський А.П., Трус О.М., Прокопенко Е.В. Стан виробничого травматизму та професійних захворювань в Україні. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2019. Вип. № 1. С. 241-249. DOI: <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.01.29>.
5. Боднарук О.О., Іванська О.В. Аналіз причин приховування нещасних випадків на виробництві та рівня професійної захворюваності в Україні. *Вісник Чернівецького торговельно-економічного інституту. Економічні науки*. 2012. Вип. 1. С. 429-436.
6. Державна служба України з питань праці. Стан виробничого травматизму. URL: <https://dsp.gov.ua/stan-vyrobnychoho-travmatyzmu/#> (дата звернення: 10.08.2023).
7. Кравцов Д.М. Переваги і недоліки нового порядку розслідування та обліку нещасних випадків. *Проблеми законності*. 2019. № 147. С. 140-150.
8. Трунова Г.А. Окремі проблеми правового регулювання розслідування нещасного випадку

- на виробництві. *Юридична Україна*. 2017. № 5-6. С. 94-101.
9. Стасюк В.М. Інституціональне середовище цивільної безпеки: вплив на безпеку виробництва. *Перспективні технології та прилади*. 2021. № 19. С. 128-133. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2021-19-21>.
 10. Чернега Р.Т. Практичні проблеми у сфері правового забезпечення охорони праці в Україні. *Соціальне право*. 2019. № 2. С. 93-101. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sopr_2019_2_16.
 11. Таран О.В. Науково-методичний аспект криміналістичного забезпечення розслідування злочинів, пов'язаних з порушенням вимог законодавства про охорону праці. *Боротьба з організованою злочинністю і корупцією (теорія і практика)*. 2010. Вип. 23. С. 276-283.
 12. Таран О.В. Взаємодія органів розслідування з комісією з розслідування нещасного випадку на виробництві. *Вісник Верховного Суду України*. 2012. № 3. С. 44-47.
 13. Спасенко К.О. Інноваційні технології в розслідуванні порушень правил безпеки під час виконання робіт із підвищеною небезпекою. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2020. №7. С. 383-385. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0374/2020-7/96>.
 14. Вирішення ситуаційних завдань при розслідуванні нещасних випадків і інших небезпечних подій : монографія / Горбенко В.В., Кузьменко О.О., Гарбуз М.В., Горбенко В.О.; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2023. 132 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/65939>.
 15. Безгинський Ю.С. Стан наукових досліджень проблем розслідування кримінальних правопорушень, пов'язаних з порушенням правил безпеки на підприємствах вугільної промисловості. *Правові горизонти*. 2020. Вип. 25 (38). С. 115-120. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/84268>.
 16. Соколан Ю.С., Романішина О.В. Оптимізація наглядової діяльності з питань аналізу та обліку нещасних випадків на підприємствах шляхом створення баз даних. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 1(013). С. 83-91. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.83.922>.
 17. Голда Н., Піяк І., Поліщук Н. Використання евристичних методів у маркетинговому моделюванні. *Галицький економічний вісник*. 2021. Том 69. № 2. С. 137-145. DOI: https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2021.02.137.
 18. Іванчук А.В., Шоробура Н.С. Політехнічні знання про виробництво кольорових металів у змісті освіти майбутніх учителів технологій. *Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми*. 2015. Вип. 43. С. 263-267. URL: <https://vspu.net/sit/index.php/sit/article/view/4679>.
 19. Черноусенко О.Ю., Чепелюк О.О., Риндюк Д.В. Основи наукових досліджень та інженерної творчості : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. 270 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19836>.
 20. Дубовик О.В. Креативна особистість і методики її розвитку. *Інформаційно-комунікативні технології як засіб формування креативної особистості : матеріали обл. наук.-практ. конф., м. Львів, 5 лютого 2020 р.* Львів, 2020. С. 27-33. URL: <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/29641>.
 21. Загородна О., Серединська В. Деякі питання практичного використання евристичних методів у розв'язанні аналітичних завдань. *Наукові записки*. 2005. Вип. 14. С. 41-47. URL: http://library.wunu.edu.ua/files/EVD/site2_1/published/05zomraz.pdf.
 22. 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. Том 90. Вип. 77. С. 6-13. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchduct_2008_90_77_3.
 23. Про затвердження Порядку розслідування та обліку нещасних випадків, професійних захворювань та аварій на виробництві : Постанова Каб. Міністрів України від 17.04.2019 р. № 337 : станом на 7 лют. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/337-2019-п#Text>.

References:

1. O.M. Trus, and E. V. Prokopenko, «Otsinka stanu vyrobnychoho travmatyzmu po rehionakh Ukrainy za 2020 rik» [«Assessment of industrial injuries by regions of Ukraine for 2020»], in *Modern scientific research: achievements, innov. develop. prospects*, Berlin, Germany, 2021,

- pp. 82-86. Available: <http://surl.li/olqhu>. (Ukr)
2. K.O. Levchuk, and O.V. Kopyl, «Vyrobnychyuy travmatyzm v Ukraini: prychny ta shlyakhy zapobihannya» [«Industrial injuries in Ukraine: causes and prevention»], *Zbirnyk naukovykh prats Dniprodzerzhynskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnichni nauky – Collection of scientific works of the Dniprodzerzhynsk State Technical University. Technical sciences*, vol. 1, pp. 208-214, 2016. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Znpddtu_2016_1_41. (Ukr)
 3. O.G. Levchenko, and O.S. Ilchuk, «Analiz ta otsinka stanu vyrobnychoho travmatyzmu v haluzi mashynobuduvannya» [«Analysis and assessment of the state of industrial injuries in the machinery industry»], *Visnyk NTUU «KPI». Seriya «Hirnystvo» – Bulletin of NTUU «KPI». Series: «Mining»*, vol. 30, pp. 171-176, 2016. doi: **10.20535/2079-5688.2016.30.61226**. (Ukr)
 4. A.P. Berezovskyy, O.M. Trus, and E.V. Prokopenko, «Stan vyrobnychoho travmatyzmu ta profesiynykh zakhvoryuvan v Ukraini» [«State of industrial injuries and occupational diseases in Ukraine»], *Visnyk Poltavskoyi derzhavnoyi ahrarynoyi akademiyi – Bulletin of the Poltava State Agrarian Academy*, no. 1, pp. 241-249, 2019. doi: **10.31210/visnyk2019.01.29**. (Ukr)
 5. O.O. Bodnaruk, and O.V. Ivanska, «Analiz prychn prykhovuvannya neshchasnykh vypadkiv na vyrobnytstvi ta rivnya profesiynoyi zakhvoryuvanosti v Ukraini» [«Analysis of the reasons for concealing accidents at work and the level of occupational diseases in Ukraine»], *Visnyk Chernivetskoho torhovelno-ekonomichnoho instytutu. Ekonomichni nauky – Bulletin of the Chernivtsi Trade and Economic Institute. Economic sciences*, vol. 1, pp. 429-436, 2012. (Ukr)
 6. Derzhavna sluzhba Ukraini z pitan praci. Stan virobnychoho travmatyzmu (State Service of Ukraine on Labor Issues. The state of industrial injuries) [Online]. Available: <https://dsp.gov.ua/stan-vyrobnychoho-travmatyzmu/#>. Accessed on: August 10, 2023. (Ukr)
 7. D.M. Kravtsov, «Perevahy i nedoliky novoho porядku rozsliduvannya ta obliku neshchasnykh vypadkiv» [«Advantages and disadvantages of the new order of investigation and accounting of accidents»], *Problemy zakonnosti – Problems of legality*, no. 147, pp. 140-150, 2019. (Ukr)
 8. H.A. Trunova, «Okremi problemy pravovoho rehulyuvannya rozsliduvannya neshchasnoho vypadku na vyrobnytstvi» [«Some problems of legal regulation of investigating an industrial accident»], *Yurydychna Ukraina – Legal Ukraine*, no. 5-6, pp. 94-101, 2017. (Ukr)
 9. V.M. Stasyuk, «Instytutysiine seredovyshe tsyvilnoi bezpeky: vplyv na bezpeku vyrobnytstva» [«Institutional environment of civil safety: impact on industrial safety»], *Perspektyvni tekhnolohii ta prylady – Promising technologies and devices*, no. 19, pp. 128-133, 2021. doi: **10.36910/6775-2313-5352-2021-19-21**. (Ukr)
 10. R.T. Chernega, «Praktychni problemy u sferi pravovoho zabezpechennya okhorony pratsi v Ukraini» [«Practical problems in the field of legal support for labor protection in Ukraine»], *Sotsialne parvo – Social law*, no. 2, pp. 93-101, 2019. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sopr_2019_2_16. (Ukr)
 11. O.V. Taran, «Naukovo-metodychnyy aspekt kryminalistychnoho zabezpechennya rozsliduvannya zlochyniv, pov'yazanykh z porushennyam vymoht zakonodavstva pro okhoronu pratsi» [«Scientific and methodological aspect of forensic support for the investigation of crimes related to violation of labor protection laws»], *Borotba z orhanizovanoju zlochynnistyju i koruptsiyeyu (teoriya i praktyka) – Fight against organized crime and corruption (theory and practice)*, no. 23, pp. 276-283, 2010. (Ukr)
 12. O.V. Taran, «Vzayemodiya orhaniv rozsliduvannya z komisiyeyu z rozsliduvannya neshchasnoho vypadku na vyrobnytstvi» [«Interaction of investigation authorities with the commission for investigating an industrial accident»], *Visnyk Verkhovnoho Sudu Ukrainy – Bulletin of the Supreme Court of Ukraine*, no. 3, pp. 44-47, 2012. (Ukr)
 13. K.O. Spasenko, «Innovatsiyni tekhnolohiyi v rozsliduvanni prychn prykhovuvannya neshchasnykh vypadkiv ta rivnya profesiynoyi zakhvoryuvanosti v Ukraini» [«Innovative technologies in the investigation of the causes of concealing accidents and the level of occupational diseases in Ukraine»], *Yurydychnyy naukovyy elektronnyy zhurnal – Legal scientific electronic journal*, no. 7, pp. 383-385, 2020. doi: **10.32782/2524-0374/2020-7/96**. (Ukr)
 14. V.V. Horbenko, O.O. Kuzmenko, M.V. Harbuz, and V.O. Horbenko, *Vyrishennya sytuatsiynykh zadach pry rozsliduvanni neshchasnykh vypadkiv i inshykh nebezpechnykh podiy: monohrafiya* [Solving situational problems during the investigation of accidents and other dangerous events: monograph]. Kharkiv, Ukraine: National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

- Publ., 2023. Available: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/65939>. (Ukr.)
15. Yu.S. Bezhytskyi, «Stan naukovykh doslidzhen problem rozsliduvannya kryminalnykh pravoporushen, pov'yazanykh z porushennyam pravyl bezpeky na pidpryyemstvakh vuhilnoyi promyslovosti» [«State of scientific research on the problems of investigating criminal offenses related to violation of safety rules in coal enterprises»], *Pravovi horizonty – Legal horizons*, no. 25(38), pp. 115-120, 2020. Available: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/84268>. (Ukr.)
 16. Yu.S. Sokolan, and O.V. Romanishyna, «Optyimizatsiya nahlyadovoyi diyalnosti z pitan analizu ta obliku neshchasnykh vypadkiv na pidpryyemstvakh shlyakhom stvorenniya baz danykh» [«Optimization of supervisory activities on the analysis and accounting of accidents at enterprises by creating databases»], *Ukrayinskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury – Ukrainian Journal of Construction and Architecture*, no. 1(013), pp. 83-91, 2023. doi: **10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.83.922**. (Ukr.)
 17. N. Golda, I. Pinyak, and N. Polishchuk, «Vykorytannia evristychnykh metodyv u marketynhovomu modeliuvanni» [«The use of heuristic methods in marketing modeling»], *Halitskyi ekonomichnyi visnyk – Galician Economic Bulletin*, vol. 69, no. 2, pp. 137-145, 2021. doi: **10.33108/galicianvisnyk_tntu2021.02.137**. (Ukr.)
 18. A.V. Ivanchuk, and N.S. Shorobura, «Politekhichni znannia pro vyrobnytstvo kolorovykh metaliv u zmisti osvity maibutnykh uchyteliv tekhnolohii» [«Polytechnic knowledge about the production of non-ferrous metals in the content of the future teachers of technology education»], *Suchasni informatsiyini tekhnolohii ta innovatsiyini metodyky navchannia u pidhotovtsi fakhivtsiv: metodolohiya, teoriya, dosvid, problem – Modern information technologies and innovation methodologies of education in professional training methodology theory experience problems*, vol. 43, pp. 263-267, 2015. Available: <https://vspu.net/sit/index.php/sit/article/view/4679>. (Ukr.)
 19. O.Yu. Chernousenko, O.O. Chepelyuk, and D.V. Rinduk, *Osnovy naukovykh doslidzhen ta inzhenernoyi tvorchosti* [Fundamentals of scientific research and engineering creativity]. Kyiv, Ukraine: KPI named after Igor Sikorsky Publ., 2016. Available: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19836>. (Ukr.)
 20. O.V. Dubovik, «Kreatyvna osobystist i metodyky yiyi rozvytku» [«Creative personality and methods of its development»], in zbirnyk materialiv obl. nauk.-prakt. konf. «Informatychno-komunikatyvni tekhnolohii yak zasib formuvannia kreatyvnoi osobystosti» [in Collection of materials of the reg. sci. and prac. conf. «Information and communication technologies as a means of forming a creative personality»], Lviv, Ukraine, 2020, pp. 27-33. Available: <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/29641>. (Ukr.)
 21. O. Zahorodna, and V. Seredinska, «Deiaki pytannia praktychnoho vykorystannia evristychnykh metodyk u rozvyazanni analitychnykh zadach» [«Some issues of practical use of heuristic methods in solving analytical problems»], *Naukovi zapysky – Scientific notes*, vol. 14, pp. 41-47, 2005. Available: http://library.wunu.edu.ua/files/EVD/site2_1/published/05zomraz.pdf. (Ukr.)
 22. N.D. Pankratova, and I.O. Savchenko, «Zastosuvannia metodu morfolohichnoho analizu do zadach tekhnolohichnoho peredbachennia» [«Application of the method of morphological analysis to technological prediction problems»], *Naukovi pratsi Chornomorskoho derzhavnoho universytetu imeni Petra Mohyly. Ser.: Komp'yuterni tekhnolohii – Scientific works of the Black Sea State University named after Petro Mohyla. Ser.: Computer technologies*, vol. 90, no. 77, pp. 6-13, 2008. Available: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Npchduct_2008_90_77_3. (Ukr.)
 23. Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine. (2019, April 17). Postanova Kab. Ministriv Ukraïni vid 17.04.2019 r. № 337, Pro zatverdzhennya Poryadku rozsliduvannya ta obliku neshchasnykh vipadkiv, profesiinikh zakhvoryuvan ta avarii na virobnytstvi [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 337, On approval of the Procedure for investigating and recording accidents, occupational diseases and accidents at work] [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/337-2019-#Text>. (Ukr.)

Рецензент: В.А. Бурко
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 25.09.2023
Стаття прийнята 30.10.2023

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

UDC 531.43+681.5

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300113

© Khudyakov I.V.¹, Gritsuk I.V.², Pohorletskyi D.S.³, Bulgakov M.P.⁴,
Chernenko V.V.⁵, Litvinov M.E.⁶**PECULIARITIES OF SHIP POWER PLANT DIAGNOSTICS
USING THE ERS-500 TECHSIM TRANSAS MIP LTD SIMULATOR COMPLEX
IN THE PROCESS OF SHIP ENGINEERS' TRAINING**

This paper presents an analysis of the results obtained using the ERS 5000 TechSim Engine Room Simulator software. The software simulates remote control from the ship's central control station using virtual equipment panels, which are dedicated hardware combined into a separate console. The simulator covers the main areas of training in accordance with the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers with the Manila Amendments of 2010 and meets the requirements of IMO Conventions and Resolutions and IEC standards. The simulator is certified by the Norwegian classification society DNV/GL. Main engine diagnostics are performed using the Cylinder Combustion Quality diagnostic panel and the Indicator Diagram Comparison panel. Analysis of changes in gas turbine engine parameters and the indicator diagrams themselves at different levels of piston ring wear showed a decrease in compression pressure, mean indicated pressure and maximum combustion pressure, as well as an increase in the return oil temperature of the piston cooling system and the consumption of lubricating oil in the cylinder. The advantages of using simulators in the training process include the ability to perform laboratory work in a frontal method, which significantly improves the learning experience.

Key words: training equipment, ERS 5000 TechSim, diagnostics, engine.

І.В. Худяков, І.В. Грицук, Д.С. Погорлецький, М.П. Булгаков, В.В. Черненко, М.Є. Літвінов. *Особливості діагностування судової енергетичної установки з використанням тренажерного комплексу ERS-500 TechSim TRANSAS MIP LTD у процесі підготовки суднових механіків.* Тренажерні системи займають один із пріоритетних напрямів у навчанні безаварійної експлуатації судової енергетичної установки (СЕУ). Імітаційно-тренажерні комплекси, максимально наближені до реального суднового машинного відділення, дозволяють курсантам набувати правильних та стійких навичок. Враховуючи важливість тренажерної підготовки у формуванні професійно важливих якостей, внесок у безпеку експлуатації при обслуговуванні машинного відділення суден – її забезпечення потребує комплексного та системного підходу. Розвиток і конструктивне ускладнення спеціальної техніки, що спостерігається в даний час, а також збільшення кількості реалізованих в ній

¹ PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0000-0002-8900-7879, khudiakov.ihor@ksma.ks.ua

² Dsc (Engineering), professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0000-0001-7065-6820, gritsuk_iv@ukr.net

³ PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0000-0002-1256-8053, pohorletskyi.dmytro@ksma.ks.ua

⁴ PhD (Engineering), associate professor, Odesa National Maritime University, Odesa, ORCID: 0000-0002-7172-8678, nbulgakov2@gmail.com

⁵ senior clerk, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0000-0001-6639-1102, v.chernenko18@gmail.com

⁶ postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson

завдань, вимагають від суднових інженер-механіків технічного професіоналізму, дотримання встановлених правил і порядку дії. З цієї причини підготовка операторів немислима без використання тренажерних засобів, які дозволяють заощаджувати ресурси навчального закладу, скоротити вартість навчання, зменшити аварійність дорогого обладнання у процесі його освоєння, відпрацьовувати дії у разі виникнення нестандартних ситуацій. Будь-який тренажер є фізичною моделлю, подібною до реального об'єкта із заданим ступенем точності. Особливістю тренажера є те, що при впливі навколишніх пристроїв та блоків на органи почуттів оператор отримує візуальну, тактильну, звукову та іншу інформацію, яка і створює ілюзію управління СЕУ. Тренажер охоплює найважливіші напрями навчання у повній відповідності до вимог Міжнародної конвенції про підготовку та дипломування моряків та несення вахти STCW з манільськими поправками від 2010 року. Практична підготовка суднових інженер-механіків на тренажерах є завершальною стадією теоретичного навчання. При роботі на тренажері ERS 5000 TechSim, інженер-механік (курсант), застосовуючи наявні знання, отримує досвід, дуже близький до роботи в реальних умовах, і одночасно йде процес уточнення та закріплення його теоретичних знань.

Ключові слова: тренажерне обладнання, ERS 5000 TechSim, діагностика, двигун.

Description of the problem. Despite the installation of the latest energy systems and equipment on ships, improvements in shore services and crew training, the number of ship accidents remains high. The main cause of this situation is the «human factor».

This mainly concerns the appropriate actions of ship engineers during emergency and abnormal conditions of ship power systems. In order to prevent such situations, special attention is paid to improving the safety of ship operation through regular diagnosis of the ship's technical equipment.

Simulator systems are one of the priority directions in training for safe operation of marine power plants. Simulation and training complexes that are as close as possible to the real ship machinery department allow cadets to acquire correct and stable skills.

Given the significance of simulator training in cultivating crucial professional skills and ensuring safe operation while servicing the engine room of ships, its provision demands a comprehensive and systematic approach. The present-day development and construction complexity of specialized equipment, coupled with an increase in the number of tasks performed on it, necessitate technical expertise, adherence to established protocols and procedures from ship engineers. Consequently, operator training without the use of simulators is unfeasible. Simulators allow educational institutions to conserve resources, minimize training expenses, reduce equipment damage, and practice actions in emergency situations such as fire, water ingress, and power plant control system failure.

Analysis of recent research and publications. Simulators can be linked together in a network to practise interaction skills between several people. In this case, a common simulator computer with multiple operator interfaces or separate simulator computers with a matching device between them can be used. Separately, there is a class of simulators that do not use a specific hardware interface. These are pure computer simulators (hereafter referred to as «computer simulators»). The role of the interface in these simulators is performed by standard computer input/output devices: keyboard, mouse, monitor. The use of such simulators is advisable in cases where there is no need to use special equipment in the simulated objects and situations. An example would be simulators for decision making and developing behavioural skills that are not directly related to the control of equipment. The following review provides examples of existing training systems developed around the world. The selection of systems for review has been made in order to cover the most diverse methods of implementation and areas of application, as well as to identify the best examples of training systems.

The simulator can be as simple as a personal computer or as complex as a state-of-the-art multi-processor minicomputer. The simulation computer is connected to the operator interface via an input/output system. The operator interface may consist of control and monitoring panels, video terminals and a distributed control system serving the video terminals. In most cases, the physical characteristics of the HMI correspond exactly, or as closely as possible, to the specific process being simulated.

The software models used in the simulation computer realistically represent the interaction of the components and systems of the simulated process. This is the most important part of the training system;

the quality of the skills acquired depends on how close the simulation model is to a real object or situation.

The operator interface allows the learner to manipulate controls in a manner similar or identical to that used in the actual process. The dynamic response of the simulator should be as close as possible to the response of the systems and components of the real object.

The instructor interface allows you to control the operation of the simulator, select a training scenario and the initial state of the simulated process, introduce failures of the simulated process or its components, or change external factors. Some of the instructor's functions can be performed automatically by the simulation model itself.

Peripherals include printers, alarm panels and any other equipment needed to enhance the realism of the simulated environment or to document the training process.

Simulators are physical models that resemble real objects to a certain degree of accuracy. What sets simulators apart is that external devices and blocks stimulate the operator's sensory organs, providing visual, tactile, and auditory cues, creating an impression of managing the ship's power plant [1, 2].

Scientists from California State University conducted research to investigate how different methods of information delivery impact the quality of information retention. The findings revealed that learners retain approximately 10% of what they hear, about 20% of what they read, and roughly 90% of what they see, hear, and do [3].

The aim of the article is to describe the use of simulators in training for the safe operation of marine power plants.

Objective is to emphasize the importance of simulator training in cultivating critical job skills and ensuring safe operation in ship engine room maintenance.

Methods of the study:

1. Conducting a literature review to gather relevant research and papers on the use of simulators for training in the safe operation of marine power plants.
2. Performing a comprehensive analysis of the Transas ERS 5000 TechSim engine room simulator, including its functionalities and features.
3. Utilizing diagrams and tables to visually present the technical and operational aspects of the LCC tanker and its propulsion system.
4. Providing a detailed account of the simulator training conducted with the Transas ERS 5000 TechSim engine room simulator, including its methodology and outcomes.

The structure of the study consists of an introduction, research problem statement, analysis of the obtained results, and conclusions.

Problem Statement: To conduct technical diagnostics of the ship's power plant using training equipment and software produced by TRANSAS - ERS 5000 TechSim. This version of the simulator is designed to provide comprehensive and advanced training in normal and emergency situations [4-5].

Presentation of the main material.

Analysis of the obtained results. The software of the ERS 5000 TechSim engine room simulator simulates remote control from the ship's central control station (CCS) using so-called «virtual equipment panels» – Dedicated Hardware (DHW panels) combined into a separate DHW console. These panels simulate equipment and can represent individual touch screens or pages on a monitor screen, such as the «Propulsion» console or the virtual «Hardware» console, containing all displays for controlling and monitoring ship systems, units, and mechanisms. The lower part of the simulator screen contains buttons with page names. The list of items on the selected page will open as a pop-up menu [6].

The simulator covers the most important areas of training in full compliance with the requirements of the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) with the Manila Amendments of 2010. It meets the requirements of IMO conventions and resolutions and IEC standards, and is certified by the Norwegian classification society DNV/GL (in accordance with Standard for Certification of Maritime Simulators No. 214, October 2007) [4-6].

The Transas ERS 5000 TechSim engine room simulator includes 15-20 prototype ship models, and diagnostics are performed on the LCC tanker model, the short technical and operational characteristics of which are presented in Table 1.

Table 1

Technical and operational characteristics of the LCC tanker

Tanker LCC (Large Crude Oil Carrier) (Aframax):	
Maximum length	248.92 m
Overall width	43.8 m
Draft by summer load line:	14.925 m
Deadweight	115 000 t

The propulsion system is a six-cylinder, two-stroke, single-acting, low-speed, crosshead-type, with gas-turbine supercharging, reversible main engine of MAN B&W brand, model 6S60MC-C with direct drive to the fixed pitch propeller (refer to Table 2).

Table 2

Technical characteristics of the propulsion system of the LCC tanker

Maximum continuous rating, MCR	13736 kW (at $n = 105 \text{ min}^{-1}$)
Nominal continuous rating, NCR (85% MCR)	12364 kW (at $n = 101 \text{ min}^{-1}$)
Operational speed of the vessel	15,5 kn



Fig. 1 – General view of LCC tanker (Aframax)

Main engine (ME) diagnostics are performed using a Cylinder Combustion Quality diagnostic panel (Cylinder Combustion Process tab) (Fig. 2) and an Indicator Diagram Comparison panel (Comparison tab) (Fig. 3).

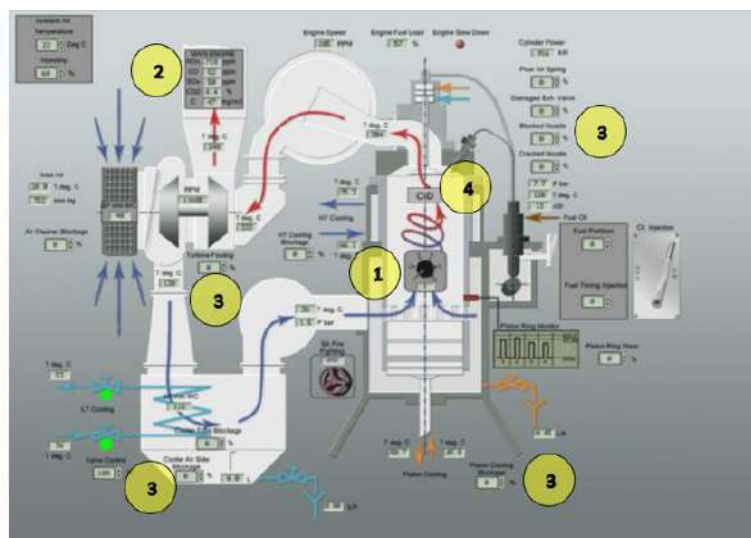


Fig. 2 – Diagnostic panel for fuel combustion process quality in engine cylinder

Clicking on the Diag\Cylinder Combustion Process menu item opens an interactive ME diagram that allows the effects of different fuel combustion qualities in the cylinders to be observed. It is also possible to manipulate the combustion process by making online adjustments or entering disturbances in real time.

The diagram includes:

- 1 selector switch – to select the required cylinder;
- 2 MAIN ENGINE – ME exhaust gas indicator;
- 3 rotation controllers (sliders) – to set the specified parameter values for introducing faults;
- Digital indicators for displaying the actual response of the ME system parameters;
- 4 CID button – to open the indicator diagram panel in a pop-up window [6].

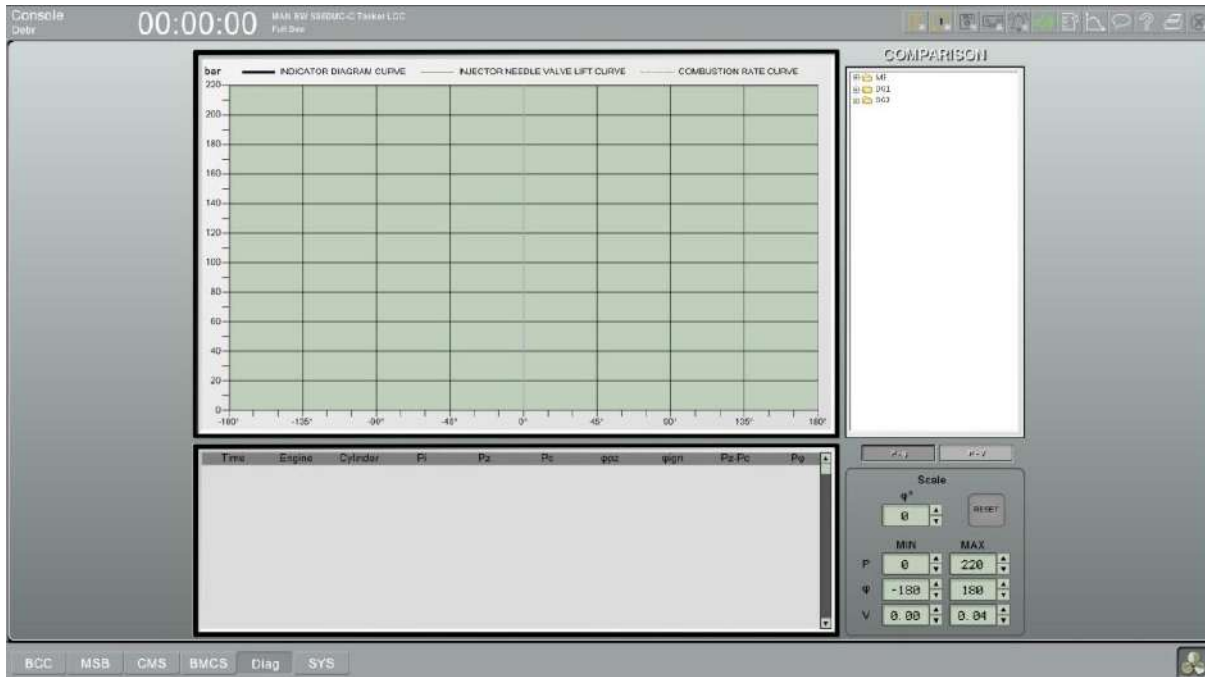


Fig. 3 – Indicator diagram panel

On the cylinder combustion process diagnostic panel for the main engine (ME), we have the ability to simulate faults such as: • contamination of the air filter for the turbocharger air inlet; contamination of the gas component of the turbocharger air inlet; • contamination of the air cooler after the turbocharger air inlet; • contamination from the cooling system; • temperature difference of the high temperature (HT) cooling circuit; temperature difference of piston cooling; exhaust valve air spring density; damage (burning) of the exhaust valve; contamination or cracks in the fuel injector nozzle; changes in fuel supply; changes in fuel injection timing angle; wear of piston rings.

Considering that damaged or worn piston rings in 2-stroke engines are difficult to diagnose based on indirect parameters, the damage may not be apparent until it becomes serious. This article describes the diagnosis of this particular fault.

The diagnosis is made using the following algorithm:

Take an indicator diagram of cylinder 1 without wear on the main engine piston rings (Fig. 4) and store it in the diagnostic panel memory (Fig. 3). Record the engine parameters in the CMS, M/E Overview tab (Fig. 5).

Using the Piston Ring Wear Simulator on the Cylinder Combustion Diagnostic Panel (Fig. 2), set the wear value of the main engine piston rings sequentially to 20%, 40% and 60%. At each piston ring wear value, take a graph of Cylinder #1 and record the engine parameters in the CMS, M/E Overview tab and the exhaust gas quality parameters in the Diag / Emission tab.

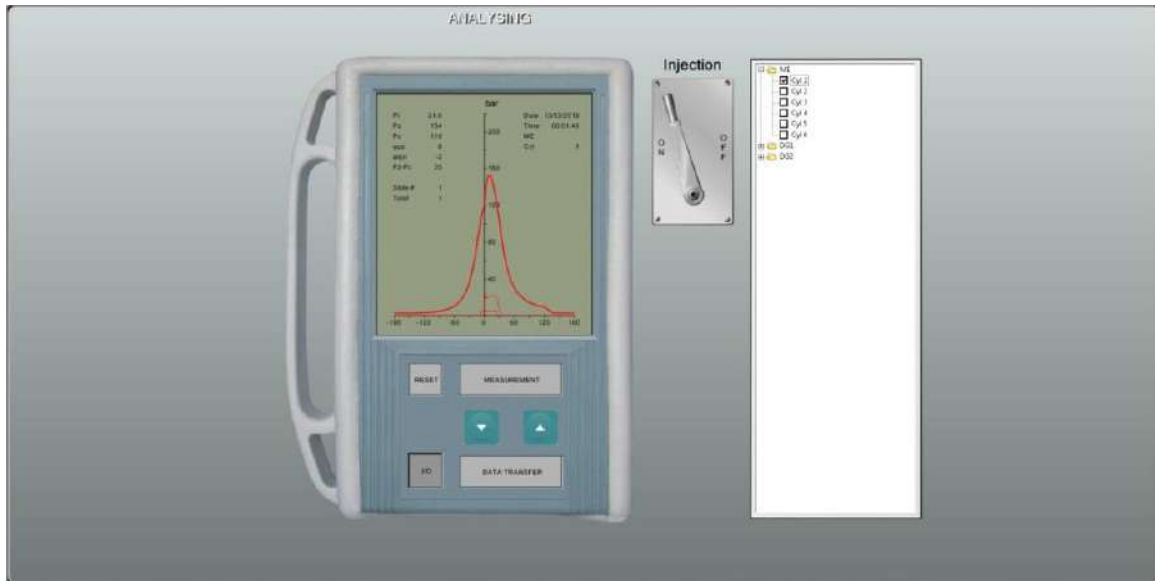


Fig. 4 – Taking the indicator diagram in cylinder #1 with no wear on the piston rings in the main engine



Fig. 5 – Parameters of the main engine without worn piston rings in cylinder #1

Following the same methodology as described in Fig. 2, the piston ring wear level of the gas turbine engine is set to 40% and 60%. Subsequently, an indicator diagram is taken at each position, and the engine parameters are recorded. These indicator diagrams are saved in the diagnostic panel memory for future reference.

For easier analysis, the ERS 5000 TechSim engine room simulator software provides the feature of overlaying previously saved diagrams on the indicator diagram panel, as shown in Fig. 6. The numerical values of the engine parameters are also displayed on the same screen and highlighted in the same color as the graphs, enabling a comprehensive analysis of the engine's performance at different wear levels of the piston rings.

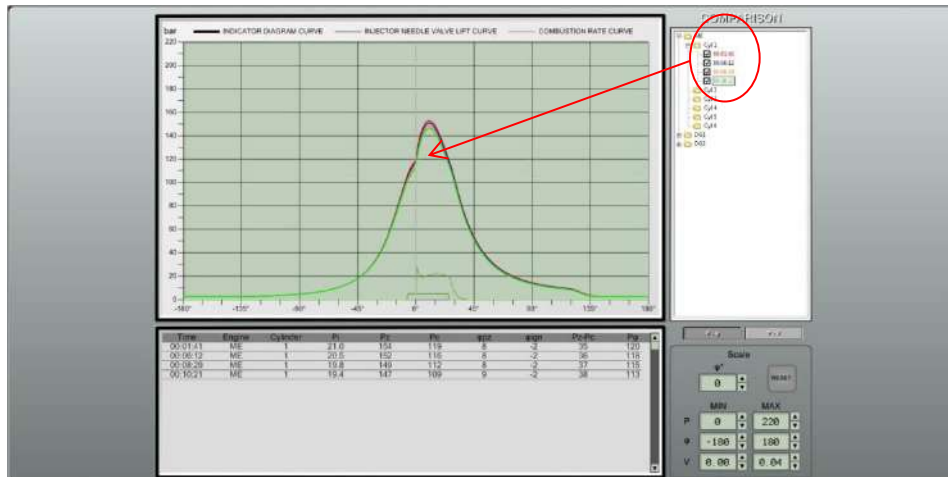


Fig. 6 – Indicator diagrams of different states of the main engine

As a result of the analysis of the changes in the gas turbine engine parameters and the indicator diagrams themselves at different levels of piston ring wear, the following changes were identified, indicating a change in the engine condition:

- A decrease in compression pressure P_c from 119 to 109 bar, CID;
- A decrease in mean indicated pressure P_i from 21.0 to 19.4 bar
- A decrease in maximum combustion pressure P_z from 154 to 147 bar
- An increase in the return oil temperature of the piston cooling system;
- An increase in the consumption of lubricating oil in the cylinder.

The graphs were made with a constant fuel supply.

Conclusions

The main advantages of using simulators in the training process are:

- The possibility of conducting laboratory work in a frontal method (all students perform a task at the same time), which significantly increases the efficiency of this type of learning;
- The ability to model and safely investigate extreme and emergency modes of equipment operation;
- Ability to change experimental conditions extensively;
- Intensification of learning without losing the quality of material assimilation.

Practical training of marine engineers on simulators is the final stage of theoretical training. While working on the ERS 5000 TechSim simulator, mechanical engineers (trainees) apply the acquired knowledge, gain experience very close to working in real conditions, and at the same time the process of refining and consolidating their theoretical knowledge is underway.

References:

1. I.V. Gritsuk, V. Volkov, V. Mateichyk, Y. Grytsuk, Y. Nikitchenko, D. Klets, M. Smieszek, Y. Volkov, R. Symonenko, and A. Grytsuk, «Information Model of V2I System of the Vehicle Technical Condition Remote Monitoring and Control in Operation Conditions», *SAE Technical Paper*, 2018-01-0024, pp. 1-14, 2018. doi: 10.4271/2018-01-0024.
2. N.Іа. Novorushchenko, *Systemotekhnika avtomobylnoho transporta (raschetnyye metody issledovaniy): monografya* [System engineering of motor transport (calculation methods of research): monograph]. Kharkov, Ukraine: KhNAHU Publ., 2011. (Rus.)
3. T. Metcalf, «Listening to your clients», *Life Association News*, vol. 92(7), pp. 16-18, 1997.
4. *International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers*, July 1978; *International Code on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers*, 1995, with amendments adopted in 2010 (Manila Amendments).
5. *IMO Model Course 2.07 «Engine-room simulator»*. 2017.
6. *TechSim 5000 simulator. ERS 5000 TechSim. MAN B&W 6S60MC-C Diesel Engine – Tanker LCC (Aframax)*. 2014.

Перелік використаних джерел:

1. Information Model of V2I System of the Vehicle Technical Condition Remote Monitoring and Control in Operation Conditions / I.V. Gritsuk, V. Volkov, V. Mateichyk, Y. Grytsuk, Y. Nikitchenko, D. Klets, M. Smieszek, Y. Volkov, R. Symonenko, A. Grytsuk. *SAE Technical Paper*. 2018-01-0024. 2018. Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0024>.
2. Говорущенко Н.Я. Системотехника автомобильного транспорта (расчетные методы исследования). Харьков : ХНАДУ, 2011. 292 с.
3. Metcalf T. (1997). Listening to your clients. *Life Association News*. 1997. Vol. 92(7). Pp. 16-18.
4. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, July 1978; International Code on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers, 1995, with amendments adopted in 2010 (Manila Amendments).
5. IMO Model Course 2.07 «Engine-room simulator». 2017.
6. TechSim 5000 simulator. ERS 5000 TechSim. MAN B&W 6S60MC-C Diesel Engine – Tanker LCC (Aframax). 2014. 279 p.

Reviewer: E.V. Bilousov
Dsc (Engineering), prof., KSMA

The article was received on 21.08.2023

The article was admitted on 17.09.2023

УДК 656.616.2

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300114

© Гусак І.Л.*

ДОСЛІДЖЕННЯ ФАКТОРІВ РИЗИКУ ПЛАВАННЯ СУДНА В АКВАТОРІЇ МОРСЬКОГО ПОРТУ

Метою статті є визначення, систематизація та аналіз факторів ризиків для підвищення безпеки плавання танкера в акваторії морського порту. У статті розглянуто методи оцінки ризиків та управління ризиками при плануванні плавання танкерів в акваторії порту. Запропонована класифікація факторів ризику плавання танкера в акваторії морського порту за п'ятьма класами: клас ризиків щодо структури порту та його акваторії; клас ризиків щодо гідрометеорологічних чинників; клас ризиків щодо керованості судна; клас ризиків щодо технічних засобів та методів судноплавства; клас ризиків щодо системи управління судноплавством в акваторії порту. Запропоновано проводити кількісну оцінку ризиків, що описуються, за допомогою коефіцієнтів безпеки. Ці коефіцієнти безпеки отримуються на основі експертних оцінок, які відображають складність виконання аналізованих операцій, що відповідає прийнятним підходам у морському судноплавстві. З урахуванням вже розроблених практикою методів інтуїтивної оцінки небезпек, коефіцієнти безпеки (для кожного фактору ризику) визначаються через ступінчасту функцію. Найбільш суттєвим науковим результатом є створення єдиного підходу щодо кількісної оцінки для всіх врахованих факторів ризику та побудова дерева факторів ризику плавання танкера в акваторії морського порту. Це є основою для наступного етапу оцінки коефіцієнта навігаційної безпеки плавання в акваторії порту та розробки комплексної моделі аналізу ризиків. Таким чином, проведений аналіз можливих ризиків, пов'язаних зі впливом різних факторів на безпеку навігації танкерів в акваторії морського порту. Ці ризики охоплюють широке коло впливів, включаючи структуру порту та акваторію порту, вплив гідрометеорологічних факторів, характеристики судна та його керованість, а також організацію контролю та управління рухом суден у

* здобувачка ступеня доктора філософії, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-1546-5914

акваторії порту. Розроблена методика кількісної оцінки виявлених ризиків дозволила обчислювати коефіцієнти навігаційної безпеки для конкретних ділянок та всієї портової території. Особливості запропонованих підходів до оцінки ризиків та наведена методика можуть бути ключовими інструментами для визначення рівня безпеки навігації та прийняття обґрунтованих рішень при навігації суден у межах портів, можуть сприяти більш точному аналізу ризиків та впливу різних факторів на безпеку навігації.

Ключові слова: морське судноплавство, безпека, безпека судноводіння, фактор ризику, танкери, акваторія порту, гідрометеорологічні фактори, керованість судно, порт, технічні засоби та методи судноплавства, судноплавство.

I.L. Husak. Research of risk factors for tanker navigation in the seaport area. The article is aimed at identifying, systematizing and analyzing risk factors to improve the safety of tanker navigation in the seaport waters. The article discusses methods of risk assessment and risk management when planning tanker navigation in the port area. The author proposes a classification of risk factors for tanker navigation in the seaport water area into five classes: class of risks regarding the structure of the port and its water area; class of risks regarding hydrometeorological factors; class of risks regarding ship controllability; class of risks regarding technical means and methods of navigation; class of risks regarding the navigation management system in the port water area. It is proposed to quantify the described risks using safety factors. These safety factors are obtained based on expert assessments that reflect the complexity of the analyzed operations, which corresponds to the accepted approaches in maritime shipping. Considering the methods of intuitive hazard assessment already developed in practice, the safety factors (for each risk factor) are determined through a step function. The most significant scientific result is the creation of a unified approach to quantification for all risk factors considered and the construction of a risk factor tree for tanker navigation in the seaport area. This is the basis for the next stage of assessing the coefficient of navigational safety of navigation in the port area and developing a comprehensive risk analysis model. Thus, an analysis of possible risks associated with the impact of various factors on the safety of tanker navigation in the seaport waters was carried out. These risks cover a wide range of influences, including the structure of the port and port waters, the impact of hydrometeorological factors, ship characteristics and its controllability, as well as the organization of control and management of ship traffic in port waters. The developed methodology for quantifying the identified risks made it possible to calculate the coefficients of navigation safety for specific areas and the entire port area. The peculiarities of the proposed approaches to risk assessment and the methodology presented can be key tools for determining the level of navigation safety and making informed decisions when navigating ships within ports and can contribute to a more accurate analysis of risks and the impact of various factors on navigation safety.

Key words: sea navigation, safety, safety of navigation, risk factor, tankers, port water area, hydrometeorological factors, ship controllability, port, technical means and methods of navigation, shipping.

Постановка проблеми. В останні роки вимоги щодо безпеки морського судноплавства та запобігання забрудненню морського середовища стають більш жорсткими. Судна перевозять мільйони тон вантажів щороку, і вони викидають у водойми велику кількість забруднюючих речовин, таких як нафта, хімічні сполуки та сміття. Це забруднення може мати руйнівний вплив на навколишнє середовище, а також на здоров'я людей. Для захисту морського середовища від забруднення важливо приймати заходи зі зменшення викидів забруднюючих речовин із суден. Один із способів зробити це – покращення методів оцінки ризиків та управління ризиками при плануванні плавання танкерів в акваторії порту.

Міжнародна морська організація (ІМО) активно досліджує методи оцінки ризиків та управління ризиками для додаткового підвищення рівня морської безпеки. На рівні ІМО розроблено цілий ряд процедурних документів, а власники суден та інші учасники морської індустрії прагнуть інтегрувати методи управління ризиками у свою щоденну діяльність, керуючись

вказаними директивами та рекомендаціями. Тим не менше, прикладна теорія оцінки ризиків та управління ризиками в морському судноплаванні досі не розроблена повністю. Багато методів перенесено з інших галузей, а багато поширених документів залишаються занадто загальними та недостатньо придатними для забезпечення безпеки.

Отже, необхідна розробка специфічних методів оцінки ризиків та управління ризиками, адаптованих до особливостей морського судноплавання. Також варто відзначити, що проблема забезпечення безпеки акваторії залишається актуальною, особливо в контексті збільшення розмірів суден та вартості вантажоперевезень. Постійно виникають суперечки та судові процеси щодо безпеки заходу суден до портів у різних навігаційних, гідрографічних та метеорологічних умовах.

Враховуючи вищевказане, розробка методів аналізу та управління ризиками при плануванні плавання танкерів в акваторії порту є актуальним завданням. Це включає різноманітні підходи, в тому числі дослідження факторів ризику плавання танкера в акваторії морського порту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час існує значна кількість досліджень, присвячених підвищенню безпеки в акваторії порту та оцінці ризиків, що впливають на безпеку судноплавання [1-8].

Так, у статті [1] підкреслюється, що аварії з небезпечними вантажами спричиняють серйозні збитки. Фактори, які спричиняють ці аварії в порту при обробці небезпечних вантажів, потребують ретельного аналізу та оцінки, що наразі знаходяться у стадії початкового вивчення. Відповідно до цих загальноновизнаних проблем, дане дослідження націлене на оцінку множинних ризиків, пов'язаних з обробкою небезпечних вантажів у порту. Пропонована методологія комбінує експертні оцінки та аналіз наукової літератури для визначення факторів та встановлення їх причинно-наслідкових зв'язків, а також використовує баєсовську мережу для отримання висновків, заснованих на попередніх звітах про аварії.

Проведені дослідження показують, що в нормальних умовах ймовірність виникнення аварій із серйозними наслідками становить більше 0.5, причому найбільший внесок – це людський чинник. За наявності ознак аварії, пов'язаної із забрудненням навколишнього середовища, ймовірність випадку управлінської аварії зростає до 0.1. Проведено аналіз чутливості для виявлення найкритичніших факторів аварій із небезпечними вантажами. Дослідження свідчить, що для уникнення нещасних випадків із небезпечними вантажами та зниження важкості наслідків, портові органи, зацікавлені державні структури та інші відповідні установи повинні приділяти особливу увагу кваліфікації, навчанню та ставленню залученої робочої сили. Крім цього, встановлено, що розробка та впровадження жорстких протоколів безпеки мають вирішальне значення. Дослідження має практичне значення для поліпшення безпеки та зменшення ризиків, пов'язаних із перевезенням небезпечних вантажів в порту.

Промислова діяльність у порту має у своєму складі всі ті види діяльності, які стосуються нафтових терміналів, хімічних та нафтохімічних заводів. З іншого боку, портово-суднова діяльність – це діяльність, пов'язана із завантаженням та розвантаженням вантажів, нафтових пристаней та їх пошуком [2].

Додатково, враховуючи їх розташування у прибережних областях, порти, безсумнівно, є найскладнішими структурними системами з точки зору охорони навколишнього середовища, оскільки в них здійснюється ряд вантажних операцій [3].

Цей аспект розглядається як центральний пункт обговорення, а аварійні розливи визнаються основною причиною забруднення води [4]. Аварії у портах описуються як найбільш поширені, на які припадає 51% викидів, що забруднюють воду. Крім того, рекордна кількість аварій у порту (59%) викликана та пов'язана з розливами нафти [3].

Отже, швидке поширення забруднення через розливи нафти є однією з найбільш серйозних проблем, з якими стикаються порти під час завантаження вантажів, наливних вантажів, пальне постачання та судноплавання.

Оцінка ризику завжди є ключовою проблемою в небезпечних виробничих зонах, особливо у морському транспорті, та її не можна просто ігнорувати. Основне завдання полягає у виявленні всіх показників, що негативно впливають на безпеку, та в мінімізації можливих ризиків [5]. Ймовірність виникнення аварії і негативних наслідків, пов'язаних з нею, визначається як ризик. У морських перевезеннях ризик та його наслідки зазвичай мають негативний вплив на економічну

стабільність, включаючи фінансові збитки, на здоров'я людей через нещасні випадки, а також на навколишнє середовище через забруднення [5].

Формальна оцінка безпеки (FSA) введена Міжнародною морською організацією для управління функціональністю морської транспортної системи (MTS). Важливу роль у такій оцінці грають передвідомості від експертів, які мають досвід у цій області, і ці знання є важливим джерелом інформації для оцінки ризику [6].

Проте існує проблема з попередніми знаннями, адже доступні дані є більш реактивними, ніж прогнозуючими. Дослідження підкреслює, що реактивні підходи, як правило, є пасивними, і їх обмежений систематичний підхід не враховує зміни, змінні або недоліки як джерела, що впливають на загальний прогноз [7, 8]. У такому контексті важливими є системи, які можуть бути використані для розрахунку ймовірностей та наслідків, що виникають в результаті аварій.

Метою статті є визначення, систематизація та аналіз факторів ризиків для підвищення безпеки плавання танкера в акваторії морського порту.

Виклад основного матеріалу. В статті пропонується класифікація факторів ризику плавання танкера в акваторії морського порту за п'ятьма класами:

- 1) клас ризиків щодо структури порту та його акваторії;
- 2) клас ризиків щодо гідрометеорологічних чинників;
- 3) клас ризиків щодо керованості судна;
- 4) клас ризиків щодо технічних засобів та методів судноплавства;
- 5) клас ризиків щодо системи управління судноплавством в акваторії порту.

Клас ризиків щодо структури порту і його акваторії містить стан причалів й інших споруд порту, глибину і ширину фарватеру, наявність підводних об'єктів, метеорологічні, гідрологічні та екологічні умови. Ці фактори можуть впливати на безпеку судноплавства в акваторії порту, а також на навколишнє середовище.

До класу ризиків щодо гідрометеорологічних чинників входять такі фактори, як сильний вітер, високі хвилі, шторм, туман і лід. Ці фактори можуть впливати на безпеку судноплавства в акваторії порту, а також на навколишнє середовище. Для мінімізації ризиків, пов'язаних з цими факторами, необхідно регулярно отримувати прогноз погоди та приймати рішення про судноплавство на основі прогнозу погоди. Також необхідно мати на борту судна відповідне обладнання для боротьби з гідрометеорологічними чинниками.

Клас ризиків щодо керованості судна включає в себе технічний стан судна, досвід і кваліфікацію екіпажу, а також навколишні умови. Ці фактори можуть впливати на здатність судна управлятися і збільшити ризик аварії. Щоб мінімізувати ризики, пов'язані з керованістю судна, необхідно регулярно проводити техогляд судна і забезпечувати його справність, підбирати екіпаж з досвідом і кваліфікацією, яка дозволяє якісно управляти судном, а також враховувати навколишні умови і приймати рішення про судноплавство на основі прогнозу погоди.

Клас ризиків щодо технічних засобів та методів судноплавства складається з таких елементів: технічний стан судна, досвід і кваліфікація екіпажу, навколишні умови та методи судноплавства. Ці фактори, перетинаючись з попереднім класом ризиків, також можуть безпосередньо впливати на безпеку судноплавства і збільшити ризик аварії. Мінімізація ризиків, пов'язаних з цими факторами, складається з необхідності проведення ретельних та регулярних перевірок технічного стану судна, якісного підбору екіпажу із значним досвідом, що дозволяє відповідально управляти судном, враховувати навколишні умови і приймати рішення про судноплавство на основі прогнозу погоди, а також використовувати правильні методи судноплавства і дотримуватися правил безпеки.

До класу ризиків щодо системи управління судноплавством (СУСП) в акваторії порту входять такі основні елементи: технічний стан СУСП, кваліфікація персоналу, який обслуговує СУСП, навколишні умови та методологія управління судноплавством. Ці фактори можуть впливати на безпеку судноплавства в акваторії порту і збільшити ризик аварії. Мінімізація ризиків, викликаних цими факторами, складається у необхідності регулярних технічних оглядів СУСП, забезпечення відповідної кваліфікації персоналу, який обслуговує СУСП, врахування навколишніх умов, прийняття рішення про судноплавство на основі прогнозу погоди, використання правильної методології управління судноплавством і дотримання правил безпеки.

В статті пропонується проводити кількісну оцінку ризиків, що описуються, за допомогою тільки коефіцієнтів безпеки. Ці коефіцієнти отримуються на основі експертних оцінок, які

відображають складність виконання аналізованих операцій. Це відповідає прийнятим підходам у морському судноплаванні. З урахуванням вже розроблених практикою методів інтуїтивної оцінки небезпек, коефіцієнти безпеки (для кожного фактору ризику) визначаються через ступінчасту функцію з такою структурою:

$$K_C = \begin{cases} P_C(z), \text{ якщо } \Delta_i \leq 2\Delta_{add}; \\ 2, \text{ якщо } 2\Delta_{add} < \Delta_i \leq 3\Delta_{add}; \\ 3, \text{ якщо } \Delta_i > 3\Delta_{add}, \end{cases} \quad (1)$$

де K_C – коефіцієнт безпеки класу C ;

Δ_{add} – найменше допустиме значення цього параметра, при якому виконання відповідної операції вважається небезпечним.

Якщо значення параметру $\Delta_i \leq \Delta_{add}$ перевищує певний поріг, то розрахунок припиняється і вказується наявність небезпечного фактору ризику, що означає недопустимість цього ризику.

Якщо виконується умова $\Delta_i \leq 2\Delta_{add}$, то коефіцієнт безпеки оцінюється за допомогою методів теорії ймовірностей, що характеризує ймовірність безпечного виконання аналізованої операції. У такій ситуації капітан судна розглядає її як потенційно небезпечну, що вимагає високої уваги та контролю. Визначивши допустимий рівень ймовірності P_{add} , отримується мінімальне допустиме значення параметра Δ_i , при якому виконання цієї операції вважається небезпечним.

Якщо прогнозоване значення оцінюваного параметра Δ_i перевищує допустиме (порогове) значення в 2-3 рази, то капітан класифікує цю ситуацію як стандартну ($K_C = 2$), що передбачає використання вже звичних методів судноплавання. Проте, якщо прогнозоване значення оцінюваного параметра перевищує допустиме більше ніж у три рази, то капітан розуміє, що ризик від цього фактору є край низьким ($K_C = 3$).

Отже, запропонована система ступеневої кількісної оцінки ризиків найбільше відповідає підходам капітанів і тому інтуїтивному сприйняттю небезпеки, яке накопичене поколіннями (ситуація {важка, стандартна, проста}).

Якщо Δ_i не описується з точки зору ймовірності $P_C(z)$, то

$$K_C = \begin{cases} 0, \text{ якщо } \Delta_i \leq \Delta_{add}; \\ 1, \text{ якщо } \Delta_{add} < \Delta_i \leq 2\Delta_{add}; \\ 2, \text{ якщо } 2\Delta_{add} < \Delta_i \leq 3\Delta_{add}; \\ 3, \text{ якщо } \Delta_i > 3\Delta_{add}, \end{cases} \quad (2)$$

де $K_C = 0$ вказує на значення, що може становити небезпеку, і розрахунок зупиняється з інформацією про наявний ризик.

Запропоновано виразити узагальнену формулу індивідуального коефіцієнта безпеки для різних факторів ризику таким чином:

$$K_{ij} = \alpha_i \beta_i K_{C_{ij}}, \quad (3)$$

де $\alpha_i \beta_i$ – додаткові коефіцієнти, які відображають особливості врахування розглянутих факторів ризику в конкретних завданнях навігації (наприклад, залежно від напрямку вітру і/або течії, співвідношення швидкості судна до швидкості течії тощо).

Отримавши кількісні оцінки всіх ризикових факторів з використанням коефіцієнтів безпеки $K_{C_{ij}}$, на наступному етапі запропоновано ввести остаточний коефіцієнт безпеки K_{CS_j} для множини підкласів ризиків j -го класу:

$$K_{CS_j} = f(\{K_{ij}\}). \quad (4)$$

Остаточний коефіцієнт безпеки для структури портових вод буде залежати від коефіцієнтів безпеки для глибин, ширини прямолінійного та криволінійного фарватеру при односторонньому та двосторонньому русі суден з урахуванням концепції зони навігаційної безпеки. Вираз, який визначає функціональну залежність, буде змінюватися залежно від специфіки об'єднаних факторів ризику. Отже, загальний вираз для остаточного коефіцієнта безпеки для множини підкласів ризиків j -го класу представляється у такому вигляді:

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^N P_i K_{ij}}{\sum_{i=1}^N P_i}, \quad (5)$$

де P_i – коефіцієнт вагомості кожного параметра, що оцінюється залежно від умов плавання судна в даному порту протягом визначеного періоду часу.

На рис. 1 наведено дерево факторів ризику, які входять до п'яти базових класів ризиків плавання танкера в акваторії морського порту.

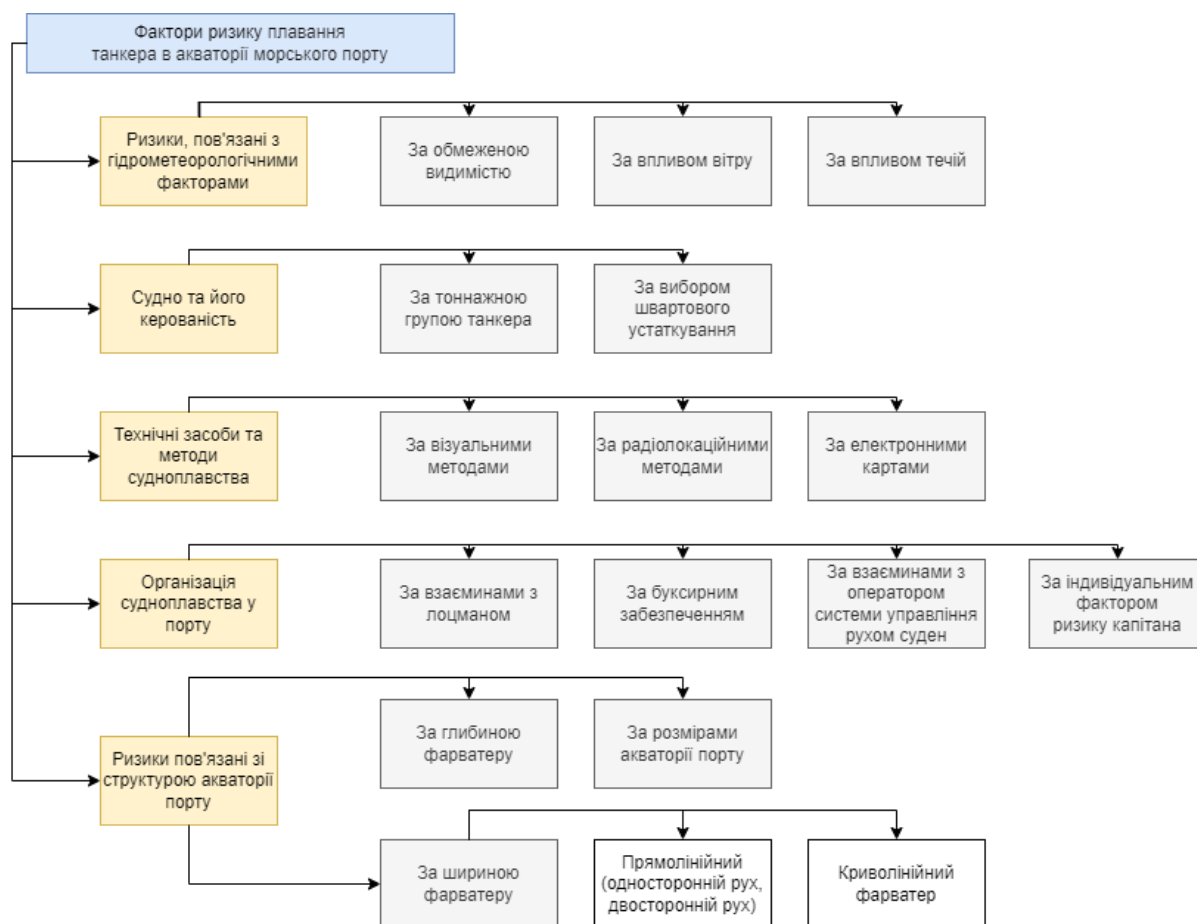


Рис. 1 – Дерево факторів ризику плавання танкера в акваторії морського порту

Отже, головним результатом є створення єдиного підходу щодо кількісної оцінки для всіх враховуваних факторів ризику та побудова дерева факторів ризику плавання танкера в акваторії морського порту. Це є основою для наступного етапу оцінки коефіцієнта навігаційної безпеки плавання в акваторії порту та розробки комплексної моделі аналізу ризиків.

Висновки

Таким чином, у даній статті проведений аналіз можливих ризиків, пов'язаних зі впливом різних факторів на безпеку навігації танкерів в акваторії морського порту. Ці ризики охоплюють різноманітні аспекти, включаючи структуру порту та портові води, вплив гідрометеорологічних факторів, характеристики судна та його керування, а також організацію контролю та управління рухом суден у портових водах.

У рамках дослідження запропоновано підходи щодо кількісної оцінки виявлених ризиків. Це дозволило отримати вирази для обчислення коефіцієнта навігаційної безпеки для конкретних ділянок та всієї портової території. Підходи до оцінки ризиків та розроблені вирази можуть бути ключовими інструментами для визначення рівня безпеки навігації та прийняття обґрунтованих рішень у галузі навігації.

Важливо підкреслити, що отримані результати мають практичне значення для підвищення морської безпеки в межах портів. Запропоновані підходи сприяють більш точному аналізу ризиків та глибокому розумінню впливу різних факторів на безпеку навігації.

Таким чином, ця робота є важливим кроком до покращення ефективності та надійності навігації в морських портах.

Перелік використаних джерел:

1. Khan R.U., Yin J., Mustafa F.S. Accident and pollution risk assessment for hazardous cargo in a port environment. *PLoS ONE*. 2021. Vol. 16(6). Pp. 1-20. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252732>.
2. Predicting the frequency of accidents in port areas by developing event trees from historical analysis / A. Ronza, S. Félez, R.M. Darbra, S. Carol, J.A. Vilchez, J. Casal. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003. Vol. 16(6). Pp. 551-560. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2003.08.010>.
3. Darbra R.-M., Casal J. Historical analysis of accidents in seaports. *Safety Science*. 2004. Vol. 42(2). Pp. 85-98. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(03\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(03)00002-X).
4. Development of a system of indicators for sustainable port management / E. Peris-Mora, J.M.D. Orejas, A. Subirats, S. Ibáñez, P. Alvarez. *Marine Pollution Bulletin*. 2005. Vol. 50(12). Pp. 1649-1660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.06.048>.
5. Ellis J. Undeclared dangerous goods – Risk implications for maritime transport. *WMU Journal of Maritime Affairs*. 2010. Vol. 9(1). Pp. 5-27. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03195163>.
6. Berle Ø., Asbjørnslett B.E., Rice J.B. Formal Vulnerability Assessment of a maritime transportation system. *Reliability Engineering & System Safety*. 2011. Vol. 96(6). Pp. 696-705. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2010.12.011>.
7. Montewka J., Ehlers S., Goerlandt F., Hinz T., Tabri K., Kujala P. A framework for risk assessment for maritime transportation systems – A case study for open sea collisions involving RoPax vessels. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. Vol. 124. Pp. 142-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.11.014>.
8. Goerlandt F., Montewka J. A framework for risk analysis of maritime transportation systems: A case study for oil spill from tankers in a ship-ship collision. *Safety Science*. 2015. Vol. 76. Pp. 42-66. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.02.009>.

References:

1. R.U. Khan, J. Yin, and F.S. Mustafa, «Accident and pollution risk assessment for hazardous cargo in a port environment», *PLoS ONE*, vol. 16(6), pp. 1-20, 2021. doi: 10.1371/journal.pone.0252732.
2. A. Ronza, S. Félez, R.M. Darbra, S. Carol, J.A. Vilchez, and J. Casal, «Predicting the frequency of accidents in port areas by developing event trees from historical analysis», *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 16(6), pp. 551-560, 2003. doi: 10.1016/j.jlp.2003.08.010.
3. R.-M. Darbra, and J. Casal, «Historical analysis of accidents in seaports», *Safety Science*, vol. 42(2), pp. 85-98, 2004. doi: 10.1016/S0925-7535(03)00002-X.
4. E. Peris-Mora, J.M.D. Orejas, A. Subirats, S. Ibáñez, and P. Alvarez, «Development of a system of indicators for sustainable port management», *Marine Pollution Bulletin*, vol. 50(12), pp. 1649-1660, 2005. doi: 10.1016/j.marpolbul.2005.06.048.
5. J. Ellis, «Undeclared dangerous goods – Risk implications for maritime transport», *WMU Journal of Maritime Affairs*, vol. 9(1), pp. 5-27, 2010. doi: 10.1007/BF03195163.
6. Ø. Berle, B.E. Asbjørnslett, and J.B. Rice, «Formal Vulnerability Assessment of a maritime transportation system», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96(6), pp. 696-705, 2011. doi: 10.1016/j.ress.2010.12.011.
7. J. Montewka, S. Ehlers, F. Goerlandt, T. Hinz, K. Tabri, and P. Kujala, «A framework for risk assessment for maritime transportation systems – A case study for open sea collisions involving RoPax vessels», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 124, pp. 142-157, 2014. doi: 10.1016/j.ress.2013.11.014.
8. F. Goerlandt, and J. Montewka, «A framework for risk analysis of maritime transportation systems: A case study for oil spill from tankers in a ship-ship collision», *Safety Science*, vol. 76. pp. 42-66, 2015. doi: 10.1016/j.ssci.2015.02.009.

Рецензент: І.П. Гончарук
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 25.06.2023
Стаття прийнята 13.07.2023

© Bigun S.V.¹, Simanenkov A.L.², Ivanov A.A.³, Gytnyk D.V.⁴, Polyvoda V.V.⁵

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF SHIP MONITORING SYSTEMS AND WAYS TO THEIR IMPROVING

This article provides a comprehensive review of the K-Chief 600 system, yielding essential conclusions regarding its features. It shows next advantages: Time Savings and Efficiency, the K-Chief 600 system affords vessel operators real-time access to critical data and controls, leading to time savings and ensuring the vessel's efficient operation; User-Friendly Interface, the system's interface is designed for quick adaptation by operators, facilitating easy monitoring and control of various ship equipment aspects; Reporting and Analysis Capabilities, the system offers reporting and data analysis capabilities crucial for logging, equipment performance analysis, and maintenance planning; Flexibility and Expandability, its modular design renders the system flexible and expandable, enabling adaptation to specific vessel needs. Beside of pointed advantages, also disadvantages taking place, such an: High Costs and Installation, a major drawback may be the high cost of the K-Chief 600 system, potentially limiting its accessibility to certain operators; Need for Personnel Training, effective system utilization requires training for operators and vessel personnel, constituting a time-consuming and expensive process; Dependence on Electronic Systems, similar to any electronic system, there is a risk of failure or malfunctions, necessitating specific spare parts and technical support. In line with pointed advantages and disadvantages, there are some ways to improve such a systems: Increased Accessibility, developers could explore avenues to reduce the system's cost, making it more accessible to a broader range of operators; Increased Automation, expanding functionality for greater automation of control and monitoring processes can enhance shipping efficiency and safety; Reliability and Cybersecurity, continuously updating the system to enhance reliability and protect against cyber threats is a critical aspect of further improvement. In summary, the K-Chief 600 system proves to be a powerful tool for shipboard control and monitoring. However, cost considerations, personnel training, and safety concerns must be factored in for its effective use.

Key words: ship monitoring systems, real-time data access, maintenance planning, personnel training, electronic systems reliability, automation in shipping, cybersecurity, maritime safety, vessel efficiency.

Бігун С.В., Сіманенков А.Л., Іванов А.А., Житник Д.В., Поливода В.В. Аналіз сучасного стану систем моніторингу суден та шляхи їх вдосконалення. Ця стаття глибоко розглядає функціонал системи K-Chief 600, зосереджуючись на ключових аспектах, що визначають її ефективність. Серед суттєвих переваг варто відзначити можливість операторів суден зекономити час та забезпечити ефективну роботу судна завдяки реальному доступу до критичних даних та управлінських функцій. Інтерфейс системи, спроектований з огляду на зручність користування, дозволяє

¹ post graduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0009-0007-6385-3296, bigunsergej4@gmail.com

² Ph.D., senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0000-0003-0797-5276, simanenkov.andrii@gmail.com

³ PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0000-0002-1919-2570, artiva1978@gmail.com

⁴ PhD (Engineering), senior lecturer, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0000-0001-9836-3296, danylzhynyk@gmail.com

⁵ PhD (Engineering), associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0000-0001-7742-255X, polyvodavv@gmail.com

операторам швидко адаптуватися, спрощуючи моніторинг та управління різними аспектами обладнання судна. Звітність та аналітичні можливості системи відіграють ключову роль у веденні журналу, аналізі продуктивності обладнання та розробці планів технічного обслуговування. Модульна конструкція K-Chief 600 надає гнучкість та можливість розширення, що дозволяє пристосовувати систему до конкретних потреб конкретного судна. Однак серед недоліків варто відзначити високі витрати та складність встановлення, що може ускладнити доступність для певних операторів. Для ефективного використання системи важливо провести навчання операторів та персоналу, що може займати багато часу та ресурсів. Залежність від електронних систем також вносить свої виклики, оскільки існує потенційний ризик відмов та потреба у спеціальних запчастинах та технічній підтримці. У зв'язку із зазначеними плюсами та мінусами, перспективи вдосконалення системи включають зниження вартості для більш широкого кола операторів, розширення автоматизації функцій контролю та моніторингу для поліпшення ефективності та безпеки, а також систематичне оновлення для підвищення надійності та кіберзахисту. Загалом, K-Chief 600 виявляється потужним інструментом для управління та моніторингу судового обладнання. Проте, для його ефективного використання важливо розглядати витрати, проводити якісне навчання персоналу та удосконалювати аспекти безпеки.

Ключові слова: системи моніторингу суден, доступ до даних в режимі реального часу, планування технічного обслуговування, навчання персоналу, надійність електронних систем, автоматизація в судноплаванні, кібербезпека, безпека на морі, ефективність судна.

Description of the problem.

Introduction. Maritime shipping is a key sector of the global economy, playing an important role in transporting large volumes of goods and ensuring global connectivity. The growth of maritime transportation poses challenges to the safety, reliability and efficiency of shipping. One of the critical aspects in this context is ship monitoring systems, which play a crucial role in ensuring safety and optimizing fleet management.

Despite the advances in modern technology, existing ship monitoring systems still face a number of challenges, such as limited accuracy, lack of functionality, and the need for further improvement. This article is devoted to analyzing the current state of such systems and identifying ways to improve them to ensure a high level of safety and efficiency in modern maritime transportation.

This study will conduct an objective analysis of existing ship monitoring systems, identify their advantages and disadvantages, and propose innovative solutions for further improvement. The main focus of the work is on the development and implementation of new technologies aimed at ensuring safety and optimizing shipping management in the demanding conditions of the modern global market.

Problem statement. Navigation and monitoring of ships in modern environmental conditions is becoming increasingly difficult due to the growth of maritime traffic and high competition in shipping. Ensuring safe navigation, efficient fleet management and timely response to hazards require the improvement of ship monitoring systems. It is necessary to study the current state of ship monitoring systems and identify their shortcomings that may affect the safety and efficiency of maritime transportation.

Analysis of recent research and publications. In today's world, where a large part of important processes and operations are carried out thanks to complex technological systems, control and monitoring become a priority for safety and efficiency [1]. This is especially true for shipping, where safety, reliability and compliance are important aspects. A modern solution for this is the implementation of monitoring systems, such as, for example, Ship@Web [2].

Systems like Ship@Web are designed to provide continuous monitoring, control and management of the main technical parameters of ships and increase their level of safety and productivity. By providing remote access to data and control over critical systems, they open up new opportunities for operators and vessel owners in the form of diagnostics, data analysis and management decision-making [3, 4].

Systems like Ship@Web have several important advantages and relevant applications [2]:

1. Remote monitoring and control: One of the main advantages of such systems is the ability to remotely monitor and control important processes, such as automated systems on ships. This makes it

possible to remotely monitor and intervene in the operation of equipment even remotely, which is critical for ensuring safety and efficient management.

2. Reliability and security: Systems like Ship@Web are typically designed with high standards of reliability and cyber security in mind. This allows you to protect critical systems from unauthorized access and failures, ensuring the security of operations.

3. Convenience and accessibility: Access to the system through a web browser makes it possible to work with it from any place where there is an Internet connection. This allows operators to communicate with ships or other objects from anywhere in the world, which is very convenient.

4. Data monitoring and analytics: Systems like Ship@Web are capable of collecting and analyzing large amounts of data. This allows operators to identify trends, make predictions and make management decisions based on the collected data.

5. Decision Support: An important feature of systems like Ship@Web is the ability to provide decision support. Operators can receive data that helps in solving complex tasks and choosing optimal solutions.

6. Integration with other systems: These systems can be integrated with other subsystems such as maintenance systems, scheduled maintenance systems, etc.

In general, systems like Ship@Web are important for ensuring the reliability, security and efficiency of managing critical technical systems. They are relevant in shipbuilding, aviation, industrial complexes and other industries where high-performance and safe management of equipment and processes is necessary.

System concept. Kongsberg system Ship@Web is designed for continuous access to the vessel's main data both on board and ashore. The Ship@Web system can display data from the marine automated system K-Chief 600 [5]. The Ship@Web system provides secure access to the isolated K-Chief 600 system based on modern solutions. Based on web technologies with a secure communication framework, Ship@Web can also be used to view and use historical data through applications such as Trend, Report and Export.

Key features. The integration between the process network and the administrative network provides:

- Access to automation data
- Organization and storage of data
- Presentation and decision support
- Automatic and manual vessel reporting
- Display in a web browser
- Display of subsystems such as engine monitoring, power management, fire system, storage systems, etc.
- Representation of lists such as crash views and process views.
- Representation of counters, event logs, emissions of gas emissions.
- Navigation structure identical to the K-Chief 600 system.

The aim of this study is to analyze the current state of ship monitoring systems in order to identify their weaknesses and suggest ways to improve them. The study is aimed at developing and implementing new technologies that will improve the accuracy, reliability and functionality of monitoring systems to increase safety and optimize shipping management. The analysis of various aspects of current systems will identify potential obstacles and define strategies for further improvement to ensure the sustainable and safe operation of ships.

Presentation of the main material.

System architecture. The architecture of the Ship@Web system (Fig. 1) is basically a proprietary K-Chief 600 automation system with an installed server/ firewall solution.

The main role of the server is to be a connection point to external networks that need information from the K-Chief 600 system.

The server acts as a web server that hosts applications that can be used from anywhere using a regular web browser.

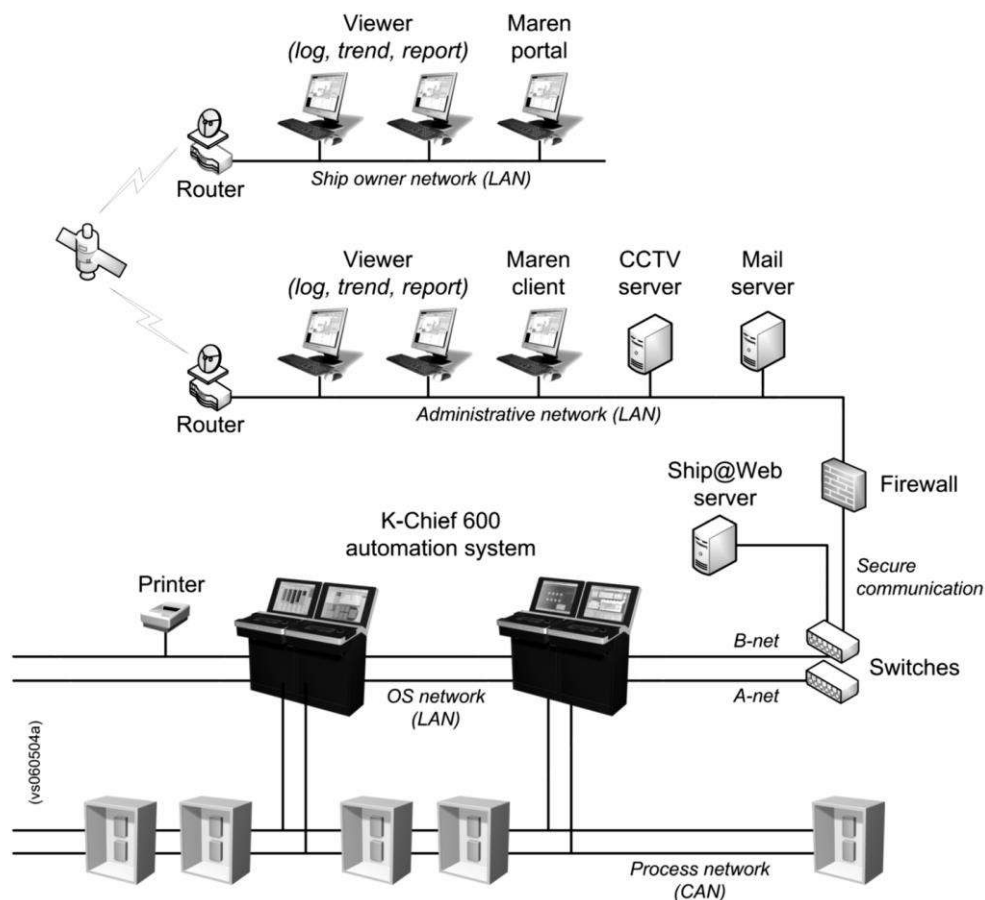


Fig. 1 – System architecture

Server Ship@Web is located in a separate VLAN from the K-Chief 600 processes LAN, and all computers connecting to the K-Chief 600 must be authorized by the firewall. This provides a high level of security for the K-Chief 600 system, protecting LAN processes from unauthorized access and other threats from the administrative network. The server contains no visual or interface units and can be maintained remotely. Its operation and maintenance are not required by the crew on board.

The K-Chief 600 offers cost-effective solutions that can be tailored to specific needs. The modular design provides flexibility in customizing the system for specific requirements, covering the entire spectrum from simple alarm systems to highly integrated control and monitoring systems.

Component systems may include:

- Alarm and monitoring system
- Auxiliary control system
- Energy management system
- Drive control system
- Ballast automation system
- Cargo management and monitoring system
- Heating, ventilation and air conditioning system
- Fire extinguishing system

The K-Chief 600 is based on Kongsberg system technology, where each vessel configuration is created using standard modules communicating via dual redundant process buses and networks [6]. The system can be configured for all types of vessels, including oil tankers, bulk carriers, container ships, Ro-Ro vessels, reefers and other special purpose vessels.

The main purpose of the system is to provide the ship's officers with all the basic alarms and status information they need to ensure the safe and efficient operation of the machinery, the cargo handling system with auxiliaries and other equipment.

The K-Chief 600 is designed to meet classification society requirements for unmanned engine room operational control.

The main units of the K-Chief 600 system are operator stations, a duty call system, distributed processing units and dual redundant process buses and a network.

1. Operator stations. Operator stations are used to receive alarm signals and have the ability to monitor and control the system. They can display interactive process diagrams, provide the ability to control the on-call system and print various logs. They also provide access to distributed processing units for checking variables, controlling hardware, setting parameters, and more. Changes to restrictions or parameters in one operator station are automatically updated in all other stations. All operator actions, such as starting or stopping pumps or changing alarm limits, are logged and time-stamped. When a variable or state changes significantly, the distributed processing unit updates the database at each operator station.

All information displayed at any operator station is always up-to-date, and the amount of data transferred over process buses and the local network is kept to a minimum, guaranteeing extremely fast access to data. Any alarm or event is time-stamped to the nearest 10ms.

Specially designed process mnemonics contain easily readable information about the engine of the equipment and the surrounding equipment. Control of various process plants and machines is performed directly from any operator station. Full monitoring and alarming capabilities are provided in both the engine room and control cabins.

2. Panels. The K-Chief 600 operator interface consists of a standard monitor and two separate specialized operator panels, one standard and one optional. The standard panel has a trackball, a digital key, buttons for processing alarms and transmitting commands. The optional touchscreen-based panel is an optional panel. It contains softkeys for quick selection of available functional displays, process mnemonics and alarm lists on the monitor. A virtual keyboard is also available on the touch screen.

3. The interface between man and machine. K-Chief 600 monitor images are user friendly. Because they are similar to other Kongsberg systems, the operator will be familiar with the placement and basic functions. Specially designed images contain easy-to-read information about the system. The top panel is located at the top of the image and contains various function buttons such as split screen and home page. The system status (e.g. sea mode) is also shown. The top panel has two alarm lines that show the last two alarms and the number of unacknowledged alarms.

Interactive heading navigation is located directly below the top bar. The operator uses this tool to understand his place in the file structure. Each heading has a drop-down menu for additional information. This method of navigation helps the operator in quick access to all views and at all levels, and also helps the operator to remember the structure of the system.

The split-screen feature, available as a softkey on the top panel, allows the operator to view up to four images simultaneously. One of the four windows is always active, which is easily recognized by the larger frame. The various views can be resized at the operator's discretion, and a zoom function can be used for individual views. This split-screen feature helps the operator quickly and efficiently switch between different images and provides flexible and convenient viewing.

Alarm groups are clearly displayed on the left of the image. This is a compact and expandable column that contains all the necessary information for the operator. To make the process efficient and easy to use, so that the operator can quickly find where the alarm is located on the mnemonic, the K-Chief 600 system has a «go to mnemonic» function. By simply clicking on the softkey next to the alarm status, a mnemonic image opens, with an interactive red zoom circle showing where the alarm is located.

Chief 600 system also includes a context-sensitive help function. Access to help is provided by clicking on questions in dialog boxes. Context-sensitive help provides easy and accurate information on issues of interest to the operator.

Integrating third-party hardware is a new and exciting opportunity. The operator can control various devices using the operator station. Also, third-party software can be opened through K-Chief 600.

The «Favorites» feature is located at the bottom of the image. The operator can use «Favorites» to specify which image they want to have instantly available. After saving Favorites, the operator can also use the numeric keypad on the control panel to open them.

Intermediate operator stations are used to provide local access to distributed computing installations.

4. Two-channel redundant industrial network (process-bus). The two-channel redundant process bus uses CAN (Control Area Network) technology to provide communication between Distributed Computing Units. Each unit is connected to two completely separate buses for maximum reliability.

5. The two-channel redundant operator station network uses standard LAN (local area network) or Ethernet network technology for communication between operator stations and other PC-based devices. Each Operator Station is connected to two completely separate networks for maximum reliability.

6. Distributed computing units (DPUs) are used to monitor analog or digital sensors and provide analog/digital output to other devices. Several varieties of Distributed Computing Installations are available to solve specific management and monitoring tasks.

Intelligent DPUs form the basis of the system. These units interact with each other through a high-capacity redundant process bus. All monitoring and automation functions are performed by the DPU, while centralized operator stations (OS) provide the human-machine interface. To configure tasks for a specific Distributed Computing Facility, parameters are loaded into the block. This allows it to perform signaling functions, control functions, security functions, or any combination of these functions, which simplifies the separation of system functions. Communication between Distributed Computing Installations takes place through the CAN Control Area network, known for its high reliability. In case of block failure, the power supply, communication bus or sensors are not affected. Built-in system test (BIST) detects failures of DPU, process bus, cables and connected sensors. The operator will receive a warning about any detected malfunction. Cargo control and monitoring system, ballast and control system can be integrated through two-channel redundant LAN network. The FleetMaster information management system can also be integrated into the K-Chief system via an administrative network, allowing for the creation of user-defined trend displays and customized reports. Equipment from manufacturers such as valve control systems, fire alarm systems and level gauges can be integrated through serial lines connected directly to Operator Stations or through a process network.

Submission of information. Graphic presentation of processes is carried out using individual screen forms that provide the operator with easy-to-read information about each subsystem and adjacent equipment. The process view shows the relationship between the blocks and devices used to control the respective process. A standard set of static and dynamic symbols is used to display the process. Further monitoring of process settings and parameters is possible directly from any Ship@Web client using the navigation line in the top bar. However, control of blocks and parameters is possible only from the K-Chief 600 system.

The availability of process views depends on the specific delivery of the system. Typical processes are cargo management, ballast management and power management.

If an alarm condition occurs, this will be indicated by the corresponding dynamic symbol on the process view.

Alarm notifications are visualized as graphic and text objects. The color mark indicates the importance of the alarm; red for normal alarms and magenta for high priority alarms.

Viewer. Viewer (Fig. 2) application displays online data generated by the K-Chief 600 marine automation system. Process information can be made available anywhere on board the ship via the ship's administrative network or in an office ashore using a conventional personal computer.

The data is presented using a user interface similar to that used by the Kongsberg K-Chief 600 marine system.

Viewer application interfaced with the ship's K-Chief 600 on-board process network (LAN), giving approved users remote access to critical information. For example, the Chief Engineer can check the parameters of the main engine or other critical indicators at any time of the day from his office.

The main functions of the Viewer include:

– Display of logged vessel data using a user interface similar to that used in the K-Chief 600 systems.

– Display of process mnemonics from the K-Chief 600 system.

– Display of the complete history of alarms registered on board the vessel.

– Displaying alarms, tag values and history through lists such as «Active alarms», «Alarm history», «General information about tags», «Event history», «Forbidden tags», «Overriding tags», «Counters», «List tanks» etc.

– Providing owners/operators with an overview of basic vessel information, allowing for better shoreside support.

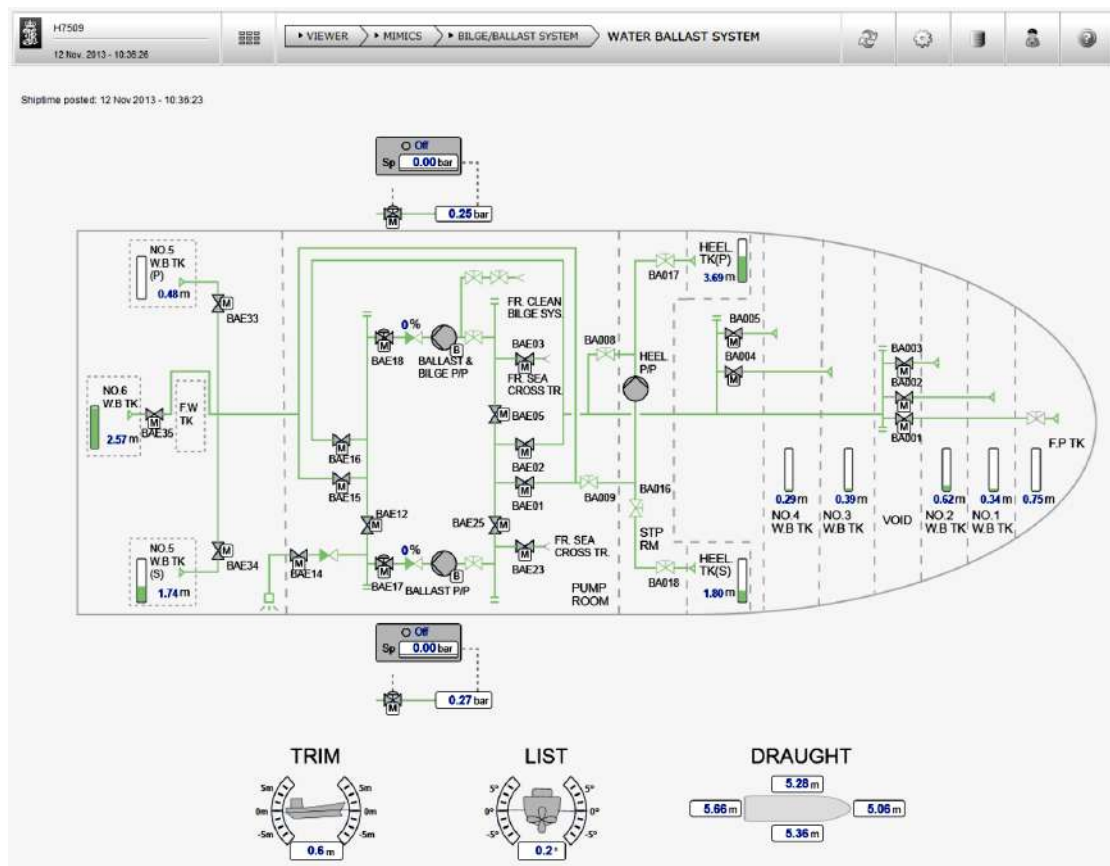


Fig. 2 – An example of a graphical representation of the process

The Viewer application can also be used to create an interface for an onshore office. This allows the user on land to observe in near real time the same information that is available to those on duty in the engine room of the vessel in question.

Viewer user interface is carefully designed to support the operator in his daily work. In addition, the screen layout is similar to other Kongsberg systems, such as the K-Chief 600 automated system, so the operator is instantly oriented to all important system functions.

Construction of trends. Trend application records and displays vessel process data generated by the K-Chief 600 automated system. It can be used to create custom tabular views.

Trend application provides an effective tool for displaying and analyzing data in the K-Chief 600 automation system. It provides the user with an effective tool for visualizing logged data without using an operator station. Up to 365 days of data can be displayed simultaneously.

Trend application can be used to analyze information such as fuel consumption, compressor running time, power generation and other key parameters in the automation system.

« Trend » can be used in different ways. Typical uses of the app include:

- Recording specific tags to monitor changes in a selected value over time.
- Help in setting up regulators.
- Monitoring the condition of vessel components such as the main engine, compressors, pumps and auxiliary engines [7].
- Providing data to establish the sequence of events that led to a particular incident.
- Ensuring recordkeeping of high-frequency trends and analysis of parameters for the long term.
- A permanent record or basis for analyzing events such as equipment start/stop or emergency shutdown.

Report generation. Report application provides reports based on online information generated by the K-Chief 600 automated system. Report data can be printed or saved as electronic documents in PDF and XML formats. The application contains a predefined set of report templates. With the Report Builder, the user can also create reports with their own defined information.

Depending on the user's access rights, the « Report » application includes two modules – « Report Designer » and « Report Generator ».

« Report Designer » allows ship crew and ship owner to create individual report templates. « Report Generator » allows you to generate reports during a certain time interval based on templates created by « Report Designer ».

The « Report » application can be used in various ways. Typical uses of the app include:

– Automatic generation of reports from the automation system, including all connected equipment.

– Documentation of testing of critical processing systems.

– Generating standard reports such as daily report, flight report, fuel consumption reports [8].

– User-defined reports for components such as main engine, auxiliary engine and turbochargers.

– Reports can be automatically exported via email or FTP.

Export module. Export application transmits online information from the K-Chief 600 automated system to recipients of third-party firms in the administrative network. Typical recipients of data are systems for scheduled maintenance and load calculations.

The upper level of the automatic control and monitoring system. Module allows the user to quickly get an overview of the current and past performance status of vessels in a fleet or group of vessels.

The system is designed for constant data import from on-board automation systems. Data is transferred from on-board automation systems using the export function to Ship@Web. This data export is configured onboard the ship.

To export the data of mandatory, recommended and optional categories, it is necessary to use several mandatory labels. Required labels are used in calculations, while recommended labels can be used for filtering and display. Optional labels are used only as references, for example in trend analysis. The intervals between exports can be configured, usually from one hour to 24 hours. A longer interval means better compression and therefore lower communication costs. Also, the sampling rate of the labels is adjustable, usually one sample every 5 minutes.

The system provides several key performance indicators (KPIs). The primary KPI is a calculated value that represents fuel consumption per nautical mile (kg/mile), known as CPM (consumption per mile). This can be calculated either through water (STW) or by speed over ground (SOG). The first method only takes into account the performance of the vessel through the water, while the latter method also takes into account the route of the vessel, i.e. it will avoid the current against the vessel's course.

CPM is represented as the actual value and the deviation from the target performance.

Colors are used to emphasize these values. In the performance graph, fuel deviations are plotted around the target value as a filled area; areas above target indicate overspending, while areas below target indicate fuel economy.

The system has several modes, in particular:

- Analysis of fuel consumption.
- Analysis ship loading
- Speed analysis.
- Average cost analysis.

Analysis of fuel consumption. This mode shows the fuel performance of several selected vessels. It is divided into two sections that can be used simultaneously: Ship View and View Comparison.

The VESSEL mode can be used for detailed analysis of fuel performance and related information, while the COMPARE view allows side-by-side comparisons.

You can quickly switch between these two modes by clicking on the signature.

Fuel View, Compare. This view is basically the same as the Vessel view, except that you can compare the two views side-by-side or stacked.

You can select the same vessel and then select a different time period or two similar vessels to compare. As with the vessel view, you can add additional tags to display.

Analysis loading the vessel (TRIM VIEW) shows performance data at various drafts. This view is divided into two other sections: single vessel analysis and comparison [9].

SHIP mode is primarily used to analyze the optimum pitch angle and related information, while COMPARE mode allows side- to-side comparisons. Switch between these two modes by clicking on the signature.

Speed analysis. This mode shows the optimal speed for the selected vessel. The optimal rate is calculated based on historical data for the current sediment and the so-called economic rate calculated on the basis of the target productivity. It is possible to activate several ships at the same time and switch between them by simply clicking on the name of the ship. The first time this mode is opened, a list of courts is displayed. Choose the ship you are interested in.

HULL VIEW average consumption mode is used to display average fuel consumption data for a vessel over a long period. Data can be filtered based on speed, wind, precipitation, etc.

Just like in the form of fuel, it is possible to activate several ships at the same time and switch between them by clicking on the name of the ship.

The points on the graph represent actual measured data. A linear trend line shows the overall performance trend. The dotted line represents the forecast.

The red line represents the CPM limit for performance.

Conclusions

Based on the review of the K-Chief 600 system, several important conclusions can be drawn:

1. Advantages:

– Time savings and efficiency: The K-Chief 600 system provides vessel operators with real-time access to critical data and controls. This helps in saving time and ensures efficient operation of the vessel.

– User-friendly interface: The user interface of the system is designed in such a way that operators can quickly get used to it and can easily monitor and control various aspects of the ship's equipment.

– Reporting and Analysis Capabilities: The system provides reporting and data analysis capabilities useful for logging, equipment performance analysis, and maintenance planning.

– Flexibility and expandability: The modular design of the system makes it flexible and expandable, allowing it to be adapted to the specific needs of the vessel.

2. Disadvantages:

– High costs and installation: One of the main disadvantages may be the high cost of the K-Chief 600 system, which may be limited to some operators.

– Need for personnel training: Effective use of the system requires training of operators and vessel personnel, which can be a time-consuming and expensive process.

– Dependence on electronic systems: As with any electronic system, there is a risk of failure or failure, which may require certain spare parts and technical support.

Ways to improve:

– Increased availability: Developers can consider ways to reduce the cost of the system and make it more accessible to a wide range of operators.

– Increased automation: Expanding functionality for greater automation of control and monitoring processes can help improve shipping efficiency and safety.

– Reliability and cyber security: Constantly updating the system to increase its reliability and protection against cyber threats is a critical aspect of further improvement.

Overall, the K-Chief 600 system is a powerful tool for shipboard control and monitoring, but costs, personnel training, and safety considerations must be considered for its effective use.

References:

1. Maritime Safety Committee (MSC). 100th session, 2018. International Maritime Organisation [Online]. Available: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MSC/Pages/MSC-100th-session.aspx>. Accessed on: May 19, 2023.
2. Kongsberg K-Chief 600 Ship@Web Operator Manual [Online]. Available: <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/k-chief-600-shipweb/>. Accessed on: June 15, 2023.

3. S. Lim, K. Pazouki, A. Coraddu, A.J. Murphy, S. Younessi, and M. Judd, «Standardisation of data monitoring on-board vessels», in 12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Croatia, 2017.
4. S. Lim, K. Pazouki, and A.J. Murphy, «Monitoring Systems in Design of Ships», *Practical Design of Ships and Other Floating Structures PRADS 2019*, Singapore, vol. 65, pp. 338-348, 2019. doi: **10.1007/978-981-15-4680-8_24**.
5. Kongsberg K-Fleet Maintenance [Online]. Available: <https://k-fleet.kongsbergdigital.com/wp-content/uploads/2023/11/KFD100005-1-K-Fleet-Maintenance-datasheet.pdf>. Accessed on: June 20, 2023.
6. K-Chief 600 Touch control panel - Kongsberg Maritime [Online]. Available: <https://www.yumpu.com/en/document/view/23885231/k-chief-600-touch-control-panel-kongsberg-maritime>. Accessed on: June 20, 2023.
7. H.-J. Kwon, H.-S. Yang, M.-K. Kim, and S.-G. Lee, «Long-term Monitoring System for Ship's Engine Performance Analysis Based on the Web», *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, vol. 39(4), pp. 483-488, 2015. doi: **10.5916/jkosme.2015.39.4.483**.
8. F. Li, «Research on Ship Energy Consumption Monitoring System Based on Computer Intelligent Technology», *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1648, pp. 1-7, 2020. doi: **10.1088/1742-6596/1648/2/022054**.
9. M. Dęsoł, «Diagnostic Signals on Board Vessels with Dynamic Positioning System», *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, vol. 106, pp. 71-80, 2018. doi: **10.26408/106.07**.

Перелік використаних джерел:

1. Maritime Safety Committee (MSC). 100th session, 2018. International Maritime Organisation. URL: <http://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/MSC/Pages/MSC-100th-session.aspx> (дата звернення: 19.05.2023).
2. Kongsberg K-Chief 600 Ship@Web Operator Manual. URL: <https://www.kongsberg.com/globalassets/maritime/km-products/product-documents/k-chief-600-shipweb/> (дата звернення: 15.06.2023).
3. Standardisation of data monitoring on-board vessels / S. Lim, K. Pazouki, A. Coraddu, A.J. Murphy, S. Younessi, M. Judd. *12th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, Dubrovnik, Croatia, 4-8 October 2017.
4. Lim S., Pazouki K., Murphy A.J. Monitoring systems in design of ships. *Practical Design of Ships and Other Floating Structures PRADS 2019*. 2019. Vol. 65. Pp. 338-348. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-4680-8_24.
5. Kongsberg K-Fleet Maintenance. URL: <https://k-fleet.kongsbergdigital.com/wp-content/uploads/2023/11/KFD100005-1-K-Fleet-Maintenance-datasheet.pdf> (дата звернення: 20.06.2023).
6. K-Chief 600 Touch control panel - Kongsberg Maritime. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/23885231/k-chief-600-touch-control-panel-kongsberg-maritime> (дата звернення: 20.06.2023).
7. Long-term monitoring system for ship's engine performance analysis based on the web / Kwon H.-J., Yang H.-S., Kim M.-K., Lee S.-G. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*. 2015. Vol. 39(4). Pp. 483-488. DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.4.483>.
8. Li F. Research on ship energy consumption monitoring system based on computer intelligent technology. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1648. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1648/2/022054>.
9. Dęsoł M. Diagnostic signals on board vessels with dynamic positioning system. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*. 2018. Vol. 106. Pp. 71-80. DOI: <https://doi.org/10.26408/106.07>.

Reviewer: I.V. Gritsuk
Dsc (Engineering), prof., KSMA

*The article was received on 10.09.2023
The article was admitted on 13.10.2023*

**ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ
СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ВАНТАЖНИХ СУДЕН
ЗА РАХУНОК ЦИФРОВИХ СТРАТЕГІЙ**

Сучасні торгові судна відіграють ключову роль у транспортній системі, забезпечуючи перевезення великих обсягів вантажів по всьому світу. Це покладає великі вимоги до ефективності та надійності суднового обладнання. Системи технічного обслуговування вантажних суден відіграють важливу роль у забезпеченні нормального функціонування суден та забезпеченні їхньої безпеки. Однак, існують певні проблеми, пов'язані із сучасним станом систем технічного обслуговування суден. Зокрема, питання надійності та ефективності технічного обслуговування є критичними для оптимізації витрат та підвищення ефективності морського транспорту. Оптимальні параметри системи технічного обслуговування можуть вирішити ці проблеми та покращити функціонування вантажних суден. Метою статті є розгляд та обґрунтування оптимальних параметрів системи технічного обслуговування суден, що базуються на застосуванні цифрових стратегій. Постановка проблеми включає в себе необхідність підвищення надійності суднового обладнання, зменшення витрат та покращення експлуатаційної продуктивності. Аналіз попередніх досліджень та публікацій використано для визначення потенційних проблем і демонстрації, як використання цифрових стратегій може вирішити ці проблеми. Стаття включає докладний огляд літератури, а також розглядає сучасні методи оптимізації параметрів технічного обслуговування, враховуючи стохастичні аспекти та методи надійності. Висновки статті вказують на важливість реорганізації та оптимізації систем технічного обслуговування суден і підкреслюють роль цифрових стратегій у досягненні цієї мети. Проведене дослідження допомагає вирішити ключові проблеми в сфері технічного обслуговування вантажних суден та покращити ефективність та надійність суднового обладнання. Результати дослідження мають практичне застосування для судноплавних компаній та організацій, що працюють у галузі морського транспорту.

Ключові слова: технічне обслуговування, вантажні судна, цифрові стратегії, оптимізація параметрів, надійність та ефективність, суднові системи, морський транспорт.

A.I. Golovan. Formation of optimal parameters of the cargo ship maintenance system through digital strategies. Contemporary merchant ships play a key role in the international transportation system, ensuring the transportation of large volumes of cargo around the world. This places great demands on the efficiency and reliability of shipboard equipment. Cargo ship maintenance systems play an important role in ensuring the proper functioning of ships and their safety. However, there are certain problems associated with the current state of ship maintenance systems. In particular, the issues of reliability and efficiency of maintenance are critical for optimizing costs and increasing the efficiency of maritime transport. Optimal parameters of the maintenance system can solve these problems and improve the operation of cargo ships. The purpose of the article is to consider and justify the optimal parameters of the ship maintenance system based on the application of digital strategies. The problem statement includes the need to increase the reliability of ship equipment, reduce costs and improve operational performance. An analysis of previous research and publications is used to identify potential challenges and demonstrate how the use of digital strategies can address these issues. The article includes a detailed

* канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0001-6589-4381, g.onmu@ukr.net

literature review and discusses state-of-the-art methods for optimizing maintenance parameters, including stochastic aspects and reliability methods. The conclusions of the article point to the importance of reorganizing and optimizing ship maintenance systems and emphasize the role of digital strategies in achieving this goal. The study helps to solve key problems in the field of cargo ship maintenance and improve the efficiency and reliability of ship equipment. The results of the study have practical application for shipping companies and organizations operating in the field of maritime transport.

Key words: maintenance, cargo ships, digital strategies, parameter optimization, reliability and efficiency, ship systems, maritime transport.

Постановка проблеми. У сучасному світі судна відіграють ключову роль у транспортній системі, забезпечуючи перевезення великих обсягів вантажів по всьому світу. Це покладає великі вимоги до ефективності та надійності судового обладнання. Системи технічного обслуговування вантажних суден відіграють важливу роль у забезпеченні нормального функціонування суден та забезпеченні їхньої безпеки.

Однак, існують певні проблеми та виклики, пов'язані із сучасним станом систем технічного обслуговування суден. Зокрема, питання надійності та ефективності технічного обслуговування є критичними для оптимізації витрат та підвищення ефективності морського транспорту. Оптимальні параметри системи технічного обслуговування можуть вирішити ці проблеми та покращити функціонування вантажних суден.

За таких умов, актуальним постає вирішення проблеми підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажних суден і питань її оптимізації з використанням цифрових стратегій. Проблема полягає у тому, що технічне обслуговування вантажних суден вимагає значних витрат і управління різними параметрами, включаючи надійність, безпеку, регулярність та витрати.

По-перше, стан вантажного судна має відповідати вимогам щодо надійності та безпеки, а також забезпечувати регулярність рейсів.

По-друге, витрати на технічне обслуговування повинні бути оптимізовані, щоб знизити загальні витрати на утримання судна.

Отже, це дослідження передбачає розгляд параметрів системи технічного обслуговування та визначення оптимальних значень цих параметрів, які забезпечують максимальну ефективність і мінімізацію витрат в управлінні вантажним судном. Вирішення цієї проблеми передбачає розробку цифрових стратегій та методів для підвищення продуктивності та зниження витрат у процесі технічного обслуговування суден.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Розглянуті роботи дають уявлення про оптимізацію параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден. Автори статті [1] підкреслюють необхідність реорганізації служб технічного обслуговування і логістики для поліпшення економічних показників системи технічного обслуговування. Дослідження [2] фокусується на оптимізації інтервалів технічного обслуговування та порогів працездатності судових механічних систем за допомогою стохастичної моделі. Стаття [3] досліджує підходи до оптимізації параметрів технічного обслуговування з постійною періодичністю контролю, враховуючи такі критерії, як мінімізація питомої вартості операцій і максимізація коефіцієнта технічного використання. Автор статті [4] застосовує методи надійності для підвищення експлуатаційної продуктивності та зниження витрат в системі головного двигуна морського судна.

Також у проаналізованих роботах припускається, що сучасні цифрові інструменти та технології можуть оптимізувати параметри систем технічного обслуговування вантажних суден. Короткі періоди технічного обслуговування для обраної групи обладнання можуть підвищити середню надійність експлуатації судна в морі з мінімальними витратами [5]. Система технічного обслуговування інтегрує потік інформації за допомогою різних стратегій технічного обслуговування [6]. Гібридний багатокритеріальний метод прийняття рішень підходить для вибору технічного обслуговування для кожної одиниці обладнання судових технічних засобів, систем і комплексів [7].

Проаналізовані статті разом підкреслюють важливість реорганізації служб технічного обслуговування, оптимізації інтервалів і порогових значень технічного обслуговування, а також

використання методів підвищення надійності для вдосконалення системи технічного обслуговування вантажних суден.

Проведений аналіз існуючих досліджень показав, що існують деякі потенційні проблеми, які можуть бути вирішені шляхом впровадження цифрових стратегій у систему технічного обслуговування вантажних суден. Серед цих проблем важливо виділити:

1. Недостатній рівень надійності. Вища надійність обладнання і механізмів суден може сприяти зменшенню аварійності та забезпеченню безпеки на морських шляхах.

2. Зростання витрат. Вдосконалення системи технічного обслуговування може допомогти вирішити проблему зростання витрат на обслуговування суден, що може виникнути через непланові ремонти та високі витрати на запасні частини.

3. Покращення продуктивності. Впровадження оптимізованих параметрів системи технічного обслуговування (ТО) сприятиме зменшенню часу зупинок для ремонту та підвищенню тривалості експлуатаційного періоду судна, що в свою чергу позитивно вплине на продуктивність.

4. Зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Ефективне технічне обслуговування може сприяти зменшенню викидів токсичних речовин і покращенню екологічної стійкості суден.

5. Підвищення конкурентоспроможності. Враховуючи, що судноплавні компанії працюють в конкурентному середовищі, оптимізація системи технічного обслуговування може надати перевагу у конкурентній боротьбі.

Таким чином, стаття пропонує підходи до оптимізації параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден з використанням цифрових стратегій, які можуть вирішити вищезазначені проблеми та сприяти покращенню ефективності та надійності суден у морському транспорті.

Мета статті полягає в розробці і дослідженні підходів та стратегій для оптимізації параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден з використанням цифрових технологій з метою підвищення ефективності та зниження витрат у цьому процесі.

Виклад основного матеріалу.

Питання підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден має високу актуальність, як на етапі їх проектування, так і під час їхнього експлуатаційного періоду. Ця актуальність відображена у ряді наукових досліджень [5, 8-14]. На рис. 1 наведена концептуальна схема системної взаємодії, яка стоїть в основі підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден шляхом впровадження цифрових стратегій. Останні визначають підхід до комплексного вирішення завдань управління процесом підвищення ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден.

Обирання конкретної цифрової стратегії управління системою технічного обслуговування вантажних суден передбачає прийняття рішення щодо вибору та впровадження певних комбінацій цифрових технологій. Цей процес включає коригування плану технічного обслуговування згідно з обраною цифровою стратегією. В даному контексті використовується сучасна інтегрована система «ShipDiMRO» для формування управлінських рішень.

Розгляд варіантів застосування різних цифрових стратегій технічного обслуговування вантажних суден відбувається з урахуванням етапу життєвого циклу судна. Вибір конкретної стратегії базується на підходах до досягнення оптимальних параметрів системи технічного обслуговування, які відображаються у управлінських процесах, здійснюваних в рамках системи технічного обслуговування вантажних суден. Варіативність рішень стосовно оптимізації параметрів системи технічного обслуговування обумовлюється відсутністю єдиної універсальної відповіді. Вибір найбільш підходящого підходу до оптимізації вимагає аналізу з різних точок зору та з використанням різних методологій, що дає можливість обрати оптимальний спосіб дії у конкретних обставинах.

З аналізу представленої системи (зображеної на рис. 1) стає очевидним, що в рамках управління забезпеченням оптимальних параметрів системи технічного обслуговування вантажних суден, використовуючи цифрові стратегії, можна виділити дві важливі взаємодіючі складові цього процесу – інформаційну та управлінську (виконавчу). Інформаційна складова охоплює в собі дистанційне забезпечення процесів ідентифікації, моніторингу, діагностування та прогнозування як показників ефективності системи ТО, так і параметрів технічного стану судових технічних засобів, конструкцій і вантажних суден в умовах інтелектуальної транспортної системи

(ITS). З іншого боку, управлінська (виконавча) складова включає у себе створення та реалізацію цифрових процесів, які сприяють забезпеченню оптимальних параметрів системи ТО вантажних суден в умовах експлуатації.

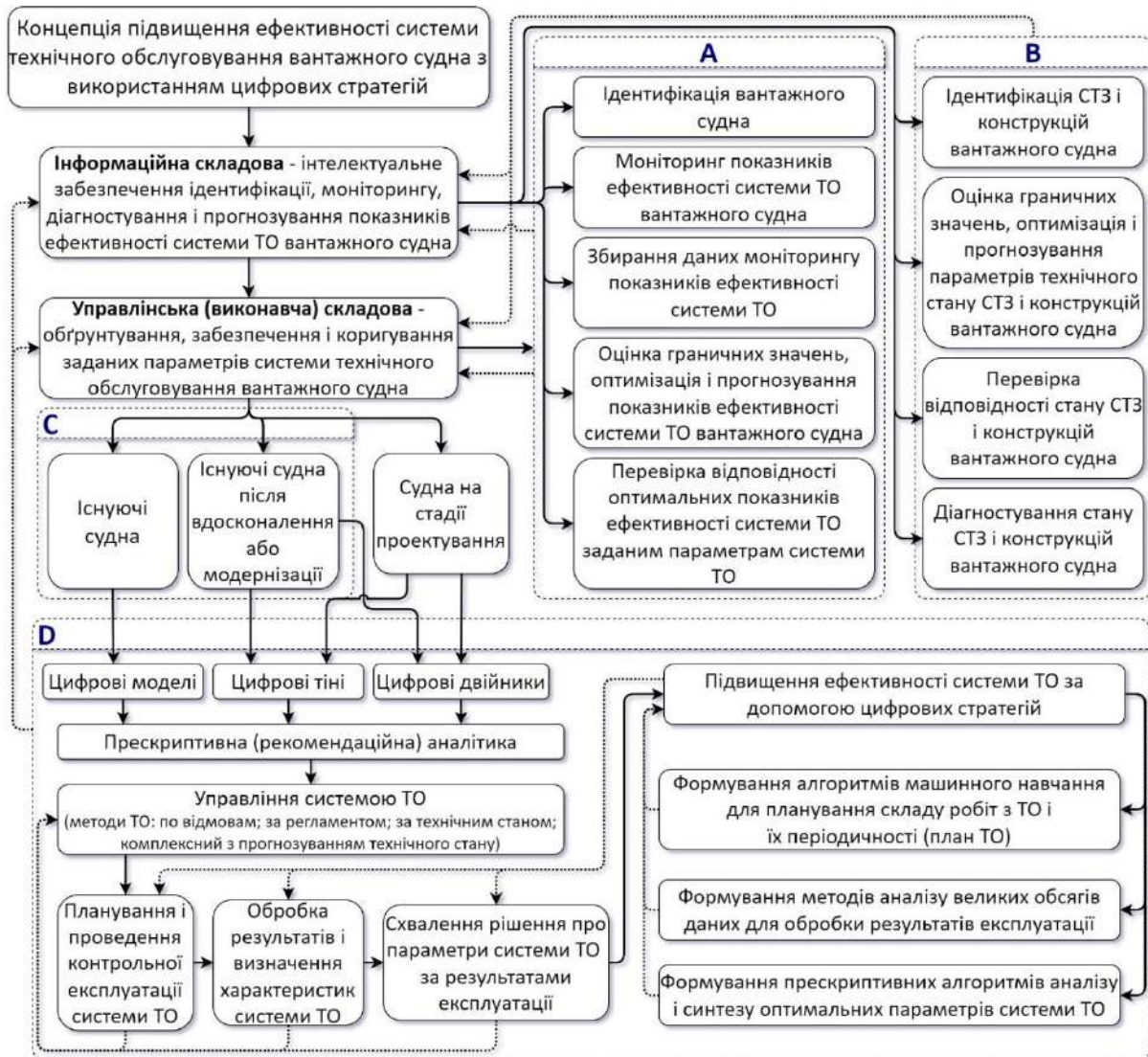


Рис. 1 – Схема системної взаємодії при підвищенні ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій

Характеристики інформаційної взаємодії, що виявляються в рамках процесів забезпечення заданих показників ефективності системи ТО вантажного судна подано на рис. 1 (сегменти А та В). Процеси управлінського (виконавчого) забезпечення заданих параметрів системи ТО вантажного судна (сегменти С та D) базуються на інформації, яка є відображенням фактичного технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і показників ефективності системи ТО вантажного судна в процесах здійснення їх ідентифікації, моніторингу, діагностування та прогнозування параметрів стану (сегменти А та В). Процеси ідентифікації параметрів технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і показників ефективності системи ТО вантажного судна передбачають використання автоматизованої системи контролю і прогнозування технічного стану суднових технічних засобів і конструкцій (ACMS) у поєднанні з системою «ShipDiMRO», яка функціонує в рамках ITS. Зазначені процеси відзначаються збором даних під час моніторингу, здійсненням оцінки граничних значень, а також оптимізацією параметрів технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій і показників ефективності системи ТО вантажного судна впродовж тривалого часу. В кінцевій стадії сегмента А відбувається перевірка відповідності

забезпечення заданих показників ефективності системи ТО вантажного судна заданим параметрами системи ТО цього судна.

Інформаційна складова процесу забезпечення заданих показників ефективності технічного обслуговування вантажного судна, що виконується в сегменті **В**, на додачу до описаних вище можливостей, включає в себе широкий спектр функцій. Серед цих функцій можна виокремити оцінку граничних значень параметрів, оптимізацію та прогнозування параметрів технічного стану суднових технічних засобів, конструкцій та вантажного судна в цілому. Додатково, інформаційна складова реалізує перевірку відповідності визначених параметрів поточного технічного стану заданим параметрам системи ТО і вимогам виробника або власника судна. Однак, крім зазначеного, також відзначається важлива здатність до діагностування стану, використовуючи отримані параметри.

Відповідно до накопиченої інформації у сегменті **А** починає здійснюватися управління параметрами системи технічного обслуговування як існуючих вантажних суден (сегмент **С**), так і тих, які перебувають на стадії проектування. У сегменті **Д** розпочинається формування цифрової стратегії, спрямованої на підвищення ефективності системи ТО, в залежності від того, які цифрові технології доступні для застосування на конкретному етапі життєвого циклу судна. Серед наявних цифрових технологій слід виділити такі: цифрові моделі, цифрові тіні, цифрові двійники, прескриптивна (рекомендаційна) аналітика. Шляхом комбінування цих технологій починає формуватися відповідна цифрова стратегія підвищення ефективності системи ТО, яка згодом впроваджується у конкретний процес управління даною системою [9, 10, 14].

Під управлінням системою ТО вантажного судна розуміється цілеспрямована діяльність, що включає аналіз, обґрунтування, забезпечення і коригування параметрів системи ТО, необхідних для виконання вимог до показників надійності суднових технічних засобів, конструкцій і вантажного судна в цілому. Управління системою ТО здійснюється в незалежності від того, чи застосовано комплексний метод ТО з прогнозуванням технічного стану, чи методи ТО по відмовам, за регламентом або за технічним станом.

Процес управління системою ТО включає в себе тріаду характерних послідовних етапів, які відображаються наступним чином: планування і проведення контрольної експлуатації системи ТО; обробка результатів і визначення характеристик системи ТО; схвалення рішення про параметри системи ТО за результатами проведеної експлуатації. На початковому етапі, а саме плануванні і проведенні експлуатації системи ТО, здійснюється прийом вхідних параметрів, які визначають базову або модифіковану систему ТО вантажного судна. Завершивши період контрольної експлуатації, починається наступний етап, в рамках якого виконується обробка отриманих результатів і оцінка сукупності характеристик системи ТО. За результатами цієї оцінки формується сукупність вихідних параметрів системи ТО вантажного судна. Ефективність оцінки параметрів визначається рівнем виконання або якістю програмного забезпечення, застосованими сучасними математичними методами, а також розробленими на цій основі алгоритмами та програмами. На третьому етапі здійснюється обґрунтування відповідності досягнутих параметрів системи ТО вантажного судна вимогам. У випадку відхилень між параметрами системи ТО, виявленими під час контрольної експлуатації, та необхідними параметрами, приймається рішення щодо корекції параметрів. Ця корекція може враховувати організаційні заходи у судноплавній компанії, або може здійснюватися шляхом конструктивних або виробничих змін в технічних засобах судна за допомогою виробника технічних засобів. Наявність зворотного зв'язку, на кожному з трьох етапів процесу управління системою ТО, дозволяє в процесі контрольної експлуатації управляти параметрами системи ТО вантажного судна, доводячи їх до необхідних значень або корегуючи для забезпечення необхідних значень показників надійності суднових технічних засобів. У випадку виконання вимог до параметрів системи ТО вантажного судна, ця система приймається як базова для відповідного екземпляра вантажного судна. Ця ініціатива у свою чергу лягає в основу завершального етапу формування цифрової стратегії, що спрямована безпосередньо на підвищення ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна.

Під час синтезу системи ТО за результатами експлуатації важливо виконати оцінку параметрів системи ТО та перевірити їх відповідність вимогам і забезпеченню заданих показників надійності суднових технічних засобів і вантажного судна. У випадку, коли задані вимоги не виконуються, необхідно прийняти рішення щодо конструктивного вдосконалення вантажного судна або покращення організаційних аспектів та технологій проведення різних видів ТО, або

внесення коригувань до параметрів системи ТО з подальшим аналізом оптимальності цих параметрів.

Ціль системи ТО вантажного судна, відповідно до поставлених завдань, полягає у забезпеченні найбільшого можливого періоду перебування судна в стані технічної придатності до використання, з дотриманням строгих вимог до безпеки та регулярності рейсів, та це має відбуватися з мінімальними витратами на ТО. У такому контексті оптимальність параметрів системи ТО може бути оцінена рішенням одного з двох варіантів задач.

Перша задача полягає в забезпеченні необхідного значення імовірності знаходження в стані технічної придатності до використання при максимізації прибутків в експлуатації.

Друга задача передбачає досягнення визначених прибутків за максимальної імовірності знаходження в стані технічної придатності до використання.

У випадку, коли розглядаємо ці задачі як параметричні, то множина рішень обох задач еквівалентна, тобто ми можемо вирішувати лише одну з цих задач. Проте, в непараметричному варіанті (з фіксованими обмеженнями), з урахуванням обраного рівня показника технічної придатності, необхідно знайти економічно найвигідніший спосіб її забезпечення. Це пояснюється тим, що при недостатньо обґрунтованих обмеженнях на витрати можна отримати максимальне значення показника технічної придатності, яке не відповідає необхідному рівню. Таким чином, технічну придатність, яка є більш суттєвим показником, слід розглядати як обмеження, в той час як витрати, що є менш суттєвим показником, розглядаються як цільова функція. У подальших розділах буде зосереджено увагу на першому варіанті задач.

Підвищення ефективності системи технічного обслуговування означає збільшення результативності та оптимізацію процесів, пов'язаних з технічним обслуговуванням та підтримкою технічної придатності вантажного судна. Це може включати зменшення часу зупинок для ремонту, зменшення витрат на запасні частини, підвищення тривалості експлуатаційного періоду обладнання тощо. Усі ці зміни допомагають забезпечити більш якісне та ефективне функціонування судна та знизити витрати на його утримання.

Результативність – це показник того, наскільки ефективно досягаються поставлені цілі або завдання. Це поняття відображає, наскільки успішно досягнуті результати відповідають запланованим або очікуваним результатам. У контексті технічного обслуговування судна, результативність може оцінюватися, наприклад, за кількістю годин ефективної роботи судна між зупинками для технічного обслуговування, витратами на ремонт у порівнянні з бюджетом, зниженням часу зупинок на ремонт тощо. Результативна система технічного обслуговування досягає максимальних можливих результатів при мінімальних затратах.

З метою оцінки ефективності системи ТО вантажного судна, що відбувається на різних етапах її вдосконалення в судноплавній компанії, здійснюється використання розглянутих у Розділі 1 показників ефективності системи ТО. В якості доповнення до розглянутого матеріалу першого розділу може бути наведений комплексний показник ефективності системи ТО вантажного судна – узагальнений індекс надійності (УІН) [14]. Для розрахунку даного УІН використовуються вже наявні аналітичні моделі, побудовані на основі методів теорії матриць, логіко-імовірнісних підходів, а також використання байєсівських і мінімаксних оцінок [15].

Для досягнення підвищення ефективності системи ТО важливим є постійний процес удосконалення компонентів, що входять до сукупності параметрів системи ТО. В одному з напрямів підвищення ефективності системи ТО через застосування цифрових стратегій (сегмент **D**) є вдосконалення коригувальних ланок кожного з трьох етапів процесу управління системою ТО. Це вдосконалення (сегмент **D**) виражається через розробку і впровадження в практику судноплавних компаній алгоритмів машинного навчання для планування складу робіт з ТО і їх періодичності (план ТО) на першому етапі, методів аналізу великих обсягів даних для обробки результатів експлуатації на другому етапі, прескриптивних алгоритмів аналізу і синтезу оптимальних параметрів системи ТО на третьому етапі (рис. 1). Результати вдосконалення через зворотні зв'язки передаються у інформаційну та управлінську (виконавчу) складові процесу забезпечення заданих параметрів і показників ефективності системи технічного обслуговування вантажного судна.

Висновки

Використання цифрових стратегій в системі технічного обслуговування вантажних суден є ключовим чинником для досягнення оптимальної ефективності та економічної вигоди на морському транспорті та призведе до ряду позитивних змін та покращень:

1. В результаті дослідження визначено, що оптимальні параметри системи технічного обслуговування вантажних суден можуть бути досягнуті за допомогою цифрових стратегій. Встановлено, що використання цифрових інструментів дозволяє зменшити час зупинок для ремонту, витрати на запасні частини та підвищити тривалість експлуатаційного періоду обладнання.

2. Дослідження показало, що цифрові стратегії дозволяють ефективно оцінювати надійність та безпеку судової експлуатації, зменшуючи ризики технічних відмов та аварій.

3. Застосування цифрових підходів в технічному обслуговуванні вантажних суден дозволяє знизити витрати на обслуговування та забезпечити ефективне функціонування суден.

4. Однією із ключових складових статті є розробка схеми системної взаємодії при підвищенні ефективності систем технічного обслуговування вантажних суден на основі цифрових стратегій. Ця схема включає в себе використання алгоритмів машинного навчання для планування робіт з технічного обслуговування, аналіз великих обсягів даних для обробки результатів експлуатації та розробку прескриптивних алгоритмів аналізу та синтезу оптимальних параметрів системи ТО. Ця схема дозволяє забезпечити максимальні результати при мінімальних затратах.

Подальше використання результатів цього дослідження може включати їхнє практичне застосування в судноплавних компаніях та портових установах. Впровадження цифрових стратегій у практику технічного обслуговування вантажних суден може призвести до зменшення технічних відмов, підвищення продуктивності та зниження витрат. Крім того, ці дослідження можуть служити як основа для подальших наукових розробок у галузі оптимізації систем технічного обслуговування суден, включаючи розробку нових цифрових інструментів та методик.

Загалом, ця стаття відкриває перспективи для поліпшення надійності та ефективності технічного обслуговування вантажних суден, що має важливе значення для морського транспорту та логістики.

Перелік використаних джерел:

1. Recent advancements in data-driven methodologies for the fault diagnosis and prognosis of marine systems: A systematic review / C. Velasco-Gallego, B.N. De Maya, C.M. Molina, I. Lazakis, N.C. Mateo. *Ocean Engineering*. 2023. Vol. 284. 115277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115277>.
2. Kimera D., Nangolo, F. Maintenance optimization for marine mechanical systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2019. Vol. 234(2). Pp. 446-462. DOI: <https://doi.org/10.1177/1475090219882601>.
3. Zhyrov G. Analysis of problem optimization of parameters maintenance process according to state with constant periodicity of control. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. Vol. 8(6). Pp. 2606-2611. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/63862020>.
4. Improving the operational output of marine vessel mainengine system through cost reduction using reliability technique / Ugoji K.U., Isaac O.E., Nkoi B., Wofuru-Nyenke O.K. *International journal of engineering and modern technology*. 2022. Vol. 8(2). Pp. 36-52. DOI: <https://doi.org/10.56201/ijemt.v8.no2.2022.pg36.52>.
5. Optimization of maintenance scheduling of ship borne machinery for improved reliability and reduced cost / Verma A.K., Srividya A., Rana A., Khattri S.K. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*. 2012. Vol. 19. № 3. Pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1142/s0218539312500143>.
6. Development of optimized maintenance system for vehicle fleet / R. Haider, A.M. Kakar, S.B. Khattak, S.U. Rehman, S. Maqsood, M. Ullah, R. Akhtar, A. Sikandar. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol. 34(2). Pp. 21-28. DOI: <https://doi.org/10.25211/jeas.v34i2.2114>.
7. Emovon I., Norman R., Murphy A.J. Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2015. Vol. 29(3). Pp. 519-531. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-015-1133-6>.
8. Lazakis I., Turan O., Aksu S. Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy. *Ships and Offshore Structures*. 2010. Vol. 5(4).

- Pp. 337-357. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445302.2010.480899>.
9. System of water vehicle power plant remote condition monitoring / A. Golovan, I. Honcharuk, O. Deli, O. Kostenko, Y. Nykyforov. *IOP Conference Series*. 2021. Vol. 1199(1). Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1199/1/012049>.
 10. Aspects of forming the information V2I model of the transport vessel / A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov, O. Shumylo. *IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019. Pp. 390-393. DOI: <https://doi.org/10.1109/mees.2019.8896595>.
 11. Bayer D., Aydın O., Celik M. An ICOR approach towards ship maintenance software development. *International Journal of Maritime Engineering*. 2021. Vol. 160. Part A1. Pp. A11-A20. DOI: <https://doi.org/10.5750/ijme.v160ia1.1044>.
 12. Ford D.N., Housel T.J., Mun J. Ship maintenance processes with collaborative product lifecycle management and 3D terrestrial laser scanning tools: reducing costs and increasing productivity. *Proceedings of the ninth Annual Acquisition Research Symposium*. 2011. Pp. 266-291. DOI: <https://doi.org/10.21236/ada543988>.
 13. Research on simulation method of ship equipment maintenance support process / L. Li, P. Yi, Z. Wang, K. Liu, F. Li. *Proceedings of the 2nd International Conference on Algorithms, High Performance Computing and Artificial Intelligence (AHPCAI)*, Guangzhou, China, 21-23 October 2022. Pp. 778-782. DOI: <https://doi.org/10.1109/ahpcai57455.2022.10087716>.
 14. Golovan A., Gritsuk I. The main principles of assessing the efficiency of ship maintenance. *Transport development*. 2023. Vol. 1(16). Pp. 47-60. DOI: <https://doi.org/10.33082/td.2023.1-16.04>.
 15. Kim T., Song J. Generalized Reliability Importance Measure (GRIM) using Gaussian mixture. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018. Vol. 173. Pp. 105-115. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.01.005>.

References:

1. C. Velasco-Gallego, B.N. De Maya, C.M. Molina, I. Lazakis, and N.C. Mateo, «Recent advancements in data-driven methodologies for the fault diagnosis and prognosis of marine systems: A systematic review», *Ocean Engineering*, vol. 284, 115277, 2023. doi: **10.1016/j.oceaneng.2023.115277**.
2. D. Kimera, and F. Nangolo, «Maintenance optimization for marine mechanical systems», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, vol. 234(2), pp. 446-462, 2019. doi: **10.1177/1475090219882601**.
3. G. Zhyrov, «Analysis of problem optimization of parameters maintenance process according to state with constant periodicity of control», *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 8(6), pp. 2606-2611, 2020. doi: **10.30534/ijeter/2020/63862020**.
4. K.U. Ugoji, O.E. Isaac, B. Nkoi, and O.K. Wofuru-Nyenke, «Improving the Operational Output of Marine Vessel MainEngine System through Cost Reduction using Reliability Technique», *International journal of engineering and modern technology*, vol. 8(2), pp. 36-52, 2022. doi: **10.56201/ijemt.v8.no2.2022.pg36.52**.
5. A.K. Verma, A. Srividya, A. Rana, and S.K. Khattri, «Optimization of maintenance scheduling of ship borne machinery for improved reliability and reduced cost», *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, vol. 19, № 3, pp. 1-15, 2012. doi: **10.1142/s0218539312500143**.
6. R. Haider, A.M. Kakar, S.B. Khattak, S.U. Rehman, S. Maqsood, M. Ullah, R. Akhtar, and A. Sikandar, «Development of optimized maintenance system for vehicle fleet», *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 34(2), pp. 21-28, 2015. doi: **10.25211/jeas.v34i2.2114**.
7. I. Emovon, R. Norman, and A.J. Murphy, «Hybrid MCDM based methodology for selecting the optimum maintenance strategy for ship machinery systems», *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 29(3), pp. 519-531, 2015. doi: **10.1007/s10845-015-1133-6**.
8. I. Lazakis, O. Turan, and S. Aksu, «Increasing ship operational reliability through the implementation of a holistic maintenance management strategy», *Ships and Offshore Structures*, vol. 5(4), pp. 337-357, 2010. doi: **10.1080/17445302.2010.480899**.
9. A. Golovan, I. Honcharuk, O. Deli, O. Kostenko, and Y. Nykyforov, «System of Water Vehicle

- Power Plant Remote Condition Monitoring», *IOP Conference Series*, vol. 1199(1), pp. 1-11, 2021. doi: 10.1088/1757-899x/1199/1/012049.
10. A. Golovan, I. Gritsuk, S. Rudenko, V. Saravas, A. Shakhov, and O. Shumylo, «Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel», in 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2019, pp. 390-393. doi: 10.1109/mees.2019.8896595.
11. D. Bayer, O. Aydin, and M. Celik, «An ICOR approach towards ship maintenance software development», *International Journal of Maritime Engineering*, vol. 160, part A1, pp. A11-A20, 2021. doi: 10.5750/ijme.v160ia1.1044.
12. D.N. Ford, T.J. Housel, and J. Mun, «Ship Maintenance Processes with Collaborative Product Lifecycle Management and 3D Terrestrial Laser Scanning Tools: Reducing Costs and Increasing Productivity», in Proceedings of the ninth Annual Acquisition Research Symposium, 2011, pp. 266-291. doi: 10.21236/ada543988.
13. L. Li, P. Yi, Z. Wang, K. Liu, and F. Li, «Research on Simulation Method of Ship Equipment maintenance Support process», in Proceedings of the 2nd International Conference on Algorithms, High Performance Computing and Artificial Intelligence (AHPCAI), 2022, pp. 778-782. doi: 10.1109/ahpcai57455.2022.10087716.
14. A. Golovan, and I. Gritsuk, «The main principles of assessing the efficiency of ship maintenance», *Transport development*, vol. 1(16), pp. 47-60, 2023. doi: 10.33082/td.2023.1-16.04.
15. T. Kim, and J. Song, «Generalized Reliability Importance Measure (GRIM) using Gaussian mixture», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 173, pp. 105-115, 2018. doi: 10.1016/j.ress.2018.01.005.

Рецензент: І.В. Грицук
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 18.07.2023
Стаття прийнята 12.08.2023

УДК 629.5:656.6

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300117

© Дудченко С.*

УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РАЙОНУ ПЛАВАННЯ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТУ ПЕРЕХОДУ СУДНА

Планування оптимального маршруту переходу судна є ключовою проблемою при проектуванні систем планування руху та навігації. Дана проблема полягає в необхідності визначення траєкторії від початкової до кінцевої точки, що забезпечує відсутність зіткнень з переешкодами. При вирішенні даної проблеми, також потрібно враховувати динаміку судна, невизначеність і нестационарність водного середовища, час на обчислення шляху та фізичну здійсненність траєкторії. Задача планування традиційно сформульована як задача оптимізації стану поточного положення судна відносно цільового положення. Найчастіше цю задачу розв'язують у конфігураційному просторі, який складається з набору переешкод, кінематичних і динамічних обмежень і набору точок в районах плавання. Методи планування поділяються на глобальні та локальні. Глобальні методи будують маршрут на основі відомої карти, тоді як локальні методи коригують шлях при виявленні переешкод. Проте на даний момент математичні моделі району плавання лише частково враховують невизначеності зон, в яких функціонує судно. Це зумовлює планування

* капітан далекого плавання, ст. викладач, Херсонська державна морська академія; директор, ТОВ «Херсонський морський спеціалізований тренажерний центр при Херсонській державній морській академії», м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1613-7226, dudchenko.serhiy@gmail.com

локальних траєкторій в межах конкретного району плавання за допомогою простого прямолінійного алгоритму. Оскільки у процесі планування переходу від «причалу» до «причалу» задля забезпечення навігаційної безпеки судна необхідне використання всієї наявної інформації для складання максимально детальної уявної моделі переходу судна перед початком кожного плавання. Для вирішення даного завдання в даній роботі доведено, що у процесі побудови оптимального маршруту необхідно провести повний аналіз всіх етапів переходу судна, в результаті чого підвищується оптимальність запланованого маршруту переходу. Удосконалено математичну модель району плавання для оптимального маршруту переходу судна, в якій застосовано математичний апарат нечітких множин.

Ключові слова: voyage planning, e-Voyage, e-Navigation, навігаційна обстановка, маршрут переходу, район плавання.

S. Dudchenko. Improvement of the mathematical model of the navigation area for the optimal ship passage route. Planning the optimal route of a vessel passage is a key problem in the design of traffic planning and navigation systems. This problem consists in the need to determine the trajectory from the initial point to the final point, which ensures the absence of collisions with obstacles. When solving this problem, it is also necessary to take into account the dynamics of the vessel, the uncertainty and non-stationarity of the water environment, the time to calculate the path and the physical feasibility of the trajectory. The planning task is traditionally formulated as the task of optimizing the state of the current position of the vessel relative to the target position. Most often, this problem is solved in the configuration space, which consists of a set of obstacles, kinematic and dynamic constraints, and a set of points in the swimming areas. Planning methods are divided into global and local. Global methods build a route based on a known map, while local methods adjust the path when obstacles are detected. However, at the moment, mathematical models of the navigation area only partially take into account the uncertainties of the zones in which the vessel operates. This determines the planning of local trajectories within a specific swimming area using a simple straight-line algorithm. Since in the process of planning the transition from «berth» to «berth» in order to ensure the navigational safety of the ship, it is necessary to use all available information to compile the most detailed imaginary model of the ship's transition before the start of each voyage. In order to solve this task, this paper proves that in the process of building the optimal route, it is necessary to conduct a full analysis of all stages of the passage of the vessel, which increases the optimality of the planned passage route. The mathematical model of the navigation area for the optimal route of the ship's passage has been improved, in which the mathematical apparatus of fuzzy sets is applied.

Key words: voyage planning, e-Voyage, e-Navigation, navigation situation, transit route, sailing area.

Постановка проблеми. У процесі оцінки району плавання та підходів до портів суднової дії повинен усвідомити:

- правила плавання у цьому районі;
- навігаційно-гідрографічні особливості району: рекомендовані шляхи та маршрути, фарватери та канали, довжину та ширину їх колін; небезпечні, заборонені та обмежені для плавання райони, райони інтенсивного руху суден та поромів, лову риби, розвідки та видобутку нафти та газу; системи поділу руху суден; місця можливих якірних стоянок та його характеристики;
- забезпеченість району плавання засобами навігаційного обладнання, їх режими роботи та обмеження використання; можливості застосування радіолокаційних засобів (РЛЗ) визначення місця судна; характерні ознаки для впізнання навігаційних орієнтирів та запобіжних знаків;
- основні (глобальна навігаційна супутникова система (ГНСС)) та резервні (візуальні та радіолокаційні) способи та необхідну дискретність обсервацій;
- зони дії, види обслуговування систем керування рухом суден (СКРС);

– гідрологічні особливості: припливно-відливні явища; швидкість та напрямок течії; характер та ступінь вітрового хвилювання; опрісненість води; вплив цих факторів на допустиме осадження та швидкість судна при проходженні ним найбільш мілководних ділянок та ін.

Розробка оптимального маршруту переходу судна передбачає повний аналіз всіх етапів переходу, що вимагає значних ресурсів для перебору великої кількості непотрібних елементів (множини «хибних» маршрутів, урахування інших факторів для оптимізації для забезпечення безпеки плавання). Практика судноводіння показує, що пошук оптимальної траєкторії руху судна слід поділити на рівні ієрархії, на яких застосовуються моделі навколишнього простору та руху різного ступеня абстракції. При цьому ступінь деталізації моделі руху має відповідати деталізації моделі району плавання, а евристичні та багатоетапні підходи мають передбачати сумісність результатів на кожному етапі планування.

У роботі [1] розглядаються різні методи пошуку та прокладання маршрутів руху рухомих об'єктів:

1. У формалізованому, нечітко заданому, неформалізованому районі плавання.
2. Методи, в яких накопичується та не накопичується інформація про район плавання.
3. Глобальні та локальні.
4. Адаптивні та неадаптивні.

Використання у загальному випадку будь-якого з методів може виявитися недостатнім для вибору оптимального маршруту судна. Доцільно спільне застосування різних за властивостями алгоритмів залежно від етапу побудови маршруту та рівня деталізації району плавання (MR).

Подібний підхід дозволяє використовувати переваги та компенсувати недоліки різних моделей та алгоритмів, задовольнити різним критеріям оптимальності, зменшити вимоги до обсягів ресурсів для переробки інформації, забезпечити її цілеспрямоване накопичення та збереження для конструювання баз знань навігаційної обстановки [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В різних дослідженнях для формалізації районів плавання при побудові оптимального маршруту переходу судна широко використовується алгоритм A^* . На основі даного алгоритму було вдосконалено моделі району плавання для оптимального маршруту судна для вирішення завдань планування переходу. В роботі [3] для прискорення швидкості пошуку модифікувати евристичну функцію в залежності від щільності перешкод. Для пошуку районів плавання в будь-якому напрямку в роботі [4] запропоновано алгоритм Θ^* . Проте використання даної моделі потребує багато часу, оскільки алгоритм перевіряє багато незадіяних вузлів. Тому, в роботі [5] було запропоновано покращення алгоритму Θ^* . Алгоритм $\text{Lazy}\Theta^*$ вибирає вузол лише тоді, коли він визначений як поточний вузол [3], що розширює реалізацію запропонованого підходу A^* в середовищі, захищеному статичними та рухомими перешкодами та різною інтенсивністю руху навігаційних об'єктів. Математичні моделі формування судової безпечної зони запропоновано в публікаціях [6], які містять системний облік істотних чинників, орієнтованих на практичне використання в процесі плавання суден.

Розвиток технології Інтернет речей (IoT), Big Data, хмарних обчислень привертають все більшу увагу для розробки морських інтелектуальних систем [7]. Для прогнозування енергоефективності маршруту в роботах [8, 9] було розроблено модель на основі даних, для обробки яких застосовано штучну нейронну мережу. Далі був представлений маршрут з оптимальною енергоефективністю. Штучна нейронна мережа побудувала маршрут судна на основі масиву даних, отриманих з AIS між певними портами. В роботі [10] запропоновано метод на основі моделі хмарних обчислень для автоматичної побудови маршруту. В дослідженні [11] запропоновано модель динамічного простору рівнів небезпеки зон в районі плавання для побудови гарантованого шляху руху судна від початкової до кінцевої точки.

Мета дослідження є удосконалення математичної моделі району плавання для застосування в алгоритмах планування для оптимізації запланованого маршруту з врахуванням обмежень, що накладаються властивостями навігаційної обстановки.

Виклад основного матеріалу. Для вибору маршруту переходу та забезпечення безпеки плавання судна з використанням автоматизованих навігаційних комплексів із системи інформаційного простору (СИП) має бути формалізована математична модель навігаційно-гідрографічної обстановки. Її основу складатиме цілеспрямована систематизація, сформульована у керівних документах. Крім того, мають бути встановлені принципи взаємодії елементів, пов'язані з мореплаванням.

На стратегічному рівні планування пропонується виділяти два характерні типи інформації (I^{MR}) про район плавання (MR), в якому буде здійснюватися перехід судна:

$$I^{MR} = \{WS, LS\}, \quad (1)$$

де $WS \in (ws_1, ws_2, \dots, ws_j)$ – тип району водного простору:

- район океану (OCR);
- морські райони (SR);
- протоки (DT);
- бухти (BT);
- затоки (BS);
- річки (RV);

$LS \in (ls_1, ls_2, \dots, ls_n)$ – район суші, до якого може відноситися:

- материк (MT);
- острів (ISL);
- півострів ($PISL$), порти, хвилеломи, причали та ін.

Район водного простору можна задати множиною точок:

$$ws_n \in (Cord_n^{ws}, af_n^{ws}), \quad (2)$$

де $Cord_n^{ws} \in (x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_n, d_1 \dots d_i)$ – значення координат (x, y) та глибини (d) в точці що належить ws_n ;

af_n^{ws} – приналежність району одному з типів району плавання.

Район суші можна задати множиною точок:

$$ls_n \in (Cord_n^{ls}, af_n^{ls}), \quad (3)$$

де $Cord_n^{ls} \in (x_1 \dots x_n, y_1 \dots y_n)$ – значення координат (x, y) в точці, що належить ls_n ;

af_n^{ls} – відношення району суші до $\{MT, ISL, PISL\}$.

Взаємозв'язок між типовими районами водних просторів за маршрутом переходу судна, особливостями судноплавства в цих районах та експлуатаційними характеристиками судна визначають рекомендовані шляхи переходу. Деталізацію характеристик умов плавання судна можна подати як типові групи, що враховують встановлені шляхи, види діяльності та обмеження (рис. 1).

Згідно рис. 1, район плавання, в якому здійснюється перехід судна, можна представити множиною рекомендованих шляхів, які можна побудувати та сформулювати універсальне представлення:

$$MR = \sum_1^n W_i^{rec}, \quad (4)$$

де W_i^{rec} – i -ий рекомендований шлях.

У свою чергу, W_i^{rec} можна описати:

$$W^{rec} = \{Cord_{st}^{W^{rec}}, Cord_{fin}^{W^{rec}}, Cord_i^{W^{rec}}, wid^{W^{rec}}\}, \quad (5)$$

де $Cord_{st}^{W^{rec}}, Cord_{fin}^{W^{rec}}, Cord_i^{W^{rec}}$ – координати початкового, кінцевого та проміжних (поворотних) пунктів шляху;

$wid^{W^{rec}}$ – ширина шляху.

Проте відомі операції над множинами для формування математичної моделі району плавання не в повній мірі можуть описати всі процеси, що ставить під сумнів доцільність їх безпосереднього використання в алгоритмах планування переходу. Це зумовлено тим, що процес планування переходу в системі e-Navigation розглядається як завдання підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності, проте регламентованих правилами, прописаними у відповідних керівних документах. Тому для розрахунку оптимального маршруту переходу суден пропонується при побудові математичної моделі району плавання застосувати математичний апарат нечітких множин.



Рис. 1 – Взаємозв’язок між типовими районами водних просторів за маршрутом переходу судна, особливостями судноплавства в цих районах та експлуатаційними характеристиками судна

Таким чином, район плавання, їх суміжність (можливість переходу), рекомендовані шляхи, інші елементи, необхідні для планування маршруту руху судна, можна представити комбінаціями логічних операцій над нечіткими множинами та їх взаємодій:

$$W_i^{rec} = \left\{ \begin{array}{l} \min \left(\overline{\mu}_{rest} (Cord_1^{ws}), \left(\min (\mu_{ws_1} (Cord_1^{ws})) (1 - \mu_{cond} (Cord_1^{ws}) / Ex_{wessel}) \right) \right) \\ \min \left(\overline{\mu}_{rest} (Cord_2^{ws}), \left(\min (\mu_{ws_2} (Cord_2^{ws})) (1 - \mu_{cond} (Cord_2^{ws}) / Ex_{wessel}) \right) \right) \\ \dots \\ \min \left(\overline{\mu}_{rest} (Cord_j^{ws}), \left(\min (\mu_{ws_j} (Cord_j^{ws})) (1 - \mu_{cond} (Cord_j^{ws}) / Ex_{wessel}) \right) \right) \end{array} \right\}, \quad (6)$$

де $\mu_{rest_j} (Cord_j^{ws})$ – функція приналежності координат j -го району плавання до множини районів обмеження плавання (rest);

$\mu_{ws_j} (Cord_j^{ws})$ – функція приналежності координат $Cord_j^{ws}$ до j -го району плавання (ws_j);

$\mu_{cond} (Cord_j^{ws}) / Ex_{wessel}$ – функція приналежності координат $Cord_j^{ws}$ до j -го району плавання до множини районів, умови плавання (cond) в яких не відповідають експлуатаційним характеристикам судна (Ex_{wessel}).

Від обраного кроку дискретизації залежить точність та інформативність моделі району плавання. Аналіз позитивної морської практики показує, що значення радіусу (якщо вибирається домен безпеки у вигляді кола) зони навігаційної безпеки судна (Z_{nsft}) з урахуванням мінімального навігаційного запасу може застосовуватись як крок дискретизації вибору координат ($Cord_j^{ws}$).

Під час пошуку маршруту потрібно оцінювати близькість судна до небезпек (рис. 2).

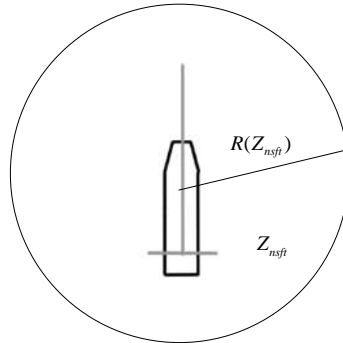


Рис. 2 – Оцінювання близькості судна до небезпек

На основі аналізу поточних координат ws_j визначається їх відповідність району плавання, можливості проходу даної точки судном та відповідність умов плавання експлуатаційним характеристикам судна. Нові координати для переміщення рухомого об'єкта (x_{j+1}, y_{j+1}) визначаються так:

$$\begin{cases} x_{j+1} = x_j + R(Z_{nsft}) \cdot \cos(h) \\ y_{j+1} = y_j + R(Z_{nsft}) \cdot \sin(h) \end{cases} \quad (7)$$

де x_{j+1}, y_{j+1} – координати пункту рекомендованого шляху;

x_j, y_j – координати поточного пункту рекомендованого шляху.

Розроблена модель формалізує процес визначення рекомендованих шляхів як основи району плавання для побудови оптимального маршруту переходу суден. Дана модель дозволяє забезпечити:

- формалізацію процесу оцінки району плавання при плануванні переходу судна в умовах невизначеності;
- врахування у процесі оцінки обстановки більшої кількості параметрів;
- виконання ієрархічного нечіткого логічного виведення.

Висновки

Рекомендовані шляхи переходу судна визначаються тісним взаємним зв'язком між умовами плавання судна, а саме, типовими районами водних просторів за маршрутом переходу, особливостями судноплавства у них та експлуатаційними характеристиками судна. Детальні умови плавання судна подаються у вигляді типових груп, що враховують встановлені шляхи, види діяльності та обмеження.

Удосконалено математичну модель району плавання для оптимального маршруту переходу судна. Доведено, що у процесі побудови оптимального маршруту необхідно провести повний аналіз всіх етапів переходу судна. Для редукції кількості переbrаних варіантів і значного зменшення витрати всіх видів ресурсів у процесі пошуку оптимальної траєкторії руху судна запропоновано використовувати ієрархічний підхід. У відповідності до нього, на кожному рівні ієрархії запропоновано використовувати моделі навколишнього простору та руху різного ступеня абстракції, деталізація яких відповідатиме ступеню деталізації моделі району плавання.

Крім того, запропонований підхід дозволяє задовольнити різним критеріям оптимальності. Поетапне зменшення розглянутих варіантів позитивно відбивається на зниженні обсягів ресурсів, задіяних у переробці інформації. І наприкінці, побудова ієрархічних моделей забезпечує

цілеспрямоване накопичення та збереження навігаційної інформації, потрібної для побудови ієрархічної баз знань для якісного оцінювання навігаційної обстановки, що складається на маршруті переходу.

Перелік використаних джерел:

1. Квасніков П.К. Концепція Е-навігації – навігації майбутнього. Сучасні підходи до високоефективного використання засобів транспорту. Колективна монографія / за ред. В. Чимшира. Ізмаїл : ДІ НУ «ОМА», 2020 – Київ: Міленіум, 2020. 472 с.
2. Шапіро Г.В., Аросланкін О.О., Постніков Є.Є. Формування інформаційної моделі надводної обстановки для автоматизації процесів судноводіння. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2021. Том 3. № 65. С. 37-41. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.037>.
3. A constrained A* approach towards optimal path planning for an unmanned surface vehicle in a maritime environment containing dynamic obstacles and ocean currents / Y. Singh, S. Sharma, R. Sutton, D. Hatton, A. Khan. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 169. Pp. 187-201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.09.016>.
4. Theta*: Any-angle path planning on grids / Daniel K., Nash A., Koenig S., Felner A. *Journal of artificial intelligence research*. 2010. Vol. 39. Pp. 533-579. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1401.3843>.
5. Nash A., Koenig S. Any-angle path planning, *AI Magazine*. 2013. Vol. 34. No. 4. Pp. 85-107. DOI: <https://doi.org/10.1609/aimag.v34i4.2512>.
6. Data-driven based automatic maritime routing from massive AIS trajectories in the face of disparity / S.-K. Zhang, G.-Y. Shi, Z.-J. Liu, Z.-W. Zhao, Z.-L. Wu. *Ocean Engineering*. 2018. Vol. 155. Pp. 240-250. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.060>.
7. Data-driven ship energy efficiency analysis and optimization model for route planning in ice-covered arctic waters / Zhang C., Zhang D., Zhang M., Mao W. *Ocean Engineering*. 2019. Vol. 186. Pp. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.05.053>.
8. Automatic ship route design between two ports: A data-driven method / Y. Wen, Z. Sui, C. Zhou, C. Xiao, Q. Chen, D. Han, Y. Zhang. *Applied Ocean Research*. 2020. Vol. 96. Art. no. 102049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.102049>.
9. Han P., Yang X. Big data-driven automatic generation of ship route planning in complex maritime environments. *Acta Oceanologica Sinica*. 2020. Vol. 39. No. 8. Pp. 113-120. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13131-020-1638-5>.
10. Lisowski J. Synthesis of a Path-Planning Algorithm for Autonomous Robots Moving in a Game Environment during Collision Avoidance. *Electronics*. 2021. Vol. 10(6). Pp. 1-14. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10060675>.
11. Зазірний А.А. Метод формування динамічного простору рівнів небезпеки зон в районі плавання при вирішенні задачі розходження судна з навігаційними небезпеками. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2021. № 1(67). С. 110-118. DOI: <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.67.15>.

References:

1. P.K. Kvasnikov, *Kontsepsiia E-navihatsii – navihatsii maibutnoho. Suchasni pidkhody do vysokoefektyvnoho vykorystannia zasobiv transportu. Kolektyvna monohrafiia* [The concept of E-navigation is the navigation of the future. Modern approaches to highly efficient use of means of transport. Collective monograph]. Izmail, Ukraine: DI NU «OMA», 2020 – Kyiv, Ukraine: Millennium, 2020. (Ukr.)
2. H.V. Shapiro, O.O. Aroslinkin, and Ye.Ie. Postnikov, «Formuvannia informatsiinoi modeli nadvodnoi obstanovky dlia avtomatyzatsii protsesiv sudnovodinnia» [«Formation of information model of above-water surface for automation of shipping processes»], *Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku – Control, navigation and communication systems*, vol. 3, № 65, pp. 37-41, 2021. doi: 10.26906/SUNZ.2021.3.037. (Ukr.)
3. Y. Singh, S. Sharma, R. Sutton, D. Hatton, and A. Khan, «A constrained A* approach towards optimal path planning for an unmanned surface vehicle in a maritime environment containing dynamic obstacles and ocean currents», *Ocean Engineering*, vol. 169, pp. 187-201, 2018. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.09.016.

4. K. Daniel, A. Nash, S. Koenig, and A. Felner, «Theta*: Any-angle path planning on grids», *Journal of artificial intelligence research*, vol. 39, pp. 533-579, 2010. doi: [10.48550/arXiv.1401.3843](https://doi.org/10.48550/arXiv.1401.3843).
5. A. Nash, and S. Koenig, «Any-angle path planning», *AI Magazine*, vol. 34, no. 4, pp. 85-107, 2013. doi: [10.1609/aimag.v34i4.2512](https://doi.org/10.1609/aimag.v34i4.2512).
6. S.-K. Zhang, G.-Y. Shi, Z.-J. Liu, Z.-W. Zhao, and Z.-L. Wu, «Data-driven based automatic maritime routing from massive AIS trajectories in the face of disparity», *Ocean Engineering*, vol. 155, pp. 240-250, 2018. doi: [10.1016/j.oceaneng.2018.02.060](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.02.060).
7. C. Zhang, D. Zhang, M. Zhang, and W. Mao, «Data-driven ship energy efficiency analysis and optimization model for route planning in ice-covered arctic waters», *Ocean Engineering*, vol. 186, pp. 1-22, 2019. doi: [10.1016/j.oceaneng.2019.05.053](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.05.053).
8. Y. Wen, Z. Sui, C. Zhou, C. Xiao, Q. Chen, D. Han, and Y. Zhang, «Automatic ship route design between two ports: A data-driven method», *Applied Ocean Research*, vol. 96, art. no. 102049, 2020. doi: [10.1016/j.apor.2019.102049](https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.102049).
9. P. Han, and X. Yang, «Big data-driven automatic generation of ship route planning in complex maritime environments», *Acta Oceanologica Sinica*, vol. 39, no. 8, pp. 113-120, 2020. doi: [10.1007/s13131-020-1638-5](https://doi.org/10.1007/s13131-020-1638-5).
10. J. Lisowski, «Synthesis of a Path-Planning Algorithm for Autonomous Robots Moving in a Game Environment during Collision Avoidance», *Electronics*, vol. 10(6), pp. 1-14, 2021. doi: [10.3390/electronics10060675](https://doi.org/10.3390/electronics10060675).
11. A.A. Zazirnyi, «Metod formuvannia dynamichnoho prostoru rivniv nebezpeky zon v raioni plavannia pry vyrishenni zadachi rozkhodzhennia sudna z navihatsiinymy nebezpekamy» [«Method for forming dynamic space hazard levels in zones in the navigation area when solving the problem of discovering a vessel with navigation hazard»], *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnoho universytetu Povitrianykh Syl – Scientific Works of Kharkiv National Air Force University*, № 1(67), pp. 110-118, 2021. doi: [10.30748/zhups.2021.67.15](https://doi.org/10.30748/zhups.2021.67.15). (Ukr.)

Рецензент: Д.В. Макарчук
канд. техн. наук, лектор, Solent University

Стаття надійшла 09.08.2023
Стаття прийнята 16.09.2023

УДК 656.075

doi: [10.31498/2225-6733.47.2023.300118](https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300118)

© Грицук І.В.¹, Головань А.І.², Поліщук О.В.³, Літвінов М.Є.⁴,
Головащенко О.В.⁵

ОСОБЛИВОСТІ АЛГОРИТМІВ МОНІТОРИНГУ ПОКАЗНИКІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

У сучасних умовах ефективного функціонування транспортних засобів та систем стає критично важливим для забезпечення безперебійного перевезення пасажирів та вантажів. Однак зростаюча складність і розмір транспортних мереж

¹ д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: [0000-0001-7065-6820](https://orcid.org/0000-0001-7065-6820), gritsuk_iv@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: [0000-0001-6589-4381](https://orcid.org/0000-0001-6589-4381), g.onmu@ukr.net

³ аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: [0000-0001-7369-0485](https://orcid.org/0000-0001-7369-0485), polishukalex591@gmail.com

⁴ аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: [0009-0007-5030-6680](https://orcid.org/0009-0007-5030-6680), mykhaylolitvinov@gmail.com

⁵ аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: [0009-0005-7729-5462](https://orcid.org/0009-0005-7729-5462), venger.a79@gmail.com

породжує низку проблем, пов'язаних з експлуатацією транспортних засобів. У цій статті досліджено особливості алгоритмів моніторингу показників експлуатації транспортних засобів. Метою статті є розробка і формування алгоритмів інформаційної системи моніторингу показників експлуатації засобів транспорту. Розглянуто різні методи моніторингу, включаючи аналіз часових рядів, прогнозування та виявлення несправностей. Описано процес формування моделей та використання їх для прогнозування технічного стану транспортних засобів. Зроблено висновки щодо ефективності існуючих методів моніторингу та визначено напрямки подальших досліджень у цій області. Результати цього дослідження мають практичне застосування і можуть бути корисними для покращення систем моніторингу транспортних засобів та підвищення їхньої безпеки та ефективності експлуатації.

Ключові слова: транспортні засоби, моніторинг, експлуатація, алгоритми, прогнозування, технічний стан, безпека, ефективність, системи моніторингу.

I.V. Gritsuk, A.I. Golovan, O.V. Polishchuk, M.Ye. Litvinov, O.V. Holovashchenko. Peculiarities of algorithms for monitoring vehicle performance. Efficient operation of vehicles and systems is crucial for smooth transportation of passengers and cargo. However, the increasing complexity and size of transportation networks create problems related to vehicle operation. Challenges faced by advanced algorithms for monitoring vehicle performance include analyzing large amounts of data, unstable real-time indicators, and the need for accurate and automated methods to predict the technical condition of vehicles. This article reviews modern approaches to monitoring, identifying factors that affect the technical condition of vehicles, and implementing advanced analysis and forecasting methods in modern information and analytical systems. Thus, this article aims to examine the characteristics of algorithms used to monitor vehicle performance indicators and identify ways to improve their efficiency and accuracy. This can be achieved by utilizing the latest methods of data analysis and forecasting. This article investigates algorithms for monitoring vehicle operation indicators and aims to develop algorithms for an information system to monitor vehicle performance. The article discusses different methods for monitoring technical conditions of vehicles, such as time series analysis, forecasting, and fault detection. It describes the process of creating models and using them to predict the condition of vehicles. The article concludes by evaluating the effectiveness of current monitoring methods and suggesting areas for further research. The study's results have practical applications and can improve vehicle monitoring systems, increasing their safety and efficiency. The authors are confident that the results of the study will help improve monitoring systems and increase the overall level of safety and efficiency of vehicles and transport systems.

Key words: vehicles, monitoring, operation, algorithms, forecasting, technical condition, safety, efficiency, monitoring systems.

Постановка проблеми. У сучасних умовах ефективного функціонування транспортних засобів і систем стає надзвичайно важливим для забезпечення безперебійного руху пасажирів і вантажів. Однак зростаюча складність і об'єм транспортних мереж породжують низку проблем, пов'язаних саме з експлуатацією транспортних засобів.

Передові алгоритми моніторингу показників експлуатації транспортних засобів стикаються з викликами, такими як складність аналізу великих обсягів даних, нестабільність показників у реальному часі, а також потреба в точних та автоматизованих методах прогнозування технічного стану транспортних засобів. Стаття спрямована на розгляд сучасних підходів до моніторингу, визначення факторів, що впливають на технічний стан транспортних засобів, а також впровадження передових методів аналізу та прогнозування в сучасні інформаційно-аналітичні системи.

Отже, ця стаття ставить перед собою завдання розглянути особливості алгоритмів моніторингу показників експлуатації транспортних засобів та виявити можливі шляхи підвищення їх ефективності та точності, зокрема шляхом використання новітніх методів аналізу даних та прогнозування.

Основними завданнями статті є:

1. Ретельне вивчення існуючих алгоритмів моніторингу та їхніх переваг та недоліків;
2. Аналіз впливу різних факторів на технічний стан транспортних засобів і визначення їхньої значущості;
3. Розробка та випробування нових методів прогнозування, спрямованих на підвищення точності та швидкості виявлення можливих проблем;
4. Встановлення практичних рекомендацій щодо використання передових алгоритмів моніторингу для підвищення ефективності та надійності транспортних систем.

Автори впевнені, що результати виконаного дослідження допоможуть вдосконалити системи моніторингу та підвищити загальний рівень безпеки та ефективності транспортних засобів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянуті роботи дають уявлення про особливості формування алгоритмів моніторингу показників експлуатації засобів транспорту. Для моніторингу ефективності роботи транспортних засобів розроблено низку алгоритмів, кожен з яких має свої унікальні особливості. Автори статті [1] пропонують алгоритм, який оцінює роботу оператора, використовуючи дані про стан транспортного засобу, тоді як дослідження [2] зосереджується на математичних моделях для визначення показників ефективності та впливу на навколишнє середовище. Стаття [3] представляє інтегровану систему, яка поєднує бортові та дистанційні датчики для моніторингу викидів забруднюючих речовин, споживання палива, стилю водіння та стану здоров'я водія. Автори статті [4] представляють алгоритм моніторингу інформації про швидкість автономних транспортних засобів, який використовує магніторезистивний датчик і досягає високої точності та низького споживання енергії.

Також у проаналізованих роботах припускається, що сучасні інформаційні системи та технології можуть сприяти удосконаленню процесів моніторингу показників експлуатації засобів транспорту. Датчики, встановлені на транспортних засобах, можна використовувати для моніторингу дорожнього руху [5]. Обчислювальний підхід із застосуванням бутстрапу був використаний як статистичний діагностичний інструмент для оцінки ефективності виявлення аномалій у процесах визначення технічного стану [6]. Високотехнологічні датчики, як правило, присутні в техніці та не оминають і автомобільну техніку [7]. Алгоритми злиття сенсорних даних акумулюють всю доступну сенсорну інформацію і надають моделі, що описують навколишнє середовище [8].

Ці алгоритми в сукупності сприяють вдосконаленню моніторингу ефективності транспортних засобів.

Проаналізовані статті разом підкреслюють важливість вдосконалення служб технічного контролю, матеріального постачання і оперативного управління, оптимізації інтервалів визначення і порогових значень показників технічного стану, а також використання методів підвищення надійності для вдосконалення системи моніторингу показників ефективності засобів транспорту.

Мета статті полягає в розробці і формуванні алгоритмів інформаційної системи моніторингу показників експлуатації засобів транспорту.

Виклад основного матеріалу.

1. Формування процесу збору даних про технічний стан транспортного засобу.

Початковим і одним з найбільш відповідальних етапів інформаційної моделі інформаційного програмного комплексу (ІПК) є отримання даних про параметри технічного стану транспортного засобу (ТЗ), щодо яких можливо здійснювати операції прогнозування. Важливість даного етапу у інформаційній моделі ІПК пояснюється якістю прогнозування технічних параметрів ТЗ, який безпосередньо залежить від отриманих вихідних даних. Найбільш відповідальним параметром прогнозу є інтервал часу отримання інформації. Особливість полягає в тому, що чим меншим буде інтервал, тим вище буде точність отриманого прогнозу, але в цьому випадку суттєво збільшується час визначення прогнозних значень [9, 10].

Необхідними даними для прогнозування є послідовності упорядкованих в часовій відстані числових значень (показників), які характеризують значення основних технічних параметрів ТЗ, тобто інтервальні часові ряди (повні), що, як правило, представлені у загальному вигляді [9, 10], як:

$$y_{ti} = f_i(t_i, x_{ti}) + \varepsilon_{ti}, t_i = 1, 2, \dots, T_i, \quad (1)$$

де y_{ti} – значення показників інтервальних часових рядів; $f_i(t_i, x_{ti})$ – детерміновані складові; x_{ti} – значення окремих детермінованих факторів, які впливають на детерміновані складові f_i у відповідні моменти часу t_i ; ε_{ti} – випадкові складові; T_i – довжина часових рядів.

Крім цього, одночасно зі збором інформації про параметри ТЗ здійснюється моніторинг і визначення несправностей ТЗ.

Для побудови часового ряду в системі моніторингу параметрів ТЗ були розроблені і сформовані алгоритми процесу збору даних і розпізнавання статусу несправностей ТЗ, розроблений і сформований процес прогнозування параметрів стану ТЗ, який може бути використаний для прогнозування параметрів технічного обслуговування і ремонту ТЗ, окремих питань управління, матеріального постачання тощо. Алгоритм повноцінно адаптовано до умов застосування інформаційної моделі ІПК через бортовий інформаційно-діагностичний комплекс (БПДК). Алгоритм збору даних має вигляд, представлений на рис. 1. Первинними вхідними даними для застосування алгоритму є мінімальний інтервал часу Δt , саме через який відбуватиметься зчитування інформації з системних датчиків, і період T часу, саме за який здійснюється збір оперативної інформації. Вихідними даними алгоритму є масив даних, який містить часовий ряд значень отриманих параметрів $D_i, i = 1, 2, \dots, T/\Delta t$. Особливості процесу і основні етапи збору даних в системі моніторингу стану ТЗ детально показані на рис. 1.

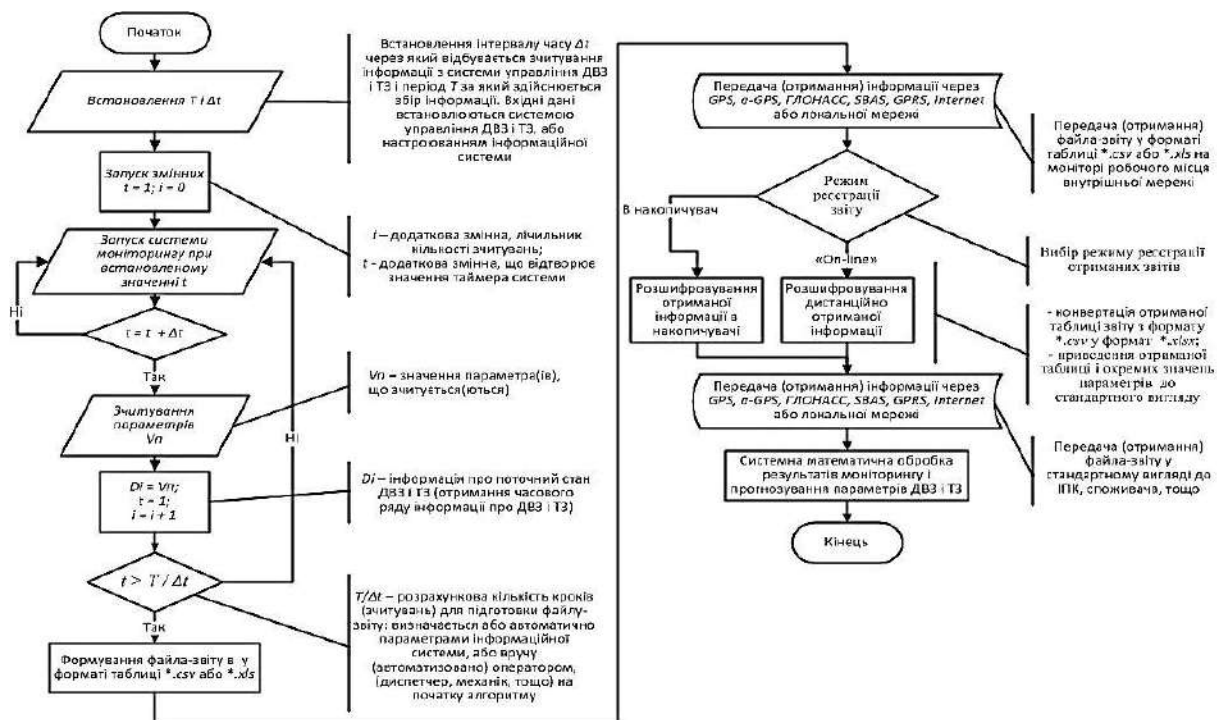


Рис. 1 – Алгоритм збору даних системи моніторингу параметрів стану транспортного засобу в межах роботи інформаційного програмного комплексу

2. Особливості процесу діагностування стану і визначення статусу несправностей транспортного засобу.

Крім описаних вище можливостей система оперативного моніторингу, діагностування і прогнозування технічного стану ТЗ при поєднанні з БПДК має можливість здійснювати прогнозування параметрів оперативного управління ТЗ або його обслуговуванням і ремонтом. Особливістю вказаного процесу є те, що можуть існувати три основних варіанти визначення статусу несправностей ТЗ, що показані на рис. 2 [9, 10]. Особливості процесу моніторингу, управління і визначення статусу несправностей ТЗ саме з використанням БПДК в умовах роботи ІПК, а саме без взаємодії водія ТЗ з оператором, в напівавтоматичному режимі і автоматичному режимі з використанням БПДК із взаємодією з підприємством з експлуатації засобу транспорту.

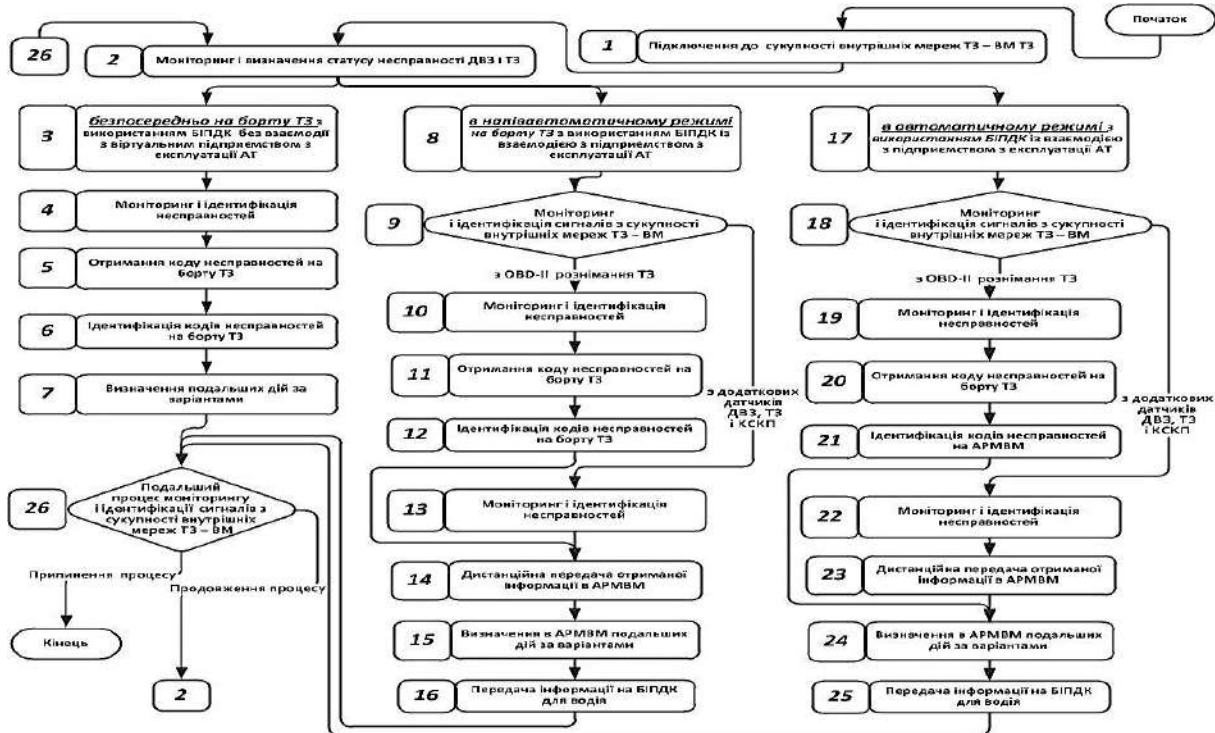


Рис. 2 – Варіанти алгоритму моніторингу і визначення статусу несправностей транспортного засобу в межах роботи інформаційного програмного комплексу

3. Розробка алгоритмів оцінювання способів забезпечення системних властивостей з можливістю прогнозування показників технічного стану.

Розроблений алгоритм інформаційної системи для оцінювання способів забезпечення системних властивостей ТЗ з можливостями прогнозування їх технічного стану в умовах експлуатації показаний на рис. 3.

На початку проведення оцінювання способів забезпечення системних властивостей з можливістю параметричного прогнозування параметрів у блоці 1 із отриманого масиву інформації про параметри технічного стану ТЗ в часі вибираються (формується) для підсистем масиви структур «модель – статистичні характеристики» D_1 і D_2 , тобто моделі структури, що включають в себе відповідні параметри моделей. У інформаційному розумінні D_1 і D_2 – часові ряди значень параметрів, що аналізуються і які представлені у вигляді масивів.

У блоці 2 формуються функції, які розраховують довжину масивів

$$L_{e1}(n_1) = f(D_1, n_1), \tag{2}$$

$$L_{e2}(n_2) = f(D_2, n_2), \tag{3}$$

де n_1 і n_2 – змінні, що містять довжини масивів структур «модель – статистичні характеристики» у підсистемах.

У блоці 3 формуються вектори

$$\bar{X}_1 = [1, 2, \dots, L_{e1}(n_1) = f(D_1, n_1)], \tag{4}$$

$$\bar{X}_2 = [1, 2, \dots, L_{e2}(n_2) = f(D_2, n_2)], \tag{5}$$

з масивів інформації про параметри технічного стану ТЗ у підсистемах в часі, що містять номери (індекси) $[1, 2, 3, \dots, n_1]$ і $[1, 2, 3, \dots, n_2]$ рівнів часового ряду (n_1 і n_2 довжини масивів D_1 і D_2 відповідно).

Модуль 1 поєднує блок 4 і блок 5 в одне ціле для формування з масивів інформації про параметри технічного стану ТЗ в часі апроксимуючі моделі лінійного типу у підсистемах і керує можливостями взаємодії її з іншими моделями.

У блоці 4 формуються функції:

$$aa_{11} = f_{11}(x_1, t_1, D_1) \rightarrow y_1(t_1) = a_{01} + a_{11}t_1, \tag{6}$$

$$aa_{12} = f_{12}(x_2, t_2, D_2) \rightarrow y_2(t_2) = a_{02} + a_{12}t_2, \tag{7}$$

які будують апроксимуючі моделі лінійного типу на основі даних підсистем X_1 і X_2 та D_1 і D_2 в часі, що обчислюють в якості результату структури «модель» і структури «статистичні характеристики», де \rightarrow (стрілка) позначає звідки і куди діють функції f_1 і f_2 . Записи $f_1: X_1 \rightarrow Y_1$ і $f_2: X_2 \rightarrow Y_2$ означають, що відображення f_1 і f_2 переводять елементи множин X_1 і X_2 в елементи множин (функції заданого типу) Y_1 і Y_2 .

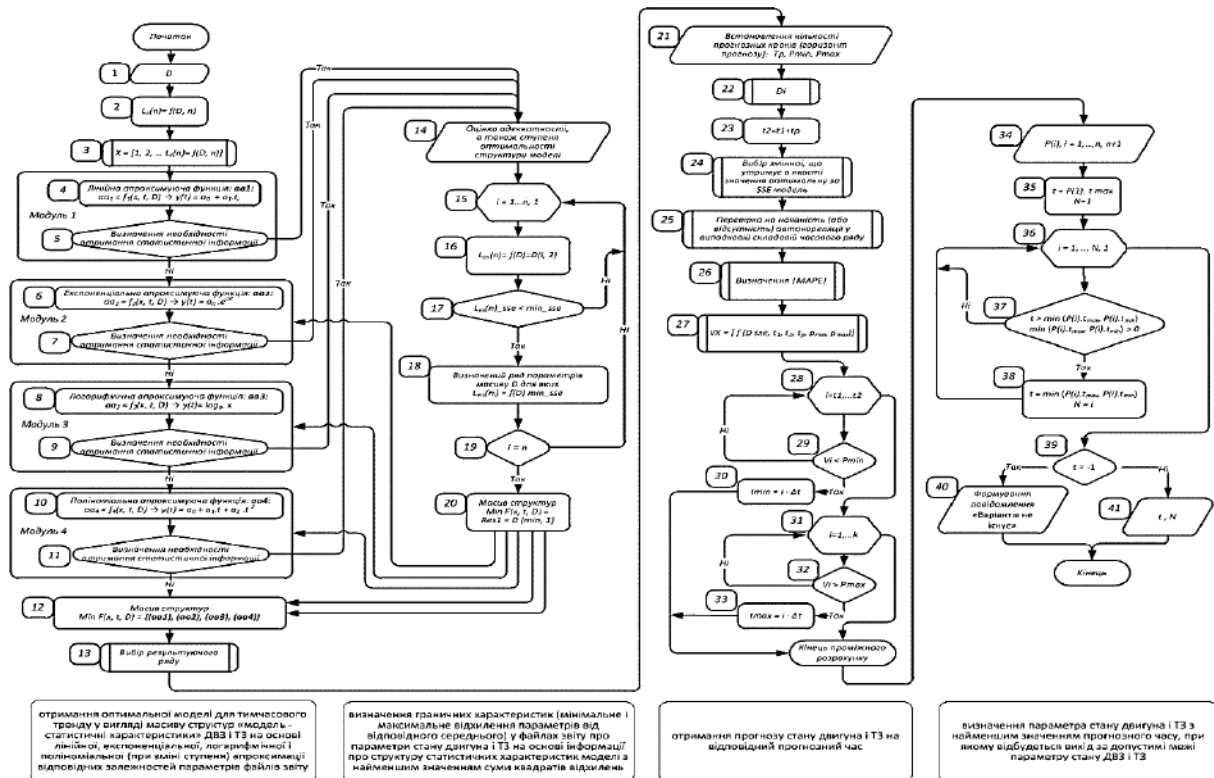


Рис. 3 – Алгоритм інформаційної системи для оцінювання способів забезпечення системних властивостей транспортних засобів з можливостями прогнозування їх технічного стану в умовах експлуатації

У блоці 5 проводиться визначення необхідності отримання статистичної інформації блоку 4 для формування апроксимуючих моделей експоненціального типу у блоці 6.

Модуль 2 поєднує блок 6 і блок 7 в одне ціле для формування з масивів інформації про параметри технічного стану ТЗ в часі апроксимуючі моделі експоненціального типу у підсистемах і керує можливостями взаємодії її з іншими моделями.

У блоці 6 формуються функції

$$aa_{21} = f_{21}(x_1, t_1, D_1) \rightarrow y_1(t_1) = a_{01}e^{ait_1}, \quad (8)$$

$$aa_{22} = f_{22}(x_2, t_2, D_2) \rightarrow y_2(t_2) = a_{02}e^{ait_2}, \quad (9)$$

які будують апроксимуючі моделі експоненціального типу на основі даних X_1 і X_2 та D_1 і D_2 в часі, що обчислюють в якості результату структури «модель» і структури «статистичні характеристики».

У блоці 7 проводиться визначення необхідності отримання статистичної інформації блоку 6 для формування апроксимуючих моделей логарифмічного типу у блоці 8.

Модуль 3 поєднує блок 8 і блок 9 в одне ціле для формування з масивів інформації про параметри технічного стану ТЗ в часі апроксимуючі моделі логарифмічного типу у підсистемах і керує можливостями взаємодії її з іншими моделями.

У блоці 8 формуються функції

$$aa_{31} = f_{31}(x_1, t_1, D_1) \rightarrow y_1(t_1) = \log_{a_1} x_1, \quad (10)$$

$$aa_{32} = f_{32}(x_2, t_2, D_2) \rightarrow y_2(t_2) = \log_{a_2} x_2, \quad (11)$$

які будують апроксимуючі моделі логарифмічного типу на основі даних X_1 і X_2 та D_1 і D_2 в часі, що обчислюють в якості результату структури «модель» і структури «статистичні характеристики».

У блоці 9 проводиться визначення необхідності отримання статистичної інформації блоку 8 для формування апроксимуючих моделей поліноміального типу у блоці 10.

Модуль 4 поєднує блок 10 і блок 11 в одне ціле для формування з масивів інформації про параметри технічного стану ТЗ в часі апроксимуючі моделі поліноміального типу у підсистемах і керує можливостями взаємодії її з іншими моделями.

У блоці 10 формуються функції

$$aa_{41} = f_{41}(x_1, t_1, D_1) \rightarrow y_1(t_1) = a_{01} + a_{11}t_1 + a_{21}t_1^2, \quad (12)$$

$$aa_{42} = f_{42}(x_2, t_2, D_2) \rightarrow y_2(t_2) = a_{02} + a_{12}t_2 + a_{22}t_2^2, \quad (13)$$

які будують апроксимуючі моделі поліноміального типу на основі даних X_1 і X_2 та D_1 і D_2 в часі, що обчислюють в якості результату структури «модель» і структури «статистичні характеристики».

У блоці 11 проводиться визначення необхідності отримання статистичної інформації блоку 8 для формування масивів структур у блоці 10.

У блоці 12 формуються

$$\min F_1(x_1, t_1, D_1) = (aa_{11}, aa_{21}, aa_{31}, aa_{41}), \quad (14)$$

$$\min F_2(x_2, t_2, D_2) = (aa_{12}, aa_{22}, aa_{32}, aa_{42}), \quad (15)$$

масиви структур «модель – статистичні характеристики», що складаються з чотирьох типів моделей у підсистемах – лінійної, експоненціальної, логарифмічної і поліноміальної, призначених для використання в якості параметрів при виклику функцій з мінімальними значеннями суми квадратів відхилень.

У блоці 13 визначаються змінні результати (результуючі ряди), що містять результати (моделі), що апроксимують вихідні часові ряди D_1 і D_2 , які володіють мінімальними значеннями суми квадратів відхилень – *Sum Squared Error* (SSE_1 і SSE_2), на виході фрагментів розробленого алгоритму.

У блоці 14 на основі отриманої інформації з масивів D_1 і D_2 про параметри технічного стану ТЗ в часі і відповідних апроксимованих залежностей визначаються статистичні характеристики моделей з найменшими значеннями суми квадратів відхилень. В цьому блоці проводиться оцінювання адекватності і точності, а також ступенів оптимальності структур моделей.

Для оцінювання адекватності і точності моделей розраховуємо:

- середньоквадратичні помилки (відхилення) модельних значень і рівнів трендів – *Mean Squared Error*, (MSE):

$$MSE_1 = 1/n_1 \sum_{t_1=1}^{n_1} (Y_{t_1} - F_{t_1})^2 = 1/n_1 \sum_{t_1=1}^{n_1} e_{t_1}^2, \quad (16)$$

$$MSE_2 = 1/n_2 \sum_{t_2=1}^{n_2} (Y_{t_2} - F_{t_2})^2 = 1/n_2 \sum_{t_2=1}^{n_2} e_{t_2}^2, \quad (17)$$

де n_1 і n_2 – довжини часових рядів; Y_{t_1} і Y_{t_2} – фактичні значення рівнів часових рядів в моменти t_1 і t_2 ; F_{t_1} і F_{t_2} – прогнози Y_{t_1} і Y_{t_2} , розрахункові значення рівнів, отримані за відповідними моделями; $e_{t_1} = Y_{t_1} - F_{t_1}$ і $e_{t_2} = Y_{t_2} - F_{t_2}$ – похибки або помилки прогнозу.

- суми квадратів помилок (відхилення) модельних значень і рівнів трендів – *Sum Squared Error*, (SSE):

$$SSE_1 = \sum_{t_1=1}^{n_1} (Y_{t_1} - F_{t_1})^2 = 1/n_1 \sum_{t_1=1}^{n_1} e_{t_1}^2, \quad (18)$$

$$SSE_2 = \sum_{t_2=1}^{n_2} (Y_{t_2} - F_{t_2})^2 = 1/n_2 \sum_{t_2=1}^{n_2} e_{t_2}^2. \quad (19)$$

Представлені критерії використовуються при виборі оптимальних моделей прогнозування в пакетах прикладних програм з прогнозування [9, 10]. Кожне зі значень помилок прогнозу в критеріях (15) і (17) та (18) і (19) зводиться в квадрат, що підкреслює великі помилки прогнозу, на відміну від середніх абсолютних відхилень – *Mean Absolute Derivation*, (MAD_1 і MAD_2). Описана особливість дуже важлива тому, що моделі прогнозування постійно дають середні за величиною помилки (відхилення), в деяких випадках це може бути переважніше інших моделей, що мають малі помилки, але періодично дають неприйнятні за абсолютними величинами відхилення.

- для порівняння якості моделей прогнозування різномірних технічних об'єктів, коли оцінки помилок саме в абсолютних величинах неприйнятні або викликають труднощі з

інтерпретацією отриманих результатів, найкраще перейти до оцінки помилок у відсотках [9, 10]. Для цього використовуємо середні абсолютні помилки у відсотках – *Mean Absolute Percentage Error*, (*MAPE* і *MAPE*), що обчислюються за рівняннями, відповідно для підсистем:

$$MAPE_1 = 1/n_1 \sum_{t_1=1}^{n_1} \frac{|Y_{t_1} - F_{t_1}|}{Y_{t_1}} \cdot 100 = 1/n_1 \sum_{t_1=1}^{n_1} \frac{|e_{t_1}|}{Y_{t_1}} \cdot 100 \quad (20)$$

$$MAPE_2 = 1/n_2 \sum_{t_2=1}^{n_2} \frac{|Y_{t_2} - F_{t_2}|}{Y_{t_2}} \cdot 100 = 1/n_2 \sum_{t_2=1}^{n_2} \frac{|e_{t_2}|}{Y_{t_2}} \cdot 100 \quad (21)$$

Наведені показники характеризують наскільки великі помилки прогнозів у порівнянні з дійсними значеннями рядів. Особливістю критеріїв *MAPE*₁ і *MAPE*₂ є те, що вони не підходять для часових рядів з нульовими членами. Проте, в роботах [9, 10] рекомендують у таких випадках пропускати нульові елементи рядів і зменшувати значення *n*₁ і *n*₂, відповідно, на одиницю.

Стандартні похибки середнього, що характеризують стандартні відхилення вибіркового середнього, що розраховані за вибірками розмірів *n*₁ і *n*₂ із генеральних сукупностей:

$$SD_1 = \sigma_1 / \sqrt{n_1}, \quad (22)$$

$$SD_2 = \sigma_2 / \sqrt{n_2}, \quad (23)$$

де $\sigma_1 = \sqrt{1/n_1 \sum_{t_1=1}^{n_1} (Y_{t_1} - F_{t_1})^2}$ і $\sigma_2 = \sqrt{1/n_2 \sum_{t_2=1}^{n_2} (Y_{t_2} - F_{t_2})^2}$ – величини середньоквадратичних відхилень.

- з метою визначення адекватних моделей прогнозування застосовують коефіцієнти не співпадіння Тейла [9, 10], які розраховуються за рівняннями:

$$U_1 = \sqrt{\sum_{t_1=1}^{n_1} (F_{t_1} - Y_{t_1})^2} / \left(\sqrt{\sum_{t_1=1}^{n_1} F_{t_1}^2} + \sqrt{\sum_{t_1=1}^{n_1} Y_{t_1}^2} \right), \quad (24)$$

$$U_2 = \sqrt{\sum_{t_2=1}^{n_2} (F_{t_2} - Y_{t_2})^2} / \left(\sqrt{\sum_{t_2=1}^{n_2} F_{t_2}^2} + \sqrt{\sum_{t_2=1}^{n_2} Y_{t_2}^2} \right), \quad (25)$$

Якщо коефіцієнт дорівнює нулю, то прогноз точний, а якщо значення, дорівнює одиниці, то прогноз неадекватний.

- іншими показниками адекватності моделей можуть служити коефіцієнти детермінації (КД або *R*₁² і *R*₂²) [9, 10], які розраховуються за рівняннями:

$$R_1^2 = 1 - \left(\frac{SSE_1}{\sum_{t_1=1}^{n_1} (Y_{t_1} - \bar{Y}_1)^2} \right), \quad (26)$$

$$R_2^2 = 1 - \left(\frac{SSE_2}{\sum_{t_2=1}^{n_2} (Y_{t_2} - \bar{Y}_2)^2} \right), \quad (27)$$

де \bar{Y}_1 і \bar{Y}_2 – середні значення фактичних значень рівнів часових рядів.

Чим ближче у виразах (26) і (27) значення *R*₁² і *R*₂² до одиниці, тим краще моделі описують реальні дані. На практиці прийнято вважати [9, 10] модель адекватною, якщо *R*₁² і *R*₂² > 0,75.

До недоліків даних критеріїв, а також попередньо представлених коефіцієнтів (15)-(27) можливо віднести те, що їх значення тим більше свідчать про покращення точності моделі, чим більше нових параметрів включаються в моделі, хоча це й не обов'язково означає покращення якості моделей.

Для оцінювання ступенів оптимальності структур моделей розраховуємо:

- скориговані коефіцієнти детермінації (СКД або *R*_{adj1}² і *R*_{adj2}²) [9, 10], які визначаються за формулами:

$$R_{adj1}^2 = 1 - (1 - R_1^2) (n_1 - 1) / (n_1 - r_1 - 1), \quad (28)$$

$$R_{adj2}^2 = 1 - (1 - R_2^2) (n_2 - 1) / (n_2 - r_2 - 1) \quad (29)$$

де *r*₁ і *r*₂ – кількості параметрів моделей.

СКД або *R*_{adj1}² і *R*_{adj2}² побудовані таким чином, що додавання нових параметрів в моделі призводить до зниження його значення – штрафується [9, 10]. Ця особливість вигідно відрізняє СКД або *R*_{adj1}² і *R*_{adj2}² від попередньо представлених критеріїв (15)-(27), які фокусують увагу на величинах відхилень прогнозів від реальних даних і не враховують ступінь оптимальності структури побудованих моделей. На принципах штрафів за додаткові параметри в моделях побудовані критерії Маллоуза, Акаїке і Шварца [9, 10].

- критерій Маллоуза:

$$C_{p1} = SSE_1 / \sum_{i_1=1}^{n_1} (Y_{t1} - \bar{Y}_1)^2 - 2(r_1 + 1)/n_1 - r_1 - 1. \quad (30)$$

$$C_{p2} = SSE_2 / \sum_{i_2=1}^{n_2} (Y_{t2} - \bar{Y}_2)^2 - 2(r_2 + 1)/n_2 - r_2 - 1. \quad (31)$$

- інформаційний критерій Акаїке:

$$AIC_1 = \ln(MCE_1) + 2(r_1 + 1)/n_1. \quad (32)$$

$$AIC_2 = \ln(MCE_2) + 2(r_2 + 1)/n_2. \quad (33)$$

- Байєсівський інформаційний критерій (критерій Шварца):

$$BIC_1 = \ln(MCE_1) + (r_1 + 1) \ln n_1/n_1. \quad (34)$$

$$BIC_2 = \ln(MCE_2) + (r_2 + 1) \ln n_2/n_2. \quad (35)$$

Моделі прогнозування вважаються тим краще, чим нижче показник C_{p1} і C_{p2} , AIC_1 і AIC_2 , BIC_1 і BIC_2 . На наведені критерії позитивно впливає зменшення залишкової дисперсії і негативно впливає саме кількість включених до оцінювання параметрів. Основною відмінністю між ними є ступінь жорсткості, тобто наскільки великий штраф надається за велику кількість параметрів в моделі [9, 10]. Критерії C_{p1} і C_{p2} та AIC_1 і AIC_2 , при великих n_1 і n_2 сильно корелюють між собою. Однак C_{p1} і C_{p2} дещо жорсткіший за AIC_1 і AIC_2 , особливо при малих n_1 і n_2 . BIC_1 і BIC_2 є найбільш жорсткими критеріями, причому, як можливо побачити з наведених формул (34 і 35), на відміну від інших критеріїв, його жорсткість зростає зі зростанням n_1 і n_2 . Різниця в жорсткості виникає з відмінностей у запропонованих вимогах до моделей прогнозування. Критерії C_{p1} і C_{p2} та AIC_1 і AIC_2 спрямовані на досягнення високих за точністю прогнозів: C_{p1} і C_{p2} спрямовані на мінімізацію дисперсій помилок прогнозів, а AIC_1 і AIC_2 – на мінімізацію розбіжностей між щільністю розподілів за істинними і обраними моделями. В основі критеріїв BIC_1 і BIC_2 лежать вимоги максимізації ймовірності виборів істинних моделей [9, 10].

Крім того, слід зазначити істотний недолік критерію Акаїке, що складається з переоцінки істинної кількості параметрів у моделі [9, 10]. У свою чергу критерій Маллоуза застосовується тільки при нормальному розподілі залишків [9, 10].

При порівнянні моделей прогнозування важливо враховувати, що якщо різні моделі використовують різні функціональні форми, то не можливо безпосередньо порівнювати КД або R_1^2 і R_2^2 , СКД або R_{adj1}^2 і R_{adj2}^2 або значення критеріїв (15)-(27). Наприклад, неможливо порівняти ці статистичні оцінки для лінійних і логарифмічних варіантів моделей.

Значення, що одержуються за логарифмічними моделями значно менші відповідних значень лінійних моделей, тому і залишки значно менші. Величини КД або R_1^2 і R_2^2 безрозмірні, проте в двох рівняннях вони відносяться до різних статистичних понять. В одному рівнянні вони вимірюють, пояснену моделлю, частку дисперсії залежної змінної, а в іншому – дисперсії логарифма залежної змінної. Для порівнянності значень критеріїв, у відповідності до положень робіт [9, 10], доцільно застосування процедури Бокса-Кокса [9, 10]. Дана процедура передбачає перетворення масштабу спостережень саме залежної змінної, при якому забезпечувалась би можливість безпосереднього порівняння саме суми квадратів відхилень.

У блоці 15 формуються змінні i_1 і i_2 , лічильник циклу з відповідними параметрами ($i_1 = 1...n_1, 1$) і ($i_2 = 1...n_2, 1$), а в блоці 16 формуються змінні (функції):

$$L_{en1}(n_1) = f_1(D_1) = D_1(i_1, 2), \quad (36)$$

$$L_{en2}(n_2) = f_2(D_2) = D_2(i_2, 2), \quad (37)$$

що базуються на значеннях поточних характеристик моделей при переборі масивів D_1 і D_2 .

У блоці 17 відбувається порівняння сум квадратів помилок (відхилень) модельних значень і рівнів трендів SSE_1 і SSE_2 при переборі змінних масивів D_1 і D_2 зі змінними, що мають мінімальні значення SSE_1 і SSE_2 :

$$L_{en1}(n_1)sse_1 < \min sse_1, \quad (38)$$

$$L_{en2}(n_2)sse_2 < \min sse_2. \quad (39)$$

Якщо умови в блоці 17 не виконуються, то перевірка умов продовжується для наступних значень в блоці 15.

У блоці 18 виділяються ряд параметрів масивів D_1 і D_2 для яких:

$$L_{eni1}(n_{i1}) = f_1(D_1) \min sse_1, \quad (40)$$

$$L_{eni2}(n_{i2}) = f_2(D_2) \min sse_2, \quad (41)$$

(визначаються змінні (функції) для заданих параметрів моделей за відповідними їх дослідженнями), що базуються на значеннях поточних характеристик моделей при переборі масивів D_1 і D_2 і перевірки масивів відбуваються знову для отримання необхідного значення.

В блоці 19 проводиться перевірки щодо наявності наступних присвоєних відповідних значень параметрів моделей при переборі масивів – i_{n1} і i_{n2} , лічильників циклів з відповідними параметрами ($i_1 = 1...n_1, I$) і ($i_2 = 1...n_2, I$). Якщо ряди масивів вичерпані, результати статистичної обробки передаються в блок 20, де формуються масиви структур а потім – в блок 12.

$$\min F_1(x_1, t_1, D_1) = Res_1 I = D_1(\min_1, I \text{ для відповідного тренду}), \quad (42)$$

$$\min F_2(x_2, t_2, D_2) = Res_2 I = D_2(\min_2, I \text{ для відповідного тренду}). \quad (43)$$

В блоці 21 задаються і програмно визначаються прогнозні кроки (горизонти прогнозу): мінімальні і максимальні значення параметрів, що контролюються, тобто $T_{p1}, P_{min1}, P_{max1}$ і $T_{p2}, P_{min2}, P_{max2}$, де T_{p1} і T_{p2} – змінні, що включають значення кількості прогнозних кроків (горизонти прогнозу); P_{min1} і P_{min2} – мінімальні значення, а P_{max1} і P_{max2} – максимальні значення параметрів, що контролюються.

В блоці 22 з блоку 13 вибираються часові ряди D_1 і D_2 , які включають значення контрольованих параметрів на допрогнозованому етапі.

В блоці 23 визначаються ліві t_{11} і t_{12} та праві t_{21} і t_{22} граничні значення інтервалів прогнозування.

В блоці 24 проводяться вибори змінних, що утримують в якості значень оптимальні за SSE_1 і SSE_2 моделі.

В блоці 25 проводиться перевірка на наявність (або відсутність) автокореляції у випадкових складових часових рядів, при цьому розраховані функції можуть мати значення - 1, 0, 1, які сигналізують про наявність означених фактів [9, 10].

Якщо вид функції, яка описує систематичну складову, обраний невдало, то послідовні значення ряду залишків можуть не мати властивості незалежності, тому вони можуть корелювати між собою. У цьому випадку має місце автокореляція помилок. Існує кілька прийомів виявлення автокореляції. Найбільш поширеним є метод, запропонований Дарбіном і Уотсоном [9, 10]. Критерій Дарбіна-Уотсона, що пов'язаний з гіпотезою про існування автокореляції першого порядку, тобто системної автокореляції між сусідніми залишковими членами дослідного ряду. Значення цього критерію оцінюється за формулою [9, 10]:

$$d_1 = \frac{\sum_{t_1=2}^{n_1} (e_{t_1} - e_{t_1-1})^2}{\sum_{t_1=1}^{n_1} e_{t_1}^2} \quad (44)$$

$$d_2 = \frac{\sum_{t_2=2}^{n_2} (e_{t_2} - e_{t_2-1})^2}{\sum_{t_2=1}^{n_2} e_{t_2}^2} \quad (45)$$

В блоці 26 розраховується за формулою (13) середня відносна помилка за модулем – Mean Absolute Percentage Error ($MAPE$) для змінних, що утримують в якості значень оптимальних за SSE_1 і SSE_2 моделі і часових рядів D_1 і D_2 , які включають значення контрольованих параметрів на допрогнозованому етапі:

$$|MAPE|_1 = |\bar{\delta}|_1 = \frac{1}{n_1} \sum_{t_1=1}^{n_1} \left| \frac{\hat{y}_{t_1} - y_{t_1}}{y_{t_1}} \right| \cdot 100\%, \quad (46)$$

$$|MAPE|_2 = |\bar{\delta}|_2 = \frac{1}{n_2} \sum_{t_2=1}^{n_2} \left| \frac{\hat{y}_{t_2} - y_{t_2}}{y_{t_2}} \right| \cdot 100\%, \quad (47)$$

де n_{i1} і n_{i2} – кількість рівнів часових рядів, для яких визначались прогнозні значення.

Характеристики $MAPE$ достатньо широко використовуються для порівняння точності прогнозування різномірних об'єктів прогнозу. При цьому зустрічаються вказівки на те, що значення $|\bar{\delta}| < 10\%$ свідчить про високу точність моделі, при значеннях вказаної характеристики саме в діапазоні 10-20% точності можна визнати хорошою, при $20\% < |\bar{\delta}| < 50\%$ – задовільною.

В блоці 27 формуються вектори прогнозних значень

$$VX_1 = [f_1(D_1 sse_1, t_{11}, t_{21}, t_{p1}, p_{min1}, p_{max1})], \quad (48)$$

$$VX_2 = [f_2(D_2 sse_2, t_{12}, t_{22}, t_{p2}, p_{min2}, p_{max2})]. \quad (49)$$

В блоці 28 вводяться (формулюються) i_1 і i_2 – змінні для прогнозуючого алгоритму для P_{min1} і P_{min2} – лічильники циклу з відповідними параметрами.

В блоці 29 проводиться перевірка $V_{i1} < P_{min1}$ і $V_{i2} < P_{min2}$ прогнозуючих векторів для P_{min1} і P_{min2} . Якщо умови виконуються, то подальші розрахунки проводяться в блоці 30. Якщо умови не

виконуються, то перевірка рядів проводиться в блоці 28 (перевірка визначених значень для відповідних значень i_1 і i_2).

В блоці 30 розраховуються t_{min1} і t_{min2} – прогнозний час виходу за межі мінімальних значень параметрів.

В блоці 31 вводяться (формується) i_1 і i_2 – змінні для прогнозуючого алгоритму для P_{max1} і P_{max2} – лічильники циклу з відповідними параметрами.

В блоці 32 проводиться перевірка $V_{i1} > P_{max1}$ і $V_{i2} > P_{max2}$ прогнозуючих векторів для P_{max1} і P_{max2} . Якщо умови виконуються, то подальші розрахунки проводяться в блоці 33. Якщо умови не виконуються, то перевірки рядів проводяться в блоці 31 (перевірка визначених значень для відповідних значень i_1 і i_2).

В блоці 33 розраховуються t_{max1} і t_{max2} – прогнозний час виходу за межі максимальних значень параметрів.

Наприкінці розрахунку одержуємо можливість отримання прогнозу технічних параметрів стану ТЗ на відповідний період прогнозу – інтервалі упередження. Якщо виникає потреба у визначенні параметрів стану ТЗ з найменшими значеннями часу прогнозу, саме при якому відбудеться вихід за допустимі обмеження параметрів технічного стану, то розрахунок продовжується, починаючи з блоку 34.

В блоці 34 формуються масиви структур даних про прогнозування і параметрів $P_1(i_1)$ і $P_2(i_2)$, що складаються з двох записів (t_{max1}, t_{min1}) і (t_{max2}, t_{min2}) , де t_{max1} і t_{max2} – номери періодів прогнозування, на яких відбувається вихід за межі максимально допустимих значень i -параметрів і t_{min1} і t_{min2} – номери періодів прогнозування, на яких відбувається вихід за межі мінімального допустимих значень i -параметрів. У випадку, якщо відсутній вихід значень за допустимі межі, відповідні поля містять значення -1.

У блоці 35 визначаються мінімальні значення періодів t_1 і t_2 , на яких відбуваються виходи за допустимі значення параметрів і формуються номери параметрів N_1 і N_2 з мінімальними значеннями періодів виходу за допустимі значення досліджуваних параметрів технічного стану.

У блоці 36 вводяться додаткові змінні – лічильники циклів i_1 і i_2 та відбуваються їх зміни.

В блоці 37 проводяться перевірки знаходження параметрів мінімальних значень часу в інтервалі від t_1 і t_2 до 0 за допомогою функції \min , що розраховує одночасно мінімум двох значень. Перевірка проводиться одночасно для

$$t_1 > \min(P_1(i_1) \cdot t_{max1}, P_1(i_1) \cdot t_{min1}) \text{ і для } \min(P_1(i_1) \cdot t_{max1}, P_1(i_1) \cdot t_{min1}) > 0, \quad (50)$$

$$t_2 > \min(P_2(i_2) \cdot t_{max2}, P_2(i_2) \cdot t_{min2}) \text{ і для } \min(P_2(i_2) \cdot t_{max2}, P_2(i_2) \cdot t_{min2}) > 0. \quad (51)$$

Якщо результати перевірки не задовольняють умовам блоку – проводиться зміна змінних – лічильників циклів i_1 і i_2 в блоці 37. Якщо виконується – подальший розрахунок відбувається в блоці 38, де розраховуються значення мінімальних значень часу за допомогою функції \min , що розраховує одночасно мінімум двох значень для i -х номерів параметрів N_1 і N_2 з мінімальними значеннями періоду виходу за допустимі значення досліджуваних параметрів. Розрахунок проводиться одночасно для

$$t_1 = \min(P_1(i_1) \cdot t_{max1}, P_1(i_1) \cdot t_{min1}) \text{ при } N_1 = i, \quad (52)$$

$$t_2 = \min(P_2(i_2) \cdot t_{max2}, P_2(i_2) \cdot t_{min2}) \text{ при } N_2 = i. \quad (53)$$

В блоці 39 проводиться перевірка для випадку, якщо відсутній вихід значень за допустимі межі і відповідні поля містять значення $t_1 = t_2 = -1$. Якщо умови виконуються, в блоці 40 програма видає повідомлення про той факт, що варіантів не існує. Якщо виконуються, то в блоці 41 формуються (наводяться) відповідно мінімальних значень часу t_1 і t_2 , і номери параметрів N_1 і N_2 з мінімальними значеннями періоду виходу за допустимі значення досліджуваних параметрів.

Висновки

У результаті проведеного дослідження можна зробити кілька важливих висновків щодо алгоритмів моніторингу показників експлуатації транспортних засобів.

1. Аналіз показав, що багато з існуючих алгоритмів моніторингу досить ефективні, проте є простір для вдосконалення у виявленні певних видів несправностей та прогнозуванні їхнього виникнення.

2. Визначено, що різні фактори, такі як умови експлуатації, навантаження, робочі характеристики транспортних засобів та інші, мають великий вплив на їхній технічний стан.

3. Розроблено і сформовано інформаційну систему оцінювання способів забезпечення системних властивостей ТЗ, що здійснює моніторинг параметрів технічного стану, діагностування і можливість прогнозувати їх технічний стан в умовах експлуатації.

4. Розроблена на основі бортового комплексу ITS загальна структура систем моніторингу ТЗ та інформаційної взаємодії між елементами ITS в процесах моніторингу параметрів стану.

5. Розроблені: алгоритм процесу збору даних про технічний стан ТЗ та інформаційної системи моніторингу, процесу діагностування стану і визначення статусу несправностей у складі розробленої інформаційної системи, а також алгоритм прогнозування значень контрольованих параметрів стану в умовах експлуатації.

6. Впровадження передових алгоритмів моніторингу може значно підвищити ефективність та безпеку експлуатації транспортних засобів, що стане важливим кроком у розвитку сучасних транспортних систем.

Загалом, результати дослідження свідчать про значний потенціал у вдосконаленні алгоритмів моніторингу показників експлуатації транспортних засобів, що сприятиме підвищенню їхньої ефективності та безпеки.

Перелік використаних джерел:

1. Josh S.S., Maas N., Schramm D. A vehicle dynamics based algorithm for driver evaluation. *Proceedings of 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, Coimbatore, India, 05-06 January 2017. Pp. 40-44. DOI: <https://doi.org/10.1109/isco.2017.7856028>.
2. The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact / I. Kuric, V. Mateichyk, M. Śmieszek, M. Tsiuman, N. Goridko, I. Gritsuk. *MATEC Web of Conferences*, 2018. Vol. 244. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403003>.
3. Vehicle and driver monitoring system using On-Board and remote sensors / A.E. Campos-Ferreira, J. De J. Lozoya-Santos, J.C. Tudón-Martínez, R.A. Ramírez-Mendoza, A.H. Martínez, R. Morales-Menéndez, D. Lozano. *Sensors*. 2023. Vol. 23(2). Pp. 1-30. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23020814>.
4. Tang Y. Monitoring algorithm for speed information of autonomous vehicles based on magnetoresistive sensor. *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*. 2020. Vol. 14. Number 1. Pp. 43-52.
5. Performance evaluation of vehicle-based mobile sensor networks for traffic monitoring / X. Li, W. Shu, M. Li, H. Huang, P. Luo, M. Wu. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2009. Vol. 58(4). Pp. 1647-1653. DOI: <https://doi.org/10.1109/tvt.2008.2005775>.
6. Moon H.S., Chellappa R., Rosenfeld A. Performance analysis of a simple vehicle detection algorithm. *Image and Vision Computing*. 2002. Vol. 20(1). Pp. 1-13. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0262-8856\(01\)00059-2](https://doi.org/10.1016/s0262-8856(01)00059-2).
7. Driver monitoring algorithm for advanced vehicle safety assistance system / A. Karthikeyan, R. Mythili, S. Prasanna, C. Naveen, P. Kg. *Proceedings of 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, Coimbatore, India, 06-07 March 2020. Pp. 332-335. DOI: <https://doi.org/10.1109/icaccs48705.2020.9074409>.
8. Stämpfle M., Holz D.E., Becker J.C. Performance evaluation of automotive sensor data fusion. *Proceedings of 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems*, Vienna, Austria, 16 September 2005. Pp. 50-55. DOI: <https://doi.org/10.1109/itsc.2005.1520114>.
9. Cognitive model of the internal combustion engine / V. Vychuzhanin et al. *SAE Technical Paper*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
10. Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів / В.П. Матейчик, В.П. Волков, П.Б. Комов, І.В. Грицук, А.П. Комов, Ю.В. Волков. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2014. Вип. 13. С. 126-138.

References:

1. S.S. Joshi, N. Maas, and D. Schramm, «A vehicle dynamics based algorithm for driver evaluation», in *Proceedings of 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, Coimbatore, India, 2017, pp. 40-44. doi: **10.1109/isco.2017.7856028**.
2. I. Kuric, V. Mateichyk, M. Śmieszek, M. Tsiuman, N. Goridko, and I. Gritsuk, «The peculiarities

- of monitoring road vehicle performance and environmental impact», *MATEC Web of Conferences*, vol. 244, pp. 1-7, 2018. doi: [10.1051/mateconf/201824403003](https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403003).
3. A.E. Campos-Ferreira et al., «Vehicle and driver monitoring system using On-Board and remote sensors», *Sensors*, vol. 23(2), pp. 1-30, 2023. doi: [10.3390/s23020814](https://doi.org/10.3390/s23020814).
 4. Y. Tang, «Monitoring Algorithm for Speed Information of Autonomous Vehicles Based on Magnetoresistive Sensor», *Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, vol. 14, № 1, pp. 43-52, 2020.
 5. X. Li, W. Shu, M. Li, H. Huang, P. Luo, and M. Wu, «Performance Evaluation of Vehicle-Based mobile sensor networks for traffic monitoring», *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58(4), pp. 1647-1653, 2009. doi: [10.1109/tvt.2008.2005775](https://doi.org/10.1109/tvt.2008.2005775).
 6. H.S. Moon, R. Chellappa, and A. Rosenfeld, «Performance analysis of a simple vehicle detection algorithm», *Image and Vision Computing*, vol. 20(1), pp. 1-13, 2020. doi: [10.1016/s0262-8856\(01\)00059-2](https://doi.org/10.1016/s0262-8856(01)00059-2).
 7. A. Karthikeyan, R. Mythili, S. Prasanna, C. Naveen, and P. Kg, «Driver Monitoring Algorithm for Advanced Vehicle Safety Assistance System», in Proceedings of 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), Coimbatore, India, 2020, pp. 332-335. doi: [10.1109/icaccs48705.2020.9074409](https://doi.org/10.1109/icaccs48705.2020.9074409).
 8. M. Stämpfle, D.E. Holz, and J.C. Becker, «Performance evaluation of automotive sensor data fusion», in Proceedings of 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems, Vienna, Austria, 2005, pp. 50-55. doi: [10.1109/itsc.2005.1520114](https://doi.org/10.1109/itsc.2005.1520114).
 9. V. Vychuzhanin et al., «Cognitive Model of the Internal Combustion Engine», *SAE Technical Paper*, 2018. doi: [10.4271/2018-01-1738](https://doi.org/10.4271/2018-01-1738).
 10. V.P. Mateichyk, V.P. Volkov, P.B. Komov, I.V. Gritsuk, A.P. Komov, and Ju. V. Volkov, «Osoblyvosti monitorynhu stanu transportnykh zasobiv z vykorystanniam bortovykh diahnostychnykh kompleksiv» [«Features of monitoring of vehicles state with using of board diagnostic complexes»], *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka – Project management, system analysis and logistics*, № 13, pp. 126-138, 2014. (Ukr.)

Рецензент: І.П. Гончарук
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 12.02.2023

Стаття прийнята 14.04.2023

УДК 629.5:656.6

doi: [10.31498/2225-6733.47.2023.300119](https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300119)

© Петровський А.В.¹, Ісайчев А.Г.², Злобін Ю.О.³

ЗАСАДИ РОЗРАХУВАННЯ ТА НАЛАГОДЖЕННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПЕЧНИХ ГЛИБИН ПРИ ПЛАНУВАННІ МАРШРУТУ

У статті розглянуті питання налагодження SENC щодо попередньої прокладки з урахуванням використання різних додаткових накладань: NavTex, АІО, погодних карт. Показані причини та наслідки відсутності глибинного розуміння параметрів безпеки щодо навігаційних глибин для прокладки маршруту. Запропоновано один з варіантів моделі розрахування контуру безпеки Safety Contour та УКС, а також

¹ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: [0000-0002-3337-9577](https://orcid.org/0000-0002-3337-9577), andrevanybody@gmail.com

² капітан далекого плавання, ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: [0009-0005-3490-2111](https://orcid.org/0009-0005-3490-2111), falcongleb@ukr.net

³ капітан далекого плавання, інструктор, Херсонський морський спеціалізований тренажерний центр, м. Херсон, ORCID: [0009-0002-7202-0206](https://orcid.org/0009-0002-7202-0206)

особливості використання параметру *Safety Depth*. Надані особливості використання *XTD* та *LDL*.

Ключові слова: *ECDIS, Safety Contour, Safety Depth, UKC, XTD, LDL*.

A.V. Petrovskyi, A.G. Isaychev, Y.O. Zlobin. On the issue of adjustment and calculation of navigation depth parameters during route creating. *The calculation of the values of navigation depths when planning the preliminary route has a strong influence even on the choice of one or another route, and changing weather conditions sometimes lead to its replacement with an alternative during the execution of the route, which adds to the risk of unexpected situations and the need to solve them in a short time frame. Also, determining the appropriate SENC settings for pre-laying, understanding the essence of the calculated safety parameters regarding navigation depths on ECDIS charts and the accepted values of ECDIS remain relevant due to the large number of involved ECDIS interfaces of different developers. The article deals with the issue of setting up SENC in relation to the previous layout, taking into account the use of various additional overlays: NavTex, AIO, weather maps. The necessity of using text signatures of vector objects, which were previously ignored due to blind trust in vectorization of maps, is shown. The article provides an in-depth interpretation of such vector objects as IDS, which do not change their own scale when changing the scale of the map. The given examples of erroneous interpretation of the Category Zone of Confidence showed the need for additional clarification of the essence of confidence zones and the specifics of using such errors when planning routes. Since the formulas for calculating the values of both UKC (under keel clearance) and Safety Contour have only recommended rules, the article provides information on the use of parameters in these formulas, as well as their interpretation by ECDIS software. The reasons and consequences of the lack of in-depth understanding of safety parameters regarding navigational depths for the route are shown. One of the variants of the Safety Contour and UKC calculation model is proposed, as well as the features of using the Safety Depth parameter. Specifics of using XTD and LDL are given.*

Key words: *ECDIS, Safety Contour, Safety Depth, UKC, XTD, LDL*.

Постановка проблеми. Сучасні системи надання інтегрованої навігаційної інформації, ECDIS (electronic chart display and information system), міцно тримають позиції головних систем навігаційного мостика на судні. Векторні карти, які дозволяють оперувати масштабуванням (у розумних межах), надають багатошарову кількість інформації з можливістю керувати кількістю її відображення. Програмне забезпечення, оперуючи такою складною картою та вирішуючи в автоматичному режимі багато рутинних задач штурмана, вселяють впевненість у повноту відображеної інформації і точність інструментарію функціоналу ECDIS. Однак сучасність інформаційних автоматизованих систем має і деякі проблеми. По-перше, велика кількість виробників ECDIS надає забагато варіантів інтерфейсів власного програмного забезпечення, і, хоча деякі стандарти все ж таки вдається втілити у всі ІМО-сертифіковані ECDIS, персоналу доводиться проходити перенавчання щодо використання тої чи іншої версії програмного забезпечення. На це втрачаються суттєві кошти судноплавних компаній і час перенавчання відповідальних за роботу з ECDIS офіцерів мостика. По-друге, зростає складність інтерфейсу внаслідок збільшення функціоналу програмного забезпечення та, як наслідок, збільшується кількість помилок (Malfunction of ECDIS), умови виникнення яких можливо визначити лише протягом виконавчої прокладки. По-третє, складність програмного забезпечення, а також не завжди однозначне тлумачення тих чи інших параметрів, приводять до збільшення вимог до штурманів.

Розрахування значень навігаційних глибин при плануванні попередньої прокладки дуже сильно впливає навіть на вибір того чи іншого маршруту, а змінні погодні умови іноді – його заміни на альтернативний протягом виконавчої прокладки, що додає ризику виникнення несподіваних ситуацій і необхідності їх вирішення за стисли часові терміни. Оскільки формули розрахунку значень і UKC (under keel clearance), і Safety Contour мають лише рекомендований характер, то потрібне не тільки глибоке розуміння використання того чи іншого параметра у цих формулах, а також знань з використання їх саме програмним забезпеченням ECDIS.

Що стосується налаштувань при використанні XTD на маршруті, теж не всі розуміють, що вони не можуть бути постійними протягом всього маршруту внаслідок зміни навігаційних об'єктів, обмежень по глибинах для конкретного судна та ін.

Звісно все це не сприяє підвищенню безпеки судноплавства і потребує систематизації.

Метою роботи є визначення відповідних налаштувань SENC для попередньої прокладки, надання суті розрахованих параметрів безпеки щодо навігаційних глибин на картах ECDIS та прийнятими значеннями ECDIS.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні дослідження аварій [1] при використанні саме таких сучасних систем, як ECDIS, наводять на думку про недосвідченість штурманів стосовно функціоналу ECDIS щодо підвищення безпеки.

Сприяючі фактори, визначені в звітах МАІВ (Marine Accident Investigation Branch) [1] протягом розслідування, включали у тому числі:

- налаштування контуру безпеки та безпечної глибини, що не відповідають вимогам УКС;
- XTD (cross track distance) є ширшим за судноплавний канал;
- наявність та неточність ЕНК;
- недостатнє знання системи;
- деякі штурмани не знали, що CATZOC (Category zone of confidence) застосовуються лише до батиметрії (глибини, контури, занурені скелі та рифи тощо), а не до таких функцій, як буї, причали та схеми поділу руху (TSS).

Додатковим підтвердженням проблеми з тлумаченням CATZOC є посадка на мілину Nova Cira у квітні 2016 року [2, 3]: не були використані властивості CATZOC, тому судно сіло на риф, який по карті був на 0.2 м.м. північніше, ніж у реальності.

Публікація стандартів S-52 Presentation Library 4.0, S-67 [4] звісно надає додаткову інформацію про застосування CATZOC. Однак без розуміння особливостей CATZOC та його визначення у різних місцях карти ENC навіть сучасні стандарти побудови електронних карт не здатні на 100% сприяти безпечному судноплавству. Додатковим джерелом отримання віри у точність ENC є векторизація старих паперових карт. У деяких штурманів складається враження: оцифрована – значить сучасна, у тому числі й що стосується вимірів глибин, ізобат та IDS (Isolated danger symbol). Таке припущення підтверджується також аналізом від МАІВ [1]:

«Коли гідрографічні служби перетворюють дуже старі морські карти в ENC, вони, як правило, не звертають уваги на питання практичності та очікування користувачів щодо відносно нової системи, такої як ECDIS. Перетворюючи старі паперові морські карти в ENC, гідрографічні служби ненавмисно сприяють помилковому припущенню користувачів, що інформація є актуальною.»

Виклад основного матеріалу.

Велика кількість інформації, що необхідна для попередньої прокладки, зумовлює відповідне розуміння та ознайомлення з причинами аварій, причиною яких може бути недостовірна інформація карти, наприклад, об'єкт не був векторизований (рис. 1).

Приклад (рис. 1) надає інформацію щодо необхідності візуального контролю при здійсненні перевірки маршруту, не залишаючи все на роздум ECDIS, оскільки в даному випадку точковий об'єкт Land danger не був векторизований, тому не мав власні геокоординати, в наслідок чого ECDIS просто не «бачить» його, але є підпис такої небезпеки і візуальний контроль надасть можливість сумніватися штурману: не може бути у відкритому морі підпис без ніякої прив'язки до об'єкту. У цьому випадку достатньо змінити або інформаційне навантаження SENC, або змінити масштаб, щоб з'ясувати вид небезпеки.

Можна зробити висновки, що увімкнення підписів векторних об'єктів дозволить запобігти таким негараздам. Наприклад у NaviSailor 4000 (в залежності від комплектації) за це відповідає параметр Names, Buoys names, Other information.

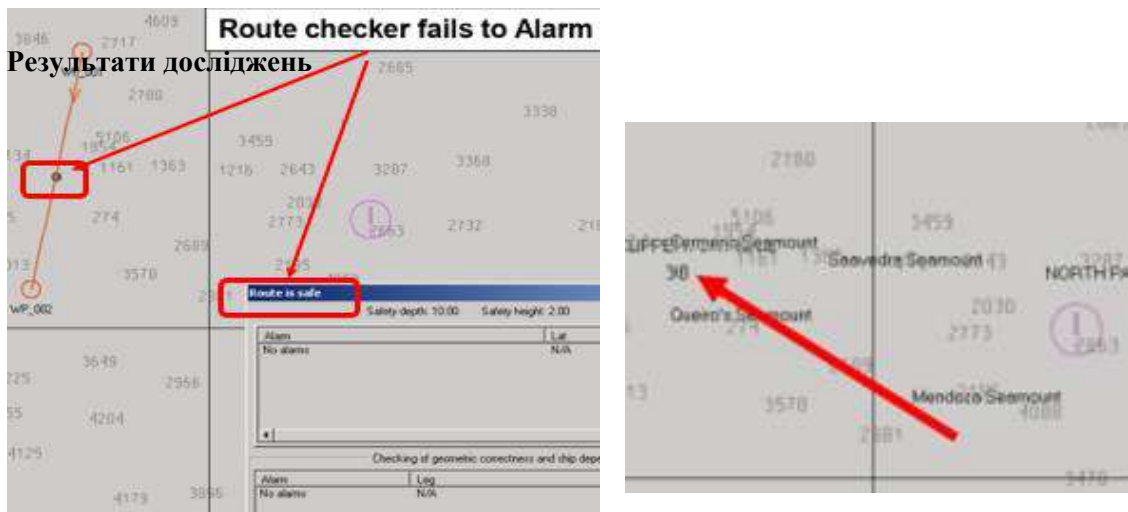


Рис. 1 – Порівняння: відсутність тривоги при автоматичній перевірці маршруту та водночас наявність підпису такого об’єкту

Відображення символів IDS (за стандартом у безпечних водах – Isolated dangers) та у розширеному режимі (Danger in shallow water – у No Go Area) взагалі є обов’язковим. Необхідно пам’ятати про особливість його відображення: залежить від значення Safety Contour та не змінює свій розмір при масштабуванні карти (рис. 2).

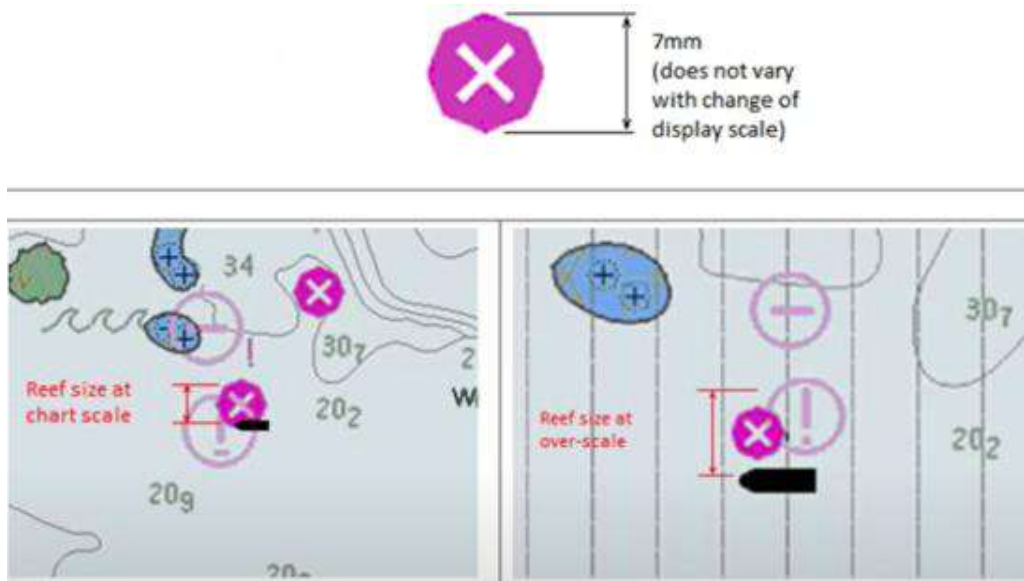


Рис. 2 – IDS не змінює власні розміри при масштабуванні [1]

Також, незважаючи, що Safety Contour вже відокремлює безпечні води, і здається, навіть знати про небезпеки поза межами Safety Contour, однак, оскільки розраховане значення Safety Contour дуже часто не співпадає із запропонованим ECDIS, то існують відповідні значення точкових глибин, де є безпечна можливість зманеврувати, якщо буде перетнута ізобата Safety Contour. Саме для цього і знадобиться інформація про небезпеки NGA (No Go Area).

Накладання Navtex теж доцільно увімкнути: деякі ECDIS мають функціонал щодо автоматичної побудови полігонів по наданим геокоординатам.

У [5] дуже добре описується необхідність використання таких об’єктів, як ScaMin, які починаються відображатись лише з відповідного масштабу автоматично, тобто якщо масштаб

більш дрібний, то при вимкненому параметрі вони відобразяться не будуть, що є небезпечним. На різних ECDIS обмеження щодо масштабу карти для початку їх відображення різні, наприклад, у NaviSailor 4000 – від масштабу 1:600000 [6].

Звісно обов'язковим є і увімкнення коректури, відображення АІО (Admiralty Information Overlay), а також об'єктів, які на поточний час є неактивними (тимчасові), але з часом, вже на виконавчій прокладці, з'являться – Non active objects.

Будь-яка ENC має відповідний розподіл зон довіри CATZOC, який потрібно при плануванні обов'язково враховувати, оскільки в залежності від зони, похибка досліджування глибин, навігаційних небезпек (IDS) та їх географічне розташування досить суттєво відрізняються [4, 7-11]. Наприклад, зона довіри С надасть похибку з радіусом визначення IDS до 500 м, а по глибині до $2m+0.05 \cdot \text{глибина}$! [10, 11]. Значення категорій довіри (CATZOC) присвоюються географічним районам, щоб вказати, чи відповідають дані мінімальному набору критеріїв положення, глибини точності та покриття морського дна. Значення зони довіри (ZOC) залежить від позиційної та глибинної точності дослідження. Також гарною практикою буде використання припустимої похибки визначення місцеположення судна (рис. 3) (наприклад, такий параметр як HDOP у GPS).

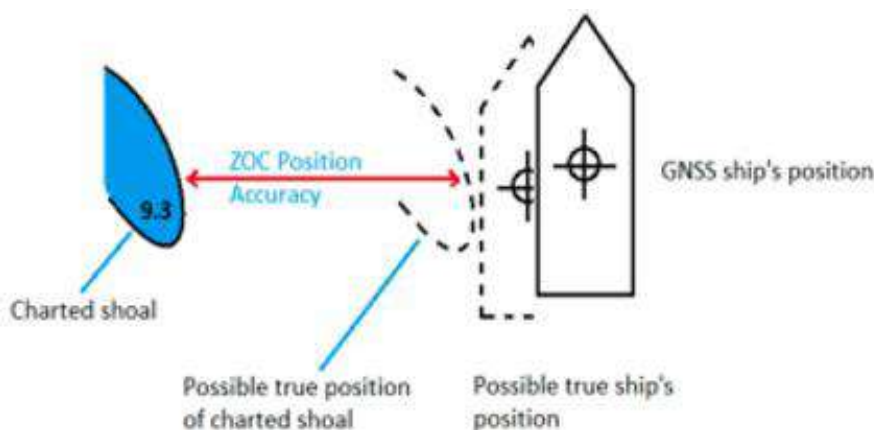


Рис. 3 – Похибка місцеположення наближає до небезпеки [1]

Припустимо, що є відповідний маршрут (рис. 4) і IDS не тільки не лежить на маршруті, а навіть не знаходиться у межах ХТД. Однак оскільки зона довіри на карті С, необхідно вимірити коло з радіусом 500 м + похибка місцеположення (відповідно до шкали на карті та похибки з таблиці CATZOC [10]).

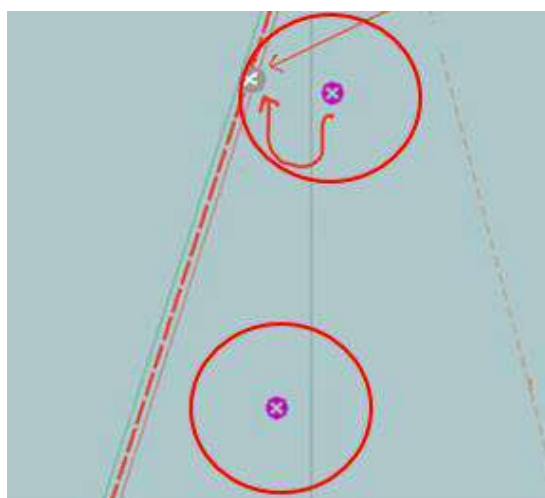


Рис. 4 – Приклад використання інструментарію ECDIS для визначення перетину маршруту та можливого місцерозташування небезпеки

Далі, якщо коло, у межах якого може знаходитись ця небезпека, перетинає межі ХТД, потрібно вирішувати питання або про зменшення відстані ХТД відповідного борту судна, або робити додаткову WayPoint для оминання кола небезпеки (рис. 5).



Рис. 5 – Зміщення ХТД з відповідного борту

Потрібно встановлювати LDL для відображення зміщення ізобат та інших об'єктів акваторії в ручному режимі внаслідок дії географічної похибки відповідно до даної зони CATZOC (рис. 6).

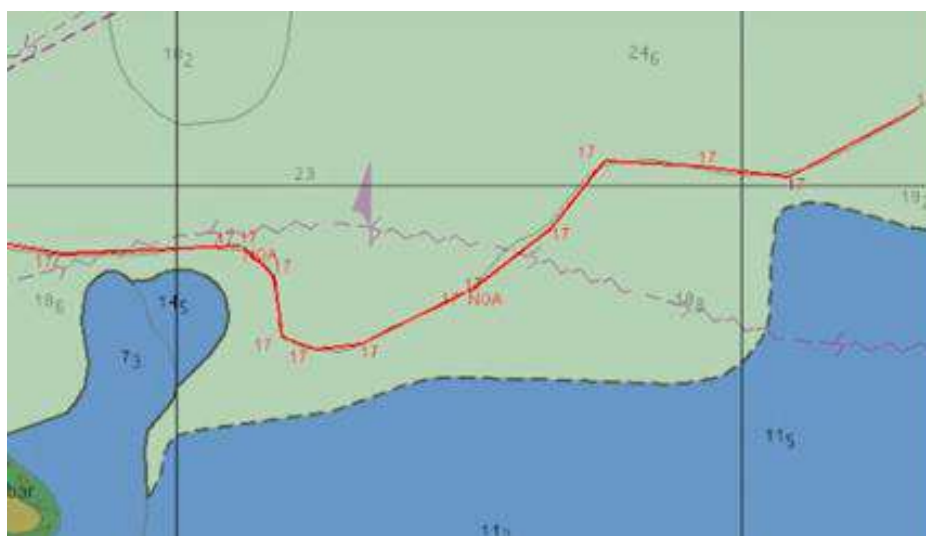


Рис. 6 – Приклад встановлення LDL для ізобати

Звісно, при наявності карт погоди в векторному вигляді необхідно робити відповідні накладання полігонів небезпечних погодних умов: великих хвиль, потужного вітру та ін. Це можливо зробити за допомогою LDL (рис. 7).

Додаткові WP (Way Point) потрібні, якщо маршрут перетинає різні зони CATZOC, внаслідок різних значень УКС, а значить і розраховані значення Safety Contour будуть різні, а ось надані ізобати від ECDIS як Safety Contour можуть залишитись без змін. Наприклад, розрахований на поточному плечі Safety Contour дорівнює 15 м, але внаслідок додавання додаткової WP з одного плеча ми отримуємо два плеча із розрахованими значеннями Safety Contour 15 м та 16.5 м. При кроці ізобат 10 м ECDIS залишить надану ізобату 20 м на обох плечах маршруту.

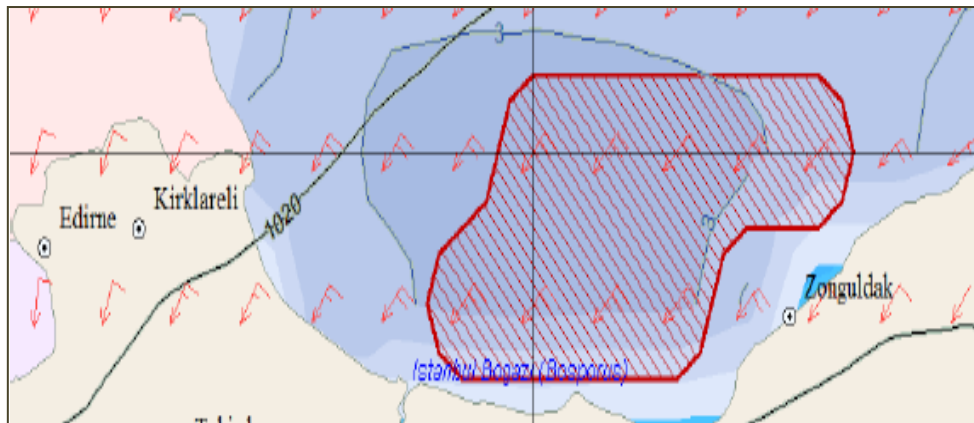


Рис. 7 – LDL зони вітрової/хвильової небезпеки

Safety Contour є найважливішим параметром безпеки в ECDIS для відображення небезпечних акваторій, виявлення ізольованих небезпек і для спрацьовування сигналізації від посадки судна на міліну при користуванні Safety Frame протягом виконавчої прокладки або перетинанні символом судна такої ізобати. У безпечній зоні, якщо є такі глибини, що дорівнюють встановленому значенню Safety Contour, вони позначаються замкнутим контуром із заливкою синього кольору (за умовчужанням). Синій колір використовується для позначення небезпечних областей, в той час як білий або сірий – для безпечних областей (за умовчужанням). Контур безпеки, якщо він не вказаний судноводієм, встановлено 30 м [6]. На відміну від паперових карт ECDIS дозволяє судноводію встановлювати параметри безпеки відповідно до статичних або динамічних характеристик судна. Незважаючи на суттєве значення такого параметру, його тлумачення досить широке [11-13], внаслідок чого формули його розрахування дещо відрізняються.

Контур безпеки можна розрахувати наступним чином (1) [14, 15]:

$$\text{SAFETY CONTOUR} = \max(\text{SHIP'S STATIC DRAFT}) + \text{UKC} - \text{Height of Tide}, \quad (1)$$

де Height of Tide – висота припливу, м. Потрібно рахувати саме ту висоту припливу, яка є мінімальною за весь термін проходження судном відповідної акваторії з урахуванням знаку (наприклад, якщо від'ємний приплив). На прикладі (рис. 8), це значення 1.8 м за період проходження судном з 10:30 до 14:00. Якщо обирати саме максимальне значення 2.65 м за цей період, то в моменти початку руху і наприкінці реальні значення UKC будуть нижче за необхідні. За запропонованим варіантом безпечна глибина буде більше або дорівнюватиме припустимій (рис. 8).

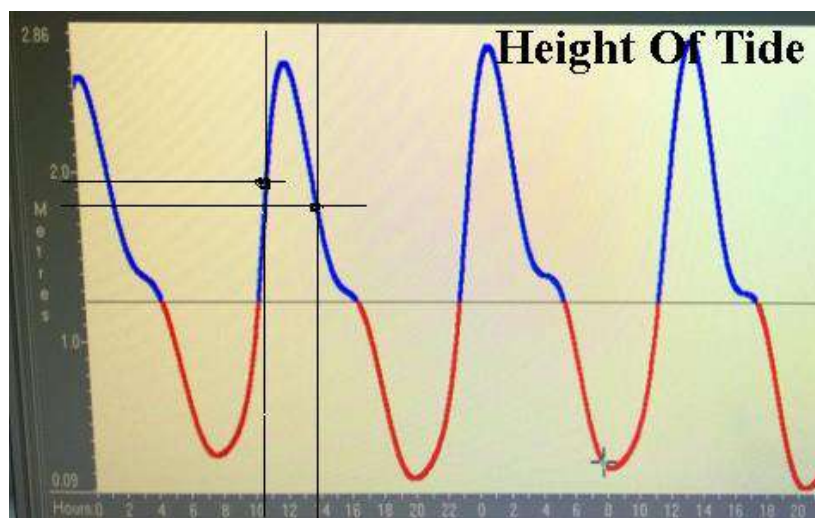


Рис. 8 – Визначення висоти припливу Navi Sailor 4000

Ship's static draft – статична осадка судна, м. Щодо значення (динамічної) максимальної осадки, враховуючи «добру» морську практику слід врахувати розрахунок УКС – запас глибини під кілем судна, враховуючи максимально всі фактори, м (2):

$$UKC = SQUAT + \Delta T_{swell} + \Delta T_{dock\ allowance} + \Delta T_{list} + \Delta T_{pitch} + CATZOC + Min\ Company\ Requirements. \quad (2)$$

Судноплавні компанії вимагають додавати фіксоване значення глибини (*Min Company Requirements*) з метою надання додаткової глибини, наприклад, для компенсації значення динамічних змін УКС за рахунок таких параметрів, як *Hogging*, *Sagging* (вигиб/прогиб) *Squat* — просідання судна (3) (розподіляється на 2 типи: просідання у відкритому морі та мілководді, портах), м:

$$Squat_{open\ sea} = C_b \frac{STW^2}{100},$$

$$Squat_{shallow\ water} = C_b \frac{STW^2}{50}, \quad (3)$$

де C_b – загальний блок-коефіцієнт (4). Коефіцієнти повноти завжди знаходяться в діапазоні [0.6; 1]. Кожен клас суден має характерні значення коефіцієнтів повноти. Чим більше коефіцієнти повноти, тим повніше обводи судна і, навпаки, чим він менше, тим обводи більш витягнуті і загострені.

$$C_b = \frac{V}{L*B*T}, \quad (4)$$

де V – об'єм підводної частини судна, м³;

B – ширина судна, м;

L – найбільша довжина судна, м;

T – осадка, (висота підводної частини судна), м;

STW – швидкість судна відносно води, speed throw water, вуз;

$CATZOC$ – похибка категорії зони довіри карти, м. Оскільки зони довіри на одній тій самій карті можуть змінюватись, то при прокладанні маршруту крізь такі зони зміни ступеня довіри, краще встановити додаткову Way Point на приблизній лінії розмежування зон і маршруту.

$\Delta T_{dock\ allowance}$ or ΔT_{γ} – зміна осадки судна завдяки зміни щільності портових/обмежених вод у порівнянні із відкритим морем, м (5):

$$\Delta T_{\gamma} = \frac{Disp*TPC}{100} * \frac{SeaWaterDensity-ActualDensity}{ActualDensity}, \quad (5)$$

де TPC (tonn per centimetre) – кількість тонн на 1 см осадки. Для кожного судна своє, знаходиться в таблицях гідростатичних елементів судна. Збільшується зі збільшенням осадки судна. Вимірюють щільність за фактом (Actual Density) – денсиметром. Якщо щільність невідома, як, наприклад, в більшості приливних портів Англії, беруть осадку в прісній воді. Можна використовувати Master-Pilot Exchange. Цей запит посилається не менше ніж за 12 годин до підходу до лоцманської станції. Приходить відповідь з усіма вказівками, порадами, описами і особливими випадками, які виходять за рамки звичайного;

$Disp$ – дісплейсмент судна.

Збільшення осадки за рахунок диференту, (Draft increase by Trim, ΔT_{pitch}) (6):

$$\Delta T_{pitch} = 0.5 \times L \times \sin\alpha, \quad (6)$$

де α – вугол диференту, град;

L – довжина судна найбільша, м.

Збільшення осадки судна при крені (ΔT_{list}) можна обчислити за наближеною формулою (7):

$$\begin{aligned} \Delta T_{list} &= 0,008 \times B \times Q \text{ (for small angles of inclination) або} \\ \Delta T_{list} &= B/2 * \sin Q \text{ (for any angles of inclination),} \end{aligned} \quad (7)$$

де Q – крен судна, град (надається показаннями кренометра),

B – ширина судна, beam (width) of the ship, м.

Swell effect – збільшення осадки при хвилюванні. З огляду на те, що на практиці висота хвиль визначається на око з похибкою 20-25%, в інтересах безпеки відповідні табличні дані при курсових кутах хвиль понад 40° слід помножити на коефіцієнт 1.4. Параметр з таблиць обирається відповідно до довжини судна. Часто для визначення власних даних потрібно розраховувати проміжні значення за допомогою формул інтерполяції (8) (якщо потрібна така точність):

$$F(x) = F(x_1) + (x - x_1) \frac{F(x_2) - F(x_1)}{x_2 - x_1}. \quad (8)$$

Наприклад, судно має довжину 90м, при цьому у таблиці немає такого значення, а лише 75 м та 100 м. При хвилях 4 м різниця параметрів складає 0.3 м, тобто значення для довжини 75 м – 2 м, та для 100 м – 1.7 м, але для визначення точного значення (9):

$$\Delta T_{swell\ 90} = 2 + (90 - 75) \frac{1.7 - 2}{100 - 75} = 1.82 \text{ м.} \quad (9)$$

Якщо внаслідок погодних умов необхідно збільшити Safety Contour, може виникнути ситуація, коли судно буде змушено рухатись у NGA (рис. 9).



Рис. 9 – Рух судна у NGA

Такий рух є дуже небезпечним і краще використовувати для збільшення інший параметр – Safety Depth, який залишить попереднє встановлене значення Safety Contour, але покаже небезпечні точкові глибини. Також PSC дуже часто вимагає, щоб ці два параметри дорівнювали один одному. Це саме через несуміщення розрахованого Safety Contour та наданої найближчої більшої до нього ізобати від ECDIS. Тоді Safety Depth притопленим шрифтом (Navi Sailor 4000) покаже точкові глибини у NGA, які є безпечними відповідно до розрахованого Safety Contour (і який дорівнює Safety Depth).

Значення Safety Depth потрібно збільшувати на ділянках, де внаслідок погодних умов або змінення CATZOC збільшується УКС, а значення Safety Contour – ні, якщо перехід буде здійснюватись у NGA: оскільки збільшення Safety Contour може привести до розповсюдження NGA на всю поточну ділянку і Safety Frame не буде реагувати на перетинання Safety Contour, оскільки судно вже буде поза межами безпечної акваторії на відміну від звичайного перетинання контуру (рис. 10).



Рис. 10 – Індикація тривоги є при перетинанні Safety frame ізобати Safety Contour [1]

Інші два параметри: Deep Contour розраховують в більшості випадків як подвійну осадку та Shallow Contour із обмеженнями обрання з діапазону від значення глибини гарантованої посадки на мілину (наприклад, осадка) до розрахованого значення Safety Contour – добре висвітлені у роботі [13].

Після формування основного маршруту обирають дистанції Port XTD та STBD XTD як лінії припустимого відхилення від маршруту. Тобто у їх межах ECDIS не буде надавати тривогу. Звісно, внаслідок обмежень акваторій та глибин, такі лінії також показують можливі відхилення у межах маршруту в безпечних для судна частинах акваторій. Такі лінії не повинні перетинати будь які навігаційні перешкоди, оскільки вони обмежують акваторію для безпечного маневру судна. Суть використання дистанцій XTD – це визначення безпечної частини акваторії для можливих маневрів. Перевірку попередньої прокладки потрібно здійснювати саме з XTD і перевіряти та усувати всі помилки у межах XTD.

Відсутність використання XTD приводить до невизначеності при маневрах, оскільки немає заздалегідь перевіреної безпечної акваторії поряд з плечем маршруту. В стислих за часом умовах маневрування це є досить небезпечним, оскільки ECDIS не перевіряє такі частини акваторії при перевірці маршруту на навігаційні небезпеки. Орієнтовні мінімальні значення XTD для різних типів акваторій: Open Sea – 1.0 м.м., Coastal water – 0.5 м.м., Harbor або Confined Waters – 0.25 м.м.

Висновки

Розглянуті питання налагодження SENC та запропоновані формули розрахунку основних параметрів навігаційних глибин, як один з таких варіантів, що розширюють існуючі альтернативи [12-14]. Надані пояснення з прикладами розрахунків параметрів безпеки щодо навігаційних глибин досить корисні для використання у відповідних навчальних закладах при наданні інформації щодо налагодження SENC у ECDIS для попередньої прокладки. На даний час триває також розробка та тестування новітніх стандартів гідрографії: S-100, S101 і S102, які будуть надавати до ECDIS додаткові шари інформації. Особливо цінним є отримання інформації у режимі реального часу щодо припливів на картах вказаних форматів. З часом, використання нових форматів

даних S1xx та вище для карт [16] буде сприяти у майбутньому меншим крокам ізобат внаслідок більш точніших вимірювань і наближенню до кроку 1 м, з яким визначення точкових значень Safety Depth можуть стати історією. Використання новітніх технологій, таких як сітчасті моделі (карти порту Гамбургу), дозволяють зробити точність батиметричних даних до 1 дециметра, також втілення методів штучного інтелекту [17] дозволить, під час обробки після зйомки, зосередитися виключно на географічній прив'язці батиметричних даних за допомогою детермінованих розрахунків.

Перелік використаних джерел:

1. Application and usability of ECDIS A MAIB and DMAIB collaborative study on ECDIS use from the perspective of practitioners. URL: https://dmaib.com/media/8502/ecdis_application_and_usability.pdf (дата звернення: 15.04.2023).
2. Nova Cura 14 SEP 2017. URL: <https://www.nautinst.org/resources-page/nova-cura.html> (дата звернення: 23.06.2023).
3. Digital navigation: old skills in new technology: Lessons from the grounding of the Nova Cura The Hague, September 2017. The reports issued by the Dutch Safety Board. URL: https://www.onderzoeksraad.nl/en/media/attachment/2018/7/10/ef8c7f74927eovv_20172527_b_rapport_nova_cura_en_170913_cp.pdf (дата звернення: 10.05.2023).
4. IHO S-67. Mariners' guide to accuracy of electronic navigational charts (ENC). Edition 0.4. Monaco: International hydrographic organization, 2017. 20 p.
5. Rutkowski G. ECDIS limitations, data reliability, alarm management and safety settings recommended for passage planning and route monitoring on VLCC tankers. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2018. Vol. 12. No. 3. Pp. 483-490. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.12.03.06>.
6. NAVI-SAILOR 4000/4100 ECDIS (VERSION 2.00.009) USER MANUAL, 2009 Transas Ltd. 311C. URL: https://www.bmemarine.com/wp-content/uploads/NS4000_4100_ECDIS_User_Guide_eng.pdf (дата звернення: 18.06.2023).
7. IHO S-57. IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data. Supplementary Information for the Encoding of S-57 Edition 3.1 ENC Data. Supplement No. 3 to Edition 3.1. Monaco: International hydrographic organization, 2014. 24 p.
8. Category Zones of Confidence (CATZOC) - dispelling the myths. URL: <https://www.admiralty.co.uk/news/CATZOC-dispelling-the-myths> (дата звернення: 18.06.2023).
9. Weintrit A. Reliability of navigational charts and confidence in the bathymetric data presented (CATZOC). *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 2018. Vol. 54(126). Pp. 84-92. DOI: <https://doi.org/10.17402/289>.
10. Weintrit A. Accuracy of bathymetric data in electronic navigational charts (CATZOC). *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 2018. Vol. 55(127). Pp. 60-69. DOI: <https://doi.org/10.17402/302>.
11. Table CATZOC. URL: <https://assets.admiralty.co.uk/public/documents/2023-03/CATZOC%20Table.pdf?VersionId=blXaxNbUxMMRQMujIQV5bO4do3EzsbFj> (дата звернення: 30.05.2023).
12. Emiliano Caroletti. ECDIS: Depth Contours explained. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/ecdis-depth-contours-explained-emiliano-caroletti-> (дата звернення: 20.07.2023).
13. Andy Norris MNI. Safety depths and contours for port approaches. URL: <https://www.nautinst.org/resources-page/safety-contours.html> (дата звернення: 10.06.2023).
14. Setting SAFETY DEPTH and SAFETY CONTOURS in ECDIS. URL: https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/DIPWG/DIPWG4/TSMAD24-DIPWG4-09.9B_Setting_Safety_Depth_and_Safety_Contours_in_ECDIS.pdf (дата звернення: 23.06.2023).
15. Вагущенко Л.Л. Суднові навігаційно-інформаційні системи. Одеса : НУ «ОМА», 2016. 238 с.
16. IHO S-100. Universal hydrographic data model. Edition 3.0.0. Monaco: International hydrographic organization, 2017. 580 p.
17. Websdale D., Gutierrez F.J. Accelerating subsea data processing using artificial intelligence. *Hydro International*. 2022. Vol. 26(1). Pp. 24-25.

References:

1. Application and usability of ECDIS A MAIB and DMAIB collaborative study on ECDIS use from the perspective of practitioners [Online]. Available: https://dmaib.com/media/8502/ecdis_application_and_usability.pdf. Accessed on: April 15, 2023.
2. Nova Cura 14 SEP 2017 [Online]. Available: <https://www.nautinst.org/resources-page/nova-cura.html>. Accessed on: June 23, 2023.
3. Digital navigation: old skills in new technology: Lessons from the grounding of the Nova Cura The Hague, September 2017. The reports issued by the Dutch Safety Board [Online]. Available: https://www.onderzoeksraad.nl/en/media/attachment/2018/7/10/ef8c7f74927eovv_20172527_b_rapport_nova_cura_en_170913_cp.pdf. Accessed on: May 10, 2023.
4. *Mariners' Guide to Accuracy of Electronic Navigational Charts (ENC)*, IHO S-67, International hydrographic organization, April 2017.
5. G. Rutkowski, «ECDIS Limitations, Data Reliability, Alarm Management and Safety Settings Recommended for Passage Planning and Route Monitoring on VLCC Tankers», *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 12, no. 3, pp. 483-490, 2018. doi: 10.12716/1001.12.03.06.
6. NAVI-SAILOR 4000/4100 ECDIS (VERSION 2.00.009) USER MANUAL, 2009 Transas Ltd. 311C [Online]. Available: https://www.bmemarine.com/wp-content/uploads/NS4000_4100_ECDIS_User_Guide_eng.pdf. Accessed on: June 18, 2023.
7. *IHO Transfer Standard for Digital Hydrographic Data*, IHO S-57, International hydrographic organization, June 2014.
8. Category Zones of Confidence (CATZOC) - dispelling the myths [Online]. Available: <https://www.admiralty.co.uk/news/CATZOC-dispelling-the-myths>. Accessed on: June 18, 2023.
9. A. Weintrit, «Reliability of navigational charts and confidence in the bathymetric data presented (CATZOC)», *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, vol. 54(126), pp. 84-92, 2018. doi: 10.17402/289.
10. A. Weintrit, «Accuracy of bathymetric data in electronic navigational charts (CATZOC)», *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, vol. 55(127), pp. 60-69, 2018. doi: 10.17402/302.
11. Table CATZOC [Online]. Available: <https://assets.admiralty.co.uk/public/documents/2023-03/CATZOC%20Table.pdf?VersionId=blXaxNbUxMMRQMujIQV5bO4do3EzsbFj>. Accessed on: May 30, 2023.
12. Emiliano Caroletti. ECDIS: Depth Contours explained [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/ecdis-depth-contours-explained-emiliano-caroletti->. Accessed on: July 20, 2023.
13. Andy Norris MNI. Safety depths and contours for port approaches [Online]. Available: <https://www.nautinst.org/resources-page/safety-contours.html>. Accessed on: June 10, 2023.
14. Setting SAFETY DEPTH and SAFETY CONTOURS in ECDIS [Online]. Available: https://legacy.iho.int/mtg_docs/com_wg/DIPWG/DIPWG4/TSMAD24-DIPWG4-09.9B_Setting_Safety_Depth_and_Safety_Contours_in_ECDIS.pdf. Accessed on: June 23, 2023.
15. L.L. Vahushchenko, *Sudnovi navihatsiino-informatsiini systemy* [Ship navigation and information systems]. Odesa, Ukraine: NU «OMA» Publ., 2016. (Ukr.)
16. *Universal Hydrographic Data Model*, IHO S-100, International hydrographic organization, April 2017.
17. D. Websdale, and F.J. Gutierrez, «Accelerating subsea data processing using artificial intelligence», *Hydro International*, vol. 26(1), pp. 24-25, 2022.

Рецензент: Д.В. Макаrchук
канд. техн. наук, лектор, Solent University

Стаття надійшла 12.08.2023

Стаття прийнята 14.09.2023

УДК 656.612.8

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300120

© Калініченко Є.В.¹, Постніков Є.Є.²**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ СЕЙСМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ ХАРАКТЕРІ МОРСЬКОГО БУКСИРУВАННЯ**

За останні 50 років все більшої актуальності набуває пошук запасів природного газу для забезпечення потреб підприємств і господарств. Основним методом пошуку родовищ корисних копалин є сейсмозв'язка. У зв'язку зі скороченням ресурсів на суші сейсмозв'язка в морі є перспективною, про що свідчать високі темпи розвитку морської сейсмічної техніки. А сучасні технології в області сейсмозв'язки забезпечили популярність методів пошуку корисних копалин як на морі, так і в світі в цілому. Оскільки визначення траєкторії руху сейсмічного обладнання під час швидкого маневру відносно основного курсу є складною багатовимірною задачею, доцільно використовувати аналітичний метод. Аналітичний метод дозволить досліджувати динаміку сейсмічного обладнання з урахуванням ряду припущень та обмежень. Для проведення сейсмозв'язки на морі використовується комплекс спеціального обладнання, що включає бортову та позабортову складові. Сейсмічне обладнання слід розглядати як маломорехідний об'єкт. При швидкому маневрі сейсмічне обладнання зміщується на певний кут миттєво відносно буксирувальника, як наслідок, рух сейсмічного обладнання слід вважати нелінійним. Як правило, сейсмічна апаратура розміщується на судах з широкою кормою, на якій закріплюється підвісна апаратура. Дослідження у статті ґрунтуються на використанні відомих методів наукового пошуку: системного аналізу, теорії управління ризиками, методів математичного моделювання для визначення показників маневрування та руху буксирувальника й сейсмічного обладнання. У статті удосконалено методу визначення траєкторії руху сейсмічної апаратури в стаціонарному режимі морського буксирування. Особливістю методу є заміна руху буксирного судна і сейсмічного обладнання їх характерними точками, що дозволяє при швидких і помірних змінах курсу буксира розглядати траєкторію руху сейсмічного обладнання як положу криву, визначати під час буксирування різні кінематичні характеристики мілководного об'єкта та враховувати їх при розробці проекту буксирування для різноманітних умов навколишнього середовища з дотриманням норм безпеки судноплавства.

Ключові слова: буксирування, динаміка, морська платформа, безпека плавання, хвилювання.

Y.V. Kalinichenko, Y.Y. Postnikov. Method of determining the trajectory of seismic equipment in the stationary character of sea towing. Over the past 50 years, the search for natural gas reserves to meet the needs of enterprises and farms has become more and more relevant. The main method of finding mineral deposits is seismic exploration. In connection with the reduction of resources on land, seismic exploration in the sea is promising, as evidenced by the high rate of development of marine seismic technology. And modern technologies in the field of seismic exploration have ensured the popularity of methods of searching for minerals both at sea and in the world as a whole. Since determining the trajectory of the movement of seismic equipment during a fast maneuver relative to the main course is a complex multidimensional task, it is advisable to use an analytical method. The analytical method will allow to study the dynamics of seismic equipment taking into account a number of assumptions and limitations. A complex of special equipment is used for conducting seismic exploration at sea, which includes on-board and off-board

¹ канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0003-2898-7313, kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

² аспірант, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0001-7327-5353, postnikov.zhenya@ukr.net

components. Seismic equipment should be considered as a low-sea facility. During a quick maneuver, the seismic equipment moves to a certain angle instantaneously relative to the tug, as a result, the movement of the seismic equipment should be considered non-linear. As a rule, seismic equipment is placed on ships with a wide stern, on which the suspended equipment is fixed. The research in the article is based on the use of well-known methods of scientific research: system analysis, risk management theory, mathematical modeling methods for determining maneuvering and movement indicators of the tugboat and seismic equipment. The article improves the method of determining the trajectory of seismic equipment in the stationary mode of sea towing. The peculiarity of the method is the replacement of the movement of the towing vessel and the seismic equipment with their characteristic points, which makes it possible to consider the trajectory of the movement of the seismic equipment as a gentle curve with rapid and moderate changes in the course of the tug, to determine during towing various kinematic characteristics of the shallow-water object and to take them into account when developing the towing project for a variety of environmental conditions in compliance with shipping safety standards.

Key words: *towing, dynamics, marine platform, navigation safety, excitement.*

Постановка проблеми. За останні 50 років пошук запасів природного газу для задоволення потреб підприємств та господарств стає дедалі значущим. Основним методом пошуку родовищ корисних копалин є сейсмічна розвідка [1]. Завдяки зниженню ресурсів на суші, перспективною є сейсмічна розвідка в морі, про що свідчить високий темп розвитку морського сейсмічного обладнання. А сучасні технології в галузі сейсмічної розвідки забезпечили популярність методів пошуку корисних копалин як на морі, так і у світі загалом.

Для проведення сейсмічної розвідки в морі використовують комплекс спеціального обладнання, який містить бортову та позабортну компоненту. Як правило, сейсмічне обладнання розміщене на судах із широкою кормою, на яких закріплене забортне обладнання:

- згорнуті сейсмічні коси, що буксируються;
- джерела коливальних, приймачі;
- допоміжне обладнання (компресори та ін.).

Сейсмічне обладнання слід розглядати як маломорехідний об'єкт. У морській практиці виділяють два варіанти маневру маломорехідних об'єктів – швидкий та повільний.

При швидкому маневрі сейсмічне обладнання зміщується на певний кут миттєво відносно буксирувальника, як наслідок, рух сейсмічного обладнання слід вважати нелінійним. Траєкторія руху сейсмічного обладнання після швидкого маневру від головного (запланованого) курсу залежить від:

- швидкості ведення сейсмічної розвідки;
- натягу буксирувальної лінії в точці з'єднання;
- гідрометеорологічних умов (швидкості та напрямку вітру, хвилювання моря та сили течії).

Оскільки визначення траєкторії руху сейсмічного обладнання при швидкому маневрі відносно головного курсу є складною багатомірною задачею, то доцільним є застосування аналітичного методу. Аналітичний метод дозволить дослідити динаміку сейсмічного обладнання, враховуючи низку допущень та обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у статті ґрунтуються на використанні відомих методів наукового пошуку:

- системного аналізу – для формалізації завдання оцінювання ризиків проведення буксирувальних операцій [2-4];
- теорія управління ризиками – для безпосереднього оцінювання ризиків та розроблення методів управління ними [5-8];
- методи математичного моделювання – для визначення показників маневрування та руху буксирувальника й сейсмічного обладнання [9-11].

Метою статті є удосконалення методу визначення траєкторії сейсмічного обладнання при стаціонарному характері морського буксирування.

Виклад основного матеріалу. При підготовці та проведенні операції буксирування сейсмічного обладнання має забезпечуватись контроль та виконання елементів навігаційної безпеки. На початку буксирування сейсмічного обладнання реалізуються:

- поступовий набір швидкості без надмірних прискорень та ривків для уникнення пошкоджень буксирувальної лінії;
- фіксація оборотів та кута гвинтів керування після встановлення натягу буксирувальної лінії, поступове збільшення швидкості;
- встановлення оптимальної довжини буксирувального тросу після встановлення сейсмічного обладнання у встановлене положення;
- візуальний огляд буксирувальної лінії після встановлення запланованої швидкості проведення сейсмічної розвідки.

Під час буксирування сейсмічного обладнання виконується низка заходів, спрямована на підтримання та забезпечення безпеки:

- встановлення постійного чергування зі спостереження за буксирувальною лінією та сейсмічним обладнанням;
- встановлення правил дій при надзвичайних ситуаціях;
- уникнення курсових кутів відносно хвилі, що потенційно призведуть до надмірного навантаження на буксирувальну лінію;
- встановлення довжини буксирувальної лінії, яка б забезпечувала мінімальне розхитування сейсмічного обладнання та одночасне сходження та спускання буксирувальника та сейсмічного обладнання;
- встановлення оптимальної швидкості буксирувальника, яка б дозволяла вести сейсмічну розвідку та не допускати зниження швидкості, що призведе до зниження натягу буксирувальної лінії та втрати управління;
- уникнення різких змін курсу буксирувальника, у випадку надзвичайних ситуацій разом зі зміною курсу помірно зменшувати довжину буксирувальної лінії.

При аварійній зупинці складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання необхідно:

- вжити заходів щодо запобіганню шкоди сейсмічному обладнанню та буксирувальнику при раптовій зупинці;
- врахувати ризик небезпечного зближення сейсмічного обладнання та буксирувальника при зниженні натягу буксирувального тросу під дією його ваги.

У математичній постановці задачі рух складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання замінено характерними точками, які описують їх рух. Характерними точками буксирувальника є точка з'єднання із буксирувальним тросом. Характерною точкою сейсмічного обладнання є точка кріплення до буксирувальної лінії. Умовна пряма, що з'єднує характерні точки буксирувальника та сейсмічного обладнання, є базою буксирування.

Як відомо, динаміка системи складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання із врахуванням усіх впливаючих дій та прискорень є складним завданням гідродинаміки. Враховуючи схематизацію завдання, яке дозволить її спростити, виникає математична модель, що складається із системи нелінійних диференціальних рівнянь зі звичайними або частковими похідними. Як наслідок, заміщення руху складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання на їх характерні точки дає можливість уникнути розгляду низки надлишкових ускладнюючих обставин, проте принципово не вплине на результат розв'язання задачі.

Нехай одним із обмежень буде таке. Крива провисання буксирувальної лінії не враховується, а зміна курсу буксирувальника є незначною. Математичну модель за визначеним обмеженням можна записати як систему диференціальних рівнянь зі збереженням усіх членів не вище першого порядку. Враховуючи математичну модель, при зміні курсу буксирувальника траєкторію сейсмічного обладнання слід розглядати як плоску криву. У результаті дослідження динаміки складу суден буксирувальника і сейсмічного обладнання отримуємо дані щодо руху сейсмічного обладнання при швидких і помірних змінах курсу буксирувальника. Отримані дані є основою навігаційної безпеки при плануванні та виконанні завдань сейсмічної розвідки.

Нехай вага сейсмічного обладнання дорівнює m , а рух характерної точки сейсмічного обладнання B за умови довільного руху характерної точки буксирувальника A , тоді її вектор визначається як $r_A = r_A(t)$. Опис руху характерних точок буксирувальника та сейсмічного обладнання

слід представити у вигляді диференціальних рівнянь.

Проведемо запис векторної рівності у скалярній формі: $x_A = x_A(t)$, $y_A = y_A(t)$. Таким чином, слід вважати, що характерна точка сейсмічного обладнання рухається під впливом двох сил:

- сила буксирувальної лінії F , що відображає реакцію буксирувальної лінії між характерними точками A та B , та прийнята як не значна;
- векторна сила опору руху R .

Векторна сила опору руху R визначається як

$$R = \psi(v) (v^*/v),$$

де v^* – вектор швидкості характерної точки B за модулем v ;

$\psi(v)$ – функція швидкості характерної точки A .

Враховуючи векторну рівність $r_B = r_A - AB$, отримаємо залежність для координат характерних точок

$$x_B = x_A - L \cos \varphi, y_B = y_A - L \sin \varphi, \quad (1)$$

де L – буксирувальна лінія.

Диференціальні рівняння руху характерної точки сейсмічного обладнання B слід описати виразами:

$$m d^2 x_B / dt^2 = F \cos \varphi - R_x; \quad (2)$$

$$m d^2 y_B / dt^2 = F \sin \varphi - R_y, \quad (3)$$

де $m d^2 x_B / dt^2$, $m d^2 y_B / dt^2$ – похідні часу.

До рівняння (2) підставимо результуюче значення виразу (3) та отримаємо модуль вектора F . Результатом підстановки буде формула:

$$m d^2 y_B / dt^2 = (m d^2 x_B / dt^2 + R_x) (\sin \varphi / \cos \varphi) - R_y. \quad (4)$$

При наступному диференціюванні виразів (2) та (3) та підстановки отриманих значень до виразу (4) отримаємо:

$$\begin{aligned} m(d^2 y_A / dt^2 \cos \varphi - d^2 x_A / dt^2 - a d\varphi^2 / dt^2) = \\ = -(\psi(v)/v)(dy_A / dt \cos \varphi - dx_A / dt - a d\varphi / dt), \end{aligned} \quad (5)$$

де $a = \text{const}$.

У результаті розв'язання диференціального рівняння (5) відносно φ , при підстановці результату виразу (1) отримаємо закон руху характерної точки сейсмічного обладнання B залежно часу. Якщо далі традиційно припустити, що опір середовища є пропорційним квадрату швидкості буксирувальника

$$\psi(v) = \lambda v^2,$$

то при диференціюванні виразу (5) отримаємо:

$$m(d^2 y_A / dt^2 \cos \varphi - d^2 x_A / dt^2 - a d\varphi^2 / dt^2) = -\lambda v(dy_A / dt \cos \varphi - dx_A / dt - a d\varphi / dt). \quad (6)$$

Розглянемо два окремі випадки.

Перший випадок. Нехай буксирувальник рухається по запланованому маршруті без маневрування. У такому випадку траєкторія руху характерної точки A буксирувальника є прямою лінією. Якщо $x_A = vt$, то при $y_A = 0$ при диференціюванні виразу (6) отримаємо:

$$\begin{aligned} (m/\lambda L) a d\varphi^2 / dt^2 + ((v/L) \sin \varphi + d\varphi / dt) \times \left[(v^2/L^2) \cos^2 \varphi + ((v/L) \sin \varphi + \right. \\ \left. + (d\varphi / dt))^2 \right]^{1/2} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Другий випадок. Нехай траєкторія руху характерної точки буксирувальника A є циркуляцією радіусів $D/2 = R_C$. У такому випадку:

$$x_A = R_C \cos(vt/R_C), y_A = R_C \sin(vt/R_C).$$

При диференціюванні виразу (6) отримаємо:

$$(m/\lambda L)ad\varphi^2/dt^2 = (mv^2/\lambda LR_c^2) \sin(vt/R_c - \varphi) + [v \cos(vt/R_c - \varphi) - Ld\varphi/dt] \times [(v/L)^2 \sin^2(vt/R_c - \varphi) + (v/L) \cos(vt/R_c - \varphi) + (d\varphi/dt)]^{1/2}. \quad (8)$$

Результати модельних випробувань наведені на рис. 1 та 2.

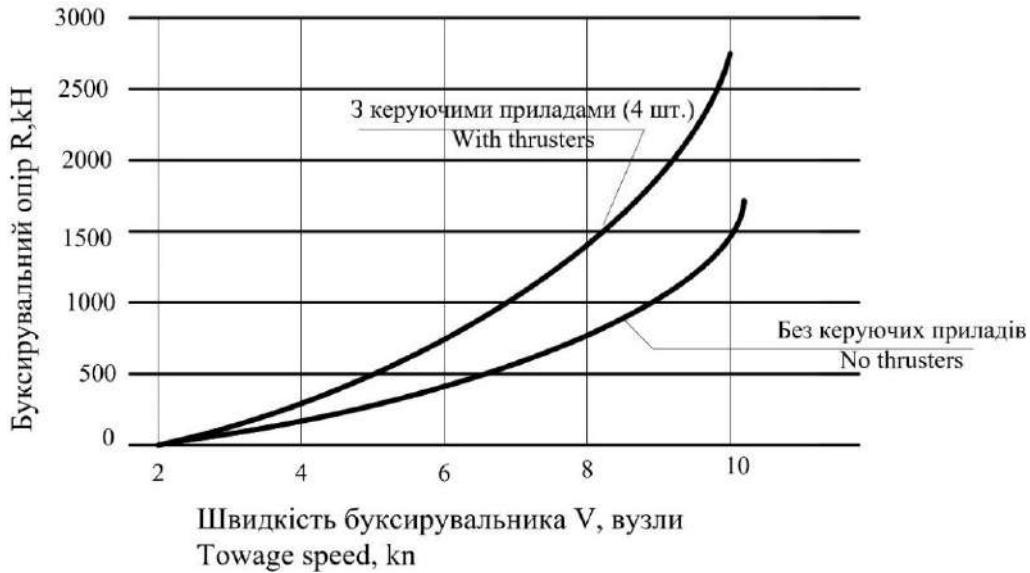


Рис. 1 – Залежність буксирного опору маломорехідного об'єкту відносно швидкості буксування без врахування хитавиці



Рис. 2 – Залежність буксирного опору маломорехідного об'єкту від швидкості буксування з урахуванням хитавиці

Аналіз отриманих даних свідчить, що при натягу буксирної лінії в розглянутому діапазоні і швидкості руху складу суден буксирного маломорехідного обладнання, враховуючи гідродинамічні особливості маломорехідного об'єкта, доцільно вважати, що $\Psi(v) = \lambda v^n$, де $n \rightarrow 1$. У такому випадку отримаємо лінійну залежність опору зовнішнього

середовища відповідно швидкості буксирування $\Psi(v) = \lambda v$. Визначена залежність наведена на рис. 3.

З рис. 3 очевидно, що вектор швидкості маломорехідного об'єкта співпадає з напрямком тяги буксирувальника, як наслідок диференційні рівняння (7) та (8) доцільно замінити виразом:

$$(m/\lambda L)ad\varphi^2/dt + [(v/L) \sin \varphi + d\varphi/dt]L = 0$$

або

$$(m/\lambda L)ad\varphi^2/dt + [d\varphi/dt - (mv^2/\lambda L) \sin(\beta + \varphi - vt/R_c)/R_c \cos \beta] = 0.$$

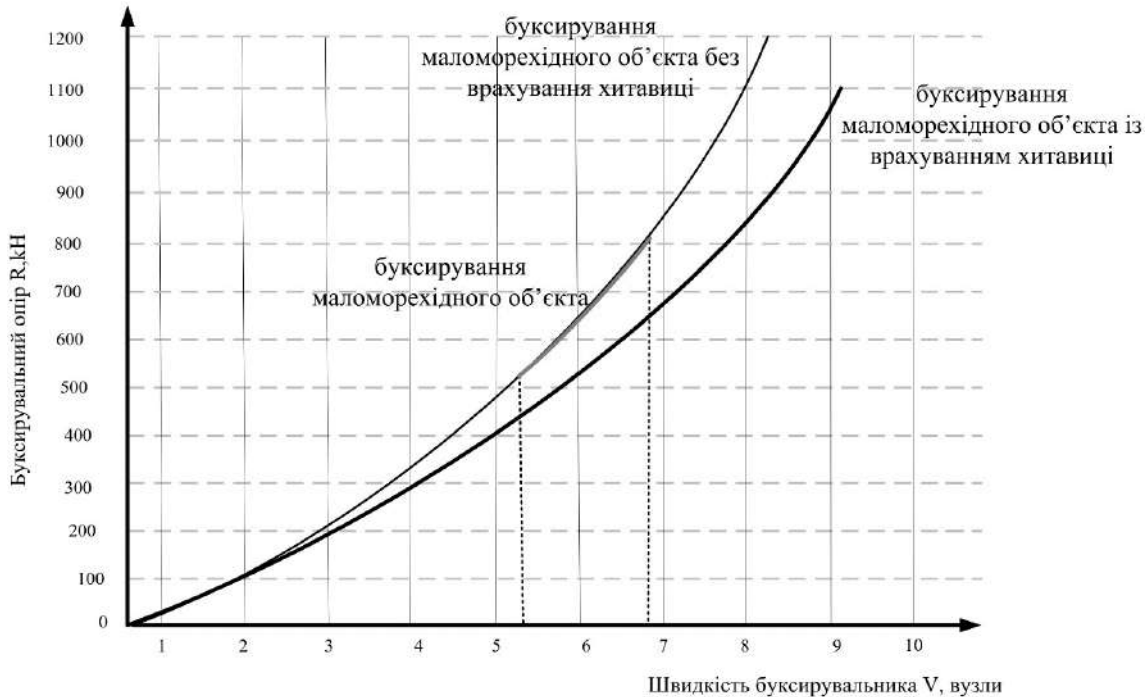


Рис. 3 – Узагальнений аналіз залежності буксирувального опору від швидкості буксирування

При буксируванні маломорехідних об'єктів величину $m/\lambda L$ слід вважати малим параметром. При допущенні, що $m/\lambda L \rightarrow 0$, отримаємо диференціальне рівняння плоскої кривої, яка описує рух маломорехідного об'єкта при компенсуванні розхитування буксирувальника, яка є трактрисою прямої лінії:

$$d\varphi/dt + (v/L) \sin \varphi = 0. \tag{9}$$

Як наслідок, якщо виконується морське буксирування для подій виду $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma$ або $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \sigma$, для опису траєкторії маломорехідного об'єкта слід використовувати аналітичний опис трактриси прямої лінії (рис. 4).

Розглядаючи рис. 4, справедливо відмітити, що між кутом φ та курсовим кутом існує залежність: $q_B = \pi - \varphi$. Тому, як наслідок, маємо співвідношення: $q_B/dt = -d\varphi/dt$. Рівняння (9) слід записати як:

$$dq_B/dt - (v/L) \sin q_B = 0. \tag{10}$$

У результаті інтегрування залежності (10) отримаємо:

$$L(q_B - q_{B0}) = \int_0^t v \sin q_B dt,$$

де q_B – кут між напрямком маломорехідного об'єкта у початковий момент часу та діаметральною площиною буксирувальника після повороту судна;

$q_{B0} = \pi - \Delta K$, де ΔK – величина зміни курсу буксирувальника.

Як наслідок, вираз траєкторії для сейсмичного обладнання отримаємо з формули (10):

$$dq_B / \sin q_B = (v/L) dt.$$

Провівши його інтегрування, маємо:

$$\int_{q_{B0}}^{q_B} dq_B / \sin q_B = (v/L) \int_0^t dt.$$

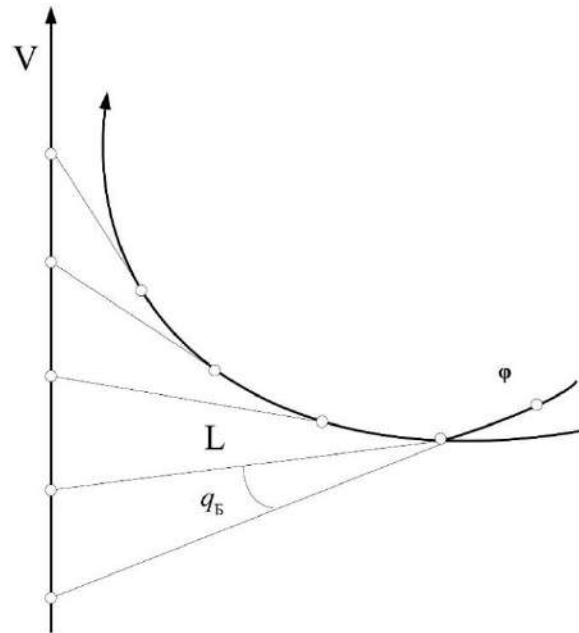


Рис. 4 – Опис траєкторії сейсмичного обладнання

Звідки

$$\ln \left[\frac{tg(q_B/2)}{tg(q_{B0}/2)} \right] = vt/L$$

або

$$tg(q_B/2) = (ctg(\Delta K/2)) \exp S/L, \tag{11}$$

де S – рух буксирувальника після маневру.

Формула (11) є рівнянням трактиси прямої лінії, а отже при повороті буксирувальника на кут q_B кут буксирувальника поступово зміщується до 180° , як наслідок, траєкторія руху маломорехідного об'єкта стає подібною до траєкторії буксирувальника. Слід вважати, що траєкторія руху маломорехідного об'єкта є асимптотою.

Як наслідок, отримаємо математичні залежності при апроксимації траєкторії руху маломорехідного об'єкта за умови: $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma$, що необхідно для рішення завдань забезпечення безпеки навігації при плануванні операцій з буксирування.

Диференційне рівняння (10) можна отримати через послідовність геометричних операцій, розглянувши траєкторію руху маломорехідного об'єкта. Нехай зміна курсу буксирувальника (поворот) відбулася миттєво, а подальший рух є прямолінійним та непротяжним. За умови, що в деякий момент часу база буксирувальника L формує своєю траєкторією кут q_B , відновимо перпендикуляр до напрямку характерних точок складу суден, буксирувальника – A та маломорехідного об'єкта – B , отримаємо центр повороту на прямій (точка C). Отже величина миттєвої кутової швидкості прямої AB визначається як $dq_B/dt = v/AC$. Визначення векторно-графічним способом миттєвого центру повороту точки C наведено на рис. 5.

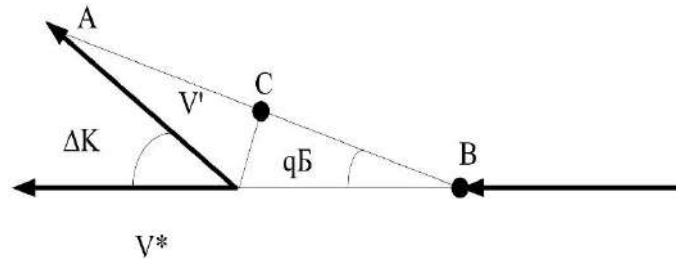


Рис. 5 – Визначення векторно-графічним способом миттєвого центру повороту точки С при маневруванні

Зважаючи, що $AC = L/\sin q_B$, отримаємо

$$dq_B/dt - (v/L) \sin q_B = 0. \tag{12}$$

Очевидно, що формули (10) та (12) тотожні.

Слід зазначити, що графічно можна відобразити траєкторію руху маломорехідного об'єкта, в тому числі при маневруванні.

Розглянемо випадок зміни курсу буксирувальника, коли кут буксирувальника змінено відносно первісного курсу на $\Delta K = \pi - q_{B0}$. Як наслідок, буксирувальник рухається за новим курсом. L – відстань по горизонталі між буксирувальником і маломорехідним об'єктом.

Для побудови траєкторії руху маломорехідного об'єкта необхідно виконати процедуру, яка складатиметься з таких послідовних етапів:

- 1) визначення та відбір на лінії нового курсу буксирувальника набору точок n , розташованих рівномірно на малій відстані одна від одної;
 - 2) з'єднання цих n точок прямою лінією;
 - 3) відкладання відрізка a , рівного довжині L ;
 - 4) з'єднання точок з прямою лінією та відкладання відрізка b , що дорівнює довжині L .
- Аналогічно для точок v, g та ін.

З'єднання точок a, b, v та інших дозволить сформувати траєкторію руху маломорехідного об'єкта – трактрису прямої лінії (рис. 6).

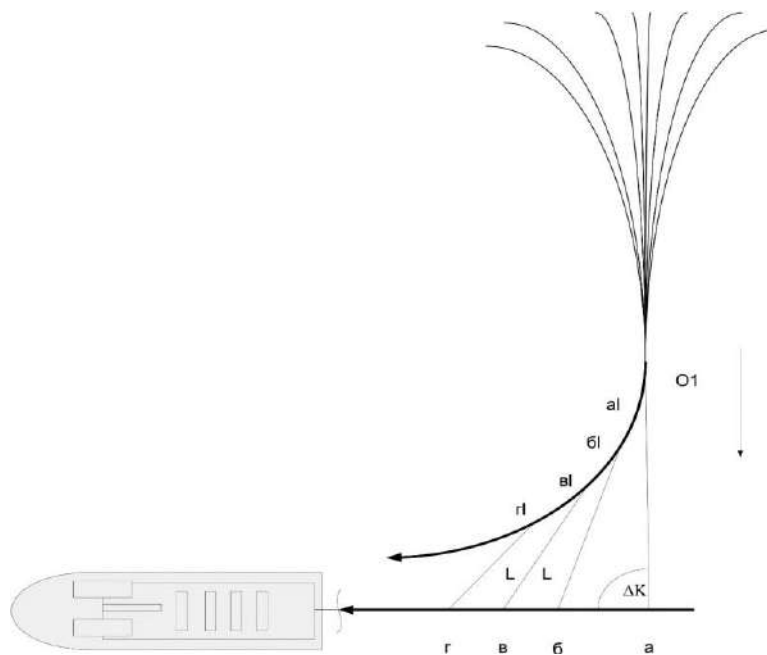


Рис. 6 – Траєкторія руху маломорехідного об'єкта при зміні курсу ΔK на 90 градусів праворуч

Але графічний метод побудови траєкторії маломорехідного об'єкта не дозволяє визначити загальні закономірності його руху залежно від головного курсу буксирувальника. А отже, виникає необхідність визначення руху буксирувальника у параметричному вигляді для визначення загальних закономірностей руху маломорехідного об'єкта.

Розглянемо рисунок в обрисі прямокутної системи координат. Траєкторія маломорехідного об'єкта є кривою другого порядку, де L – довжина дотичної та має постійне значення, а диференціальне рівняння матиме вигляд:

$$y^2 + AB^2 = L^2,$$

де $y = L \sin q_B$.

Розрахунок довжини дотичної здійснюється за виразом:

$$AB = \frac{ydy}{dx}.$$

Тоді

$$L^2 \sin^2 q_B + L^2 \sin^2 q_B (dx/dy)^2 = L^2$$

і, отже,

$$dx = ctg q_B dy.$$

Підставляючи у цей вираз значення $dy = L \cos q_B \cdot dq_B$, одержимо

$$dx = L(\cos^2 q_B / \sin q_B) dq_B,$$

а після інтегрування цього виразу остаточно знайдемо

$$x = L \ln tg(q_B/2) + L \cos q_B + C.$$

Таким чином, параметричні рівняння трактриси прямої лінії можуть бути представлені таким чином:

$$\begin{aligned} x &= L \ln tg(q_B/2) + L \cos q_B; \\ y &= L \sin q_B \end{aligned}$$

З параметричних рівнянь трактриси очевидно, що параметр q_B змінюється в інтервалі: $0 < q_B < \pi$:

$$q_B \rightarrow \begin{cases} 0, \text{ при } x \rightarrow -\infty \text{ і } y \rightarrow 0; \\ \pi, \text{ при } x \rightarrow \infty \text{ і } y \rightarrow 0; \\ \pi/2, \text{ при } x \rightarrow 0 \text{ і } y \rightarrow L. \end{cases}$$

Враховуючи отриману залежність, справедливим є твердження, що вісь абсцис є асимптотою трактриси. Для всіх значень q_B та $(\pi - q_B)$ мають однакові значення y , а значення x відрізняються лише знаком, оскільки трактриси симетрична осі ординат. Як наслідок, при симетричному русанні буксирувальника маломорехідний об'єкт має симетрично відхилитися від курсу буксирувальника (рис. 7).

Розглянемо інші властивості трактриси прямої лінії:

1. Визначення радіуса кривизни у довільній точці трактриси:

Радіус кривизни дорівнює $R_K = dS/q_B$, де

$$dS^2 = dx^2 + dy^2 = L^2(\cos^4 q_B / \sin^2 q_B) d^2 q_B + L^2 \cos^2 q_B d^2 q_B = L^2 ctg^2 q_B d^2 q_B.$$

Звідси отримаємо вираз:

$$dS = L ctg q_B dq_B. \tag{13}$$

Радіус кривизни в довільній точці трактриси можна записати так:

$$R_K = L ctg q_B. \tag{14}$$

Подальшим кроком є визначення координат центру кривизни трактриси, використовуючи радіус кривизни. Графічно для довільної точки трактриси визначаємо координати.

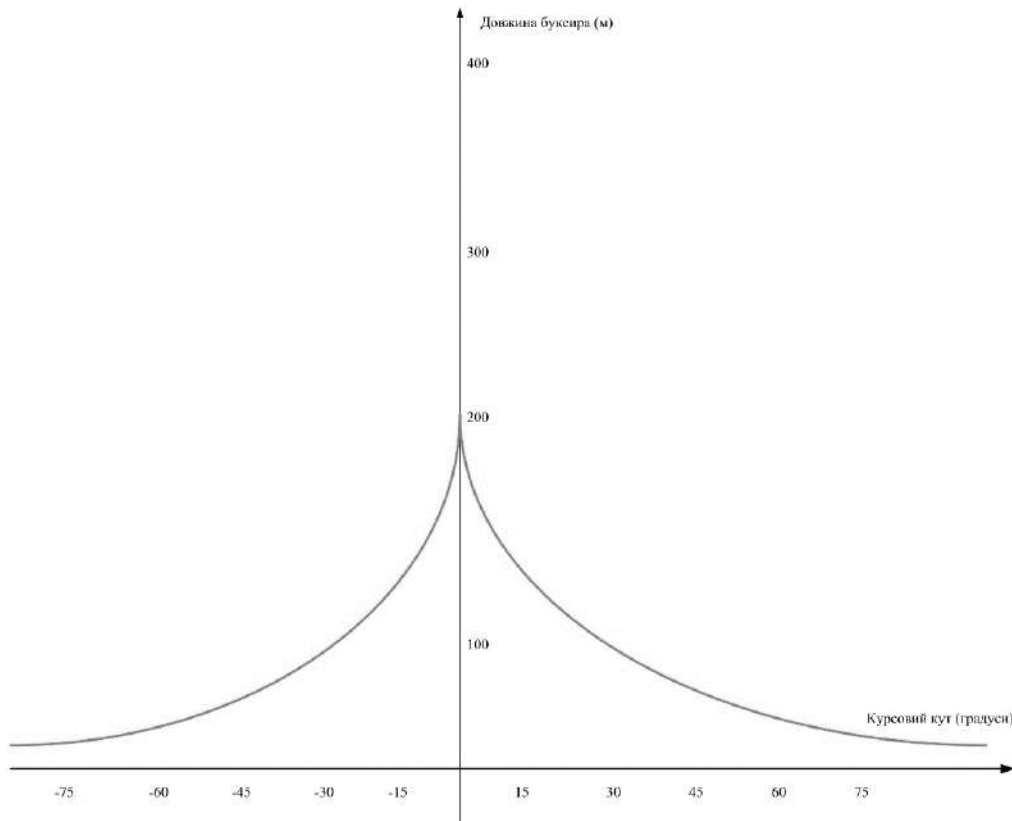


Рис. 7 – Відхилення від кутового курсу при довжині буксира $L = 200$ м

Покрокове визначення координат центру кривизни трактриси складається у такому:

– нанесення із точки A на осі абсцис відмітки на траєкторії руху маломорехідного об'єкта в точці M із радіусом $L = AM$;

– порівняння лінії перетину з перпендикуляром AN у точці N .

Оскільки $MN = L \operatorname{ctg} q_B$, то точка N є центром кривизни трактриси.

Аналогічно визначимо координати центру кривизни, спираючись на рис. 8:

$$x_K = x - L \cos q_B = L \ln \operatorname{tg} q_B;$$

$$y_K = L \operatorname{cosec} q_B.$$

Визначимо еволюту трактриси, використовуючи вираз для координат центру кривизни. Якщо кут q_B розглядати як параметр, то можна отримати параметричне рівняння еволюти трактриси. Виключаючи із цих виразів параметр q_B , знайдемо:

$$y_e = (L/2)(\exp(x/L) + \exp(-x/L)) = Lch(x/L).$$

З аналізу виразу слідує, що еволютою трактриси є ланцюгова лінія. Як наслідок, трактриса є евольвеною ланцюгової лінії (див. рис. 8).

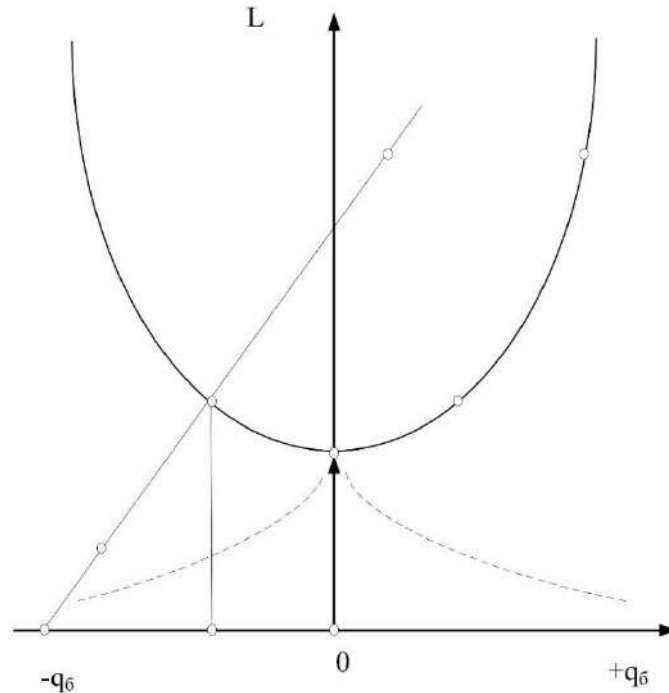


Рис. 8 – Евольвента ланцюгової лінії, де L – довжина буксирної лінії, [м]; $-q_B, +q_B$ – курсові кути на буксирований об’єкт

Довжина дуги трактриси, відкладена відносно точки $M_0(0, L)$ відповідної до довільного значення q_B , дорівнює величині (13), тобто

$$S = \int_{x/2}^{q_B} L \operatorname{ctg} q_B dq_B = -L \ln \sin q_B. \quad (15)$$

Натуральне рівняння трактриси b можна одержати, якщо усунути із виразів (14) та (15) параметр q_B :

$$R = L(\exp(2S/L) - 1)^{1/2}.$$

Розглянемо кінематичні властивості трактриси прямої лінії.

Нехай точка A рухається вздовж прямої з постійним вектором швидкості V . Визначимо параметричні рівняння руху точки B :

$$\begin{aligned} x_B &= x_A - L \cos(\pi - q_B), \\ y_B &= L \sin q_B \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} x_B &= x_A - L \cos q_B, \\ y_B &= L \sin q_B. \end{aligned} \quad (16)$$

Якщо $x_A = vt$, де t – час, то система рівнянь (16) матиме вигляд

$$\begin{aligned} x_B &= vt - L \cos q_B, \\ y_B &= L \sin q_B. \end{aligned} \quad (17)$$

Для початкових умов $x = 0, q_B = \pi/2$ рівняння трактриси у параметричній формі доцільно записати як:

$$\begin{aligned} x_B &= L \ln \operatorname{tg}(q_B/2) + L \cos q_B, \\ y_B &= L \sin q_B. \end{aligned}$$

Підставляючи дві останні системи рівностей, одержимо

$$vt = L \ln \operatorname{tg}(q_B/2)$$

або

$$tg(q_B/2) = \exp(vt/L).$$

Використовуючи відомі тригонометричні формули, опишемо $\sin q_B$ і $\cos q_B$:

$$\begin{aligned} \sin q_B &= (2 \exp vt/L)(1 + \exp 2vt/L), \\ \cos q_B &= (1 - \exp 2vt/L)(1 + \exp 2vt/L). \end{aligned}$$

Зазначимо, що праві частини формул є гіперболічними функціями

$$\begin{aligned} \sin q_B &= \operatorname{sch}(vt/L), \\ \cos q_B &= -\operatorname{th}(vt/L). \end{aligned}$$

Оперуючи останніми формулами, отримаємо параметричні рівняння руху сейсмичного обладнання:

$$\begin{aligned} x_B &= vt - L \operatorname{th}(vt/L), \\ y_B &= L \operatorname{sch}(vt/L). \end{aligned} \quad (18)$$

Рівняння руху сейсмичного обладнання дозволяють визначити проекції швидкості на осі координат:

$$\begin{aligned} v_{Bx} &= dx/dt = v_t h^2(v_t/L), \\ v_{By} &= dy/dt = -v \operatorname{sch}(-v_t/L)/ch^2(v_t/L) \end{aligned}$$

і, відповідно, модуль вектора швидкості:

$$v_B = v_t h(v_t/L) = -v \cos q_B.$$

Використовуючи систему рівностей (18), можна знайти прискорення точки B , відповідно, на осях OX і OY :

$$\begin{aligned} w_{Bx} &= d^2x/dt^2 = (2v^2/L)\operatorname{sch}^2(v_t/L)\operatorname{th}(v_t/L), \\ w_{By} &= d^2y/dt^2 = (v^2/L)\operatorname{sch}(v_t/L)(2\operatorname{th}^2(v_t/L) - 1). \end{aligned}$$

Модуль прискорення в точці B матиме вигляд:

$$w_B = (v^2/L)\operatorname{sch}(v_t/L) = (v^2/L).$$

Для дотичного прискорення в цій точці отримаємо

$$w_{Bt} = (v^2/L)\operatorname{sch}^2(v_t/L),$$

а для нормального прискорення справедливим є вираз

$$w_{Bn} = (v^2/L)\operatorname{sch}(v_t/L)\operatorname{th}(v_t/L).$$

Враховуючи взаємозв'язок між тригонометричними та гіперболічними функціями, отримаємо

$$q_B = \arcsin(\operatorname{sch}(v_t/L)).$$

Кутова швидкість і кутове прискорення відрізка AB дорівнює:

$$\begin{aligned} \omega &= -(v/L)\operatorname{sch}(v_t/L), \\ \varepsilon &= (v^2/L^2)\operatorname{th}(v_t/L)\operatorname{sch}(v_t/L). \end{aligned}$$

Враховуючи властивості гіперболічних функцій, швидкість маломорехідного об'єкта при буксированні здатна змінюватися від нуля при $t = 0$ до значення v при $t \rightarrow \infty$.

Аналогічно методу визначення швидкості маломорехідного об'єкта при буксированні, можна визначити інші кінематичні характеристики, наприклад, траєкторію руху маломорехідного об'єкта при його буксированні з врахуванням відхилення судна-буксира. Визначені особливості кінематичного стану маломорехідного об'єкта дозволять врахувати його параметри при роботі проекту буксировання й плану буксировання лінією із врахуванням умов навколишнього середовища із дотриманням норм навігаційної безпеки.

Висновки

Таким чином, одержав подальший розвиток метод визначення траєкторії сейсмічного обладнання при стаціонарному характері морського буксирування, який на відміну від відомих, відрізняється заміщенням руху складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання на їх характерні точки, що дозволяє при швидких і помірних змінах курсу буксирувальника розглядати траєкторію сейсмічного обладнання як плоску криву, визначити при буксируванні різні кінематичні характеристики маломорехідного об'єкта і враховувати їх при розробці проекту буксирування для різноманітних умов навколишнього середовища із дотриманням норм навігаційної безпеки.

Перелік використаних джерел:

1. Технологія видобування нафти / Орловський В.М., Білецький В.С., Вітрик В.Г., Сіренко В.І. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП, «Бурова техніка», Львів, «Новий Світ – 2000», 2022. 308 с.
2. Голиков В.А., Мальцев А.С. Концепция создания системы гарантированной безопасности управления морскими подвижными объектами. *Судовождение*. 2007. Вып. 13. С. 58-74.
3. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу. Київ : Вид. група BHV, 2007. 546 с.
4. Polydorides N., Storteig E., Lionheart W. Forward and inverse problems in towed cable hydrodynamics. *Ocean Engineering*. 2008. Vol. 35. No. 14-15. Pp. 1429-1438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.07.00>.
5. Ткаченко І.О. Ризики у транспортних процесах : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 114 с.
6. Aven T. Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 253. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>.
7. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. 2018. 16 p.
8. Risk focus: loss of power. URL: <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2022/03/Main-engine-Risk-Focus-Loss-of-Power.pdf> (дата звернення: 15.04.2023).
9. Ларін О.О., Водка О.О., Потопальська К.Є. Комп'ютерне та математичне моделювання в задачах прогнозування надійності при поступових відмовах : монографія. Харків : Юрайт, 2020. 232 с.
10. Моделювання складних систем : монографія / за заг. ред. В.М. Соловйова. Черкаси: Брама, видавець Третьяков О. М., 2015. 354 с.
11. Lu S., Pereverzev V. Numerical differentiation from the view point of regularization theory. *Mathematics of Computation*. 2006. Vol. 75. No. 256. Pp. 1853-1870. DOI: <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-06-01857-6>.

References:

1. V.M. Orlovskiy, V.S. Biletskyi, V.H. Vitryk, and V.I. Sirenko, *Tekhnolohiia vydobuvannia nafty* [Oil extraction technology]. Kharkiv, Ukraine: KhNUMH im. O. M. Beketova Publ., NTU «KhPI» Publ., TOV NTP Publ., «Burova tekhnika» Publ., Lviv: «Novyi Svit – 2000» Publ., 2022. (Ukr.)
2. V.A. Holykov, and A.S. Maltsev, «Kontseptsiya sozdaniya systemy harantirovannoi bezopasnosti upravleniya morskymu podvyzhnimu ob'ektam» [«The concept of creating a system of guaranteed safety for managing marine mobile objects»], *Sudovozhdenye – Shipping & Navigation*, vol. 13, pp. 58-74, 2007. (Rus.)
3. M.Z. Zghurovskiy, and N.D. Pankratova, *Osnovy systemnoho analizu* [Fundamentals of system analysis]. Kyiv, Ukraine: BHV Publ., 2007. (Ukr.)
4. N. Polydorides, E. Storteig, and W. Lionheart, «Forward and inverse problems in towed cable hydrodynamics», *Ocean Engineering*, vol. 35, no. 14-15, pp. 1429-1438, 2008. doi: **10.1016/j.oceaneng.2008.07.00**.
5. I.O. Tkachenko, *Ryzyky u transportnykh protsesakh : navchalnyi posibnyk* [Risks in transport processes: a study guide]. Kharkiv, Ukraine: KhNUMH im. O. M. Beketova Publ., 2017. (Ukr.)

6. T. Aven, «Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation», *European Journal of Operational Research*, vol. 253, pp. 1-13, 2016. doi: **10.1016/j.ejor.2015.12.023**.
7. *Risk management – Guidelines*, ISO 31000:2018, 2018.
8. Risk focus: loss of power [Online]. Available: <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2022/03/Main-engine-Risk-Focus-Loss-of-Power.pdf>. Accessed on: April 15, 2023.
9. O.O. Larin, O.O. Vodka, and K.Ie. Potopalska, *Kompiuterne ta matematychnе modeliuвання v zadachakh prohnozuvannya nadiinosti pry postupovykh vidmovakh : monohrafiia* [Computer and mathematical modeling in the problems of predicting reliability with gradual failures: monograph]. Kharkiv, Ukraine: Yurait Publ., 2020. (Ukr.)
10. *Modeliuвання skladnykh system : monohrafiia* [Modeling of complex systems: monograph], V.M. Soloviov, Ed., Cherkasy, Ukraine: Tretiakov O.M. Publ., 2015. (Ukr.)
11. S. Lu, and V. Pereverzev, Numerical differentiation from the view point of regularization theory, *Mathematics of Computation*, vol. 75, no. 256, pp. 1853-1870, 2006. doi: **10.1090/S0025-5718-06-01857-6**.

Рецензент: А.І. Головань
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 15.08.2023
Стаття прийнята 19.09.2023

УДК 629.5.05

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300121

© Мельник О.В.¹, Сорока В.В.²

ВІБРОДІАГНОСТИКА ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ СУДЕН: ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ

Дослідження присвячено розробці комплексного підходу вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту. Удосконалюється метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів. Удосконалюється метод автоматичної адаптації порогових значень для своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів. У ході дослідження сформульовані особливості спектрів вібраційних сигналів роторного обладнання та проведено їх аналіз з точки зору оцінки параметрів діагностично значимих компонентів. Для оцінки поточної працездатності СЕУ на судах традиційно використовуються автоматичні системи централізованого контролю та управління. Їх основним призначенням є оцінка якості виконання СЕУ заданих експлуатаційних режимів. Але дані системи не дозволяють вирішити завдання завчасного прогнозування втрати працездатності найбільш навантажених і схильних до відмови елементів СЕУ – роторних машин, оскільки контрольовані параметри технологічних процесів є або інерційними і не змінюються синхронно з розвитком несправностей, або не реагують на розвиток ряду небезпечних дефектів аж до наступу незворотних наслідків. Отримав подальший розвиток метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій.

¹ канд. техн. наук, доцент, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-0089-6535, melnik81@ukr.net

² здобувач ступеня доктора філософії, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-7581-7141

Ключові слова: суднова енергетична установка, судно, засоби водного транспорту, вібродіагностика, підшипник, вал, вібраційний сигнал, роторна машина, спектр, машина, обладнання, експлуатація.

O.V. Melnik, V.V. Soroka. Vibration diagnostics of the main power plant of vessels: improvement and integration of methods. The study is devoted to the development of a comprehensive approach to vibration diagnostics of the main power plant of water transport vehicles. The method of automatic processing of narrowband spectra is being improved. The method of automatic adaptation of threshold values for timely detection of changes in technical condition against the background of natural monotonous changes in vibration parameters characteristic of ship conditions is being improved. In the course of the study, the peculiarities of the spectra of vibration signals of rotary equipment were formulated and their analysis was carried out from the point of view of evaluating the parameters of diagnostically significant components. Automatic systems of centralized control and management are traditionally used to assess the current performance of SEU on ships. Their main purpose is to assess the quality of the SEU performance of the specified operating modes. But these systems do not allow solving the task of early prediction of the loss of performance of the most loaded and failure-prone SEU elements - rotary machines, because the controlled parameters of technological processes are either inertial and do not change synchronously with the development of faults, or do not react to the development of a number of dangerous defects until the onset irreversible consequences. The method of automatic diagnostics was further developed based on the results of monitoring vibration parameters of various nature and the assessment of the diagnostic significance of their changes against the background of natural monotonous fluctuations.

Key words: ship power plant, ship, means of water transport, vibration diagnostics, bearing, shaft, vibration signal, rotary machine, spectrum, machine, equipment, operation.

Постановка проблеми: Основними методами підвищення надійності і безпеки функціонування суднових енергетичних систем (СЕУ) при їх проектуванні та експлуатації є:

- удосконалення їх конструкції;
- технології виробництва та обслуговування;
- резервування;
- збільшення коефіцієнта запасу;
- контроль працездатності.

Для великих агрегатів у складі СЕУ резервування та підвищення коефіцієнта запасу нецільне економічно та неможливо через необхідність збільшення маси та габаритів. Отже найважливішим напрямом підвищення надійності та безпеки функціонування таких агрегатів стає оцінка та прогноз їх працездатності під час експлуатації.

Для оцінки поточної працездатності СЕУ на судах традиційно використовуються автоматичні системи централізованого контролю та управління. Їх основним призначенням є оцінка якості виконання СЕУ заданих експлуатаційних режимів. Але дані системи не дозволяють вирішити завдання завчасного прогнозування втрати працездатності найбільш навантажених і схильних до відмови елементів СЕУ – роторних машин, оскільки контрольовані параметри технологічних процесів є або інерційними і не змінюються синхронно з розвитком несправностей, або не реагують на розвиток ряду небезпечних дефектів аж до наступу незворотних наслідків.

Такі системи функціонують, як правило, за участю експерта, а глибина діагностування та час прогнозу дозволяють не лише запобігти аварійним ситуаціям, а й заздалегідь запланувати обслуговування та ремонт, що у багатьох випадках дає суттєвий економічний ефект. Аналіз відомих методів автоматичної обробки вібраційного сигналу та виділених з нього параметрів виявив проблеми їх застосування в суднових умовах, що обмежують ефективність діагностування роторних машин СЕУ через властиві їм флуктуації частоти обертання та віброактивності.

Ці методи можна використовувати як у інформаційних системах для підтримки прийняття рішень оператором та організації обслуговування за фактичним станом, так і у автоматичних системах керування технічними засобами на основі фактичних даних. Тому розвиток методів автоматичного аналізу та обробки вібраційних параметрів з метою підвищення ефективності

діагностики головних енергетичних установок в умовах складної експлуатації є важливою темою для наукових досліджень.

Метою даної статті є дослідження методів підвищенні ефективності діагностування елементів головної енергетичної установки водного транспорту із застосуванням методів вібродіагностики.

Аналіз останніх досліджень. Останні десятиріччя характеризуються активними дослідженнями застосування вібраційних методів для контролю технічного стану СЕУ, оскільки вібрація постійно супроводжує працюючий механізм з рухомими частинами. Зміни у вібрації у порівнянні з нормальною роботою механізму несуть інформацію про характер взаємодії і дозволяє прогнозувати зміни технічного стану обладнання з виявленням можливих дефектів конкретних вузлів.

У 1939 році була опублікована фундаментальна стаття [1], присвячена оцінюванню технічного стану машин із низькою частотою обертання через амплітуду вібрації. Велику увагу було приділено вимірюванню вібропереміщення валу шляхом застосування проксиметрів, які дозволяли виявляти наявність автоколивань валу в підшипниках ковзання [2].

З часом стало зрозуміло, різні частотні області спектру корелюються з різними несправностями: це дозволило удосконалити оцінку технічного стану обладнання [3]. Але при цьому було зареєстровано непоодинокі випадки, коли при експлуатації систем вимірювана низькочастотна вібрація не змінювалася, а, навпаки, виникали випадки суттєвої зміни середньочастотної та високочастотної вібрації, що не приводило до вчасного виводу агрегату з експлуатації. А наслідком ставали аварійні ситуації [4]. Отже, визначення дійсного технічного стану обладнання можливо лише при використанні всього частотного спектру вібрації з допомогою різних методів.

Водночас з таким переходом активно втілювалися цифрові методи обробки інформації. Поєднання цифрових методів обробки інформації з роботою у різних діапазонах спектру дозволило точніше й оперативніше виділяти різні дефекти методами вібраційної діагностики із застосуванням різних частотних компонентів [5]. Одними із найпоширеніших методів аналізу стали методи, що використовували перетворення Фур'є [6], і метод ударних імпульсів (МУІ). Сутність останнього полягала у порівнянні величин високочастотних ударних імпульсів із рівнем фону. Результатом створення аналізаторів, що використовують швидке перетворення Фур'є (ШПФ), та широкого втілення цифрових технологій стала автоматизація процесів діагностики результатом з використанням багатоканальної системи моніторингу, заснованій на аналізі спектрів.

Глибока діагностика технічного стану обладнання за допомогою постійно підключених датчиків є основним методом моніторингу обладнання, де несправності виявляються через добре відомі симптоми [2]. Цей метод добре працює в однорежимному обладнанні; для багаторежимного обладнання – ситуація дещо інша і потребує безперервного вимірювання всіх діагностичних параметрів.

Дисперсія гармонійних і випадкових компонентів сигналу при вимірюванні вибіркового спектра у процесі вібродіагностики часто приводить до помилок. Вони усуваються методом Уелша або з використанням вікна Хана.

Так, у роботі [7] досліджено використання різних віконних функцій для аналізу сигналів та робиться висновок, що з вікон з малою шириною основного пелюстка (прямокутне, синусоїдальне, Хана та Хемінга) вікно Хана – це найкраща функція, що має мінімальну похибку оцінки середньоквадратичного значення (СКЗ) як гармонійного, так і полігармонійного сигналу.

Однак у даному спектрі спотворюються несинхронні складові, які можуть мати важливе діагностичне значення [8]. При таких спотвореннях втрачається важлива інформація про параметри даних компонентів, а змінюється фон спектру, оцінка якого є інформативною.

Важливим параметром вимірювання є частота, яка визначає точність подальшої ідентифікації дефекту. Для уточнення оборотної частоти піків вищих гармонік даної частоти поділяються на відповідні кратності [9]. Такий підхід дає суттєві помилки, оскільки частоти піків кратних гармонік можуть відхилитися від реальних частот.

У роботі [10] розглядається оцінка частоти синусоїдальної складової спектру по сусіднім частотним складовим спектру з використанням інтерполяції частотної функції прямокутного вікна. Але даний спосіб має низькі рівні сусідніх з максимальних відліків, що призводить до зменшення точності оцінки. Для підвищення точності використовують накладення частотних вікон, які підвищують кореляцію між сусідніми відліками спектра.

Суднові умови характеризуються девіацією частоти обертання і високим рівнем фону, а розглянуті методи аналізу є обмежено ефективними. Тому запропоновано використовувати спектральний аналіз для огинаючої вихідного сигналу, виділеної в певній заданій високочастотній області, що застосовується для глибокого вібродіагностування підшипників кочення [11]. Спектр огинаючої вихідного сигналу також вимагає подальшого аналогічного аналізу з метою оцінки періодичних та випадкових компонентів.

Таким чином, наведений аналіз свідчить про необхідність розробки комплексного методу діагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту на основі вібраційного аналізу.

Виклад основного матеріалу. Для вилучення із спектрів вібрації параметрів різної природи розроблено метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів. Сигнал вібрації роторного обладнання працюючої головної енергетичної установки (ГЕУ) може містити в собі компоненти різної природи – періодичні, випадкові та імпульсні, відомі методи виділення. При цьому основним видом аналізу, що дозволяє визначити параметри періодичних, стаціонарних випадкових і періодичних імпульсних компонент, є спектральний аналіз вібрації вихідного сигналу і високочастотної вібрації. Спектр сигналу несе в собі інформацію про залежність розподілу потужності сигналу від частоти, в ньому немає явної інформації про наявність і параметри гармонійних або випадкових процесів, і для того, щоб витягти цю інформацію, потрібен додатковий аналіз. Такий аналіз може проводитися оператором візуально, проте для суднових умов необхідна його автоматизація.

Спектри вібраційного сигналу реального роторного обладнання якісно відрізняються від спектрів сигналів, аналізованих у різних інших сферах, таких як радіотехніка, також відрізняється мета обробки спектрів. Вібрація порушується різними за фізичною природою коливальними процесами, кожен з яких робить свій внесок у результуючий сигнал.

Отже, вібраційний спектр має складну структуру та містить у собі різну кількість складових частин, кожна з яких може нести діагностичну інформацію. Так, спектр вібрації насоса може містити всього два-три гармонійні ряди, кратних частоті обертання, кожен з яких складається з декількох складових (рис. 1).

Спектри суднового насоса

Спектри суднового двухступеневого планетарного редуктора

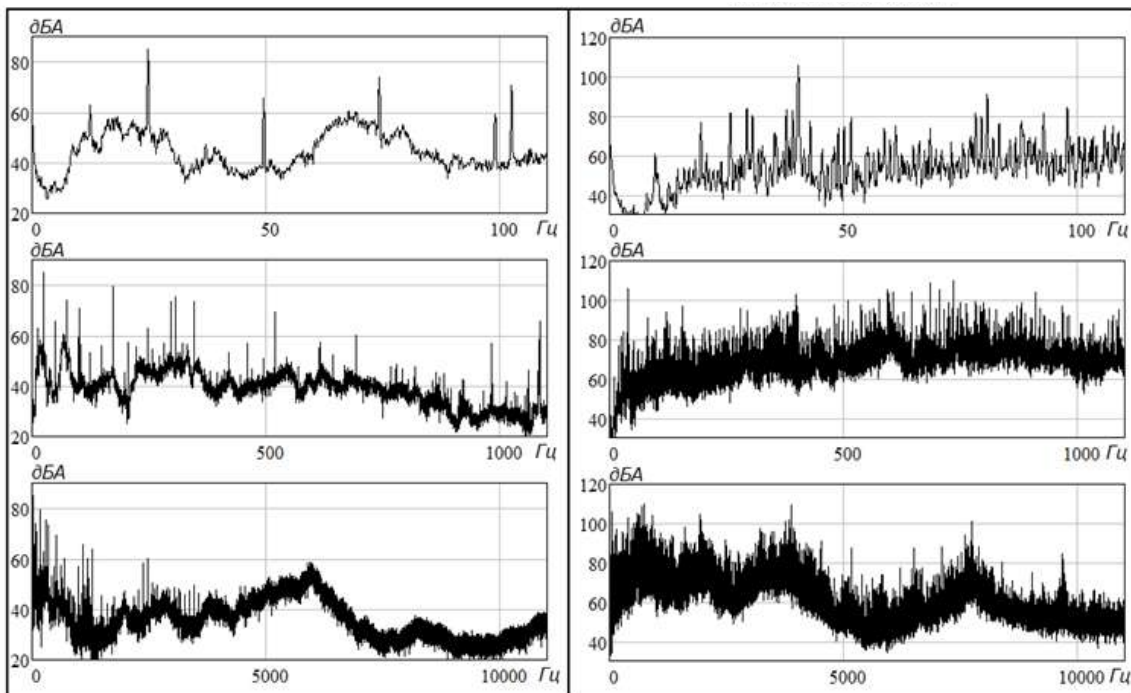


Рис. 1 – Спектри вібрації суднового насоса та планетарного суднового редуктора (Джерело: [12])

Спектр складного суднового агрегату СЕУ, наприклад, турбогенератора, може містити більше 10 різних гармонійних рядів, кожен з яких може містити десятки гармонік. Різні за фізичною природою процеси призводять до появи окремих компонентів у сигналі та його огинаючої і, відповідно, у спектрі вібрації. При цьому існує низка факторів, що призводять до спотворення форми гармонійних складових у спектрах вібрації:

- невіршеність (накладення) близько розташованих за частотою гармонійних складових;
- нестабільність частоти обертання;
- низьке відношення рівня гармоніки до рівня фону біля неї.

На відміну від багатьох інших областей застосування спектрального аналізу корисну інформацію про процеси, такі як тертя, мікроудари, характер взаємодії рухомого середовища (рідини або газу) з обертовими та нерухомими елементами машини та ін., несе в собі розподіл фону спектру, параметри якого також необхідно визначати, оцінювати та використовувати для контролю технічного стану об'єкта. Вказані особливості вібраційного сигналу повинні враховуватися при розробці алгоритму автоматичного аналізу спектрів.

Аналіз спектрів різних типів реального роторного обладнання, у т.ч. суднових планетарних редукторів, газових турбін, насосів, електромашинних перетворювачів та інших об'єктів, дозволив визначити характерні для суднових умов особливості, що ускладнюють такий аналіз:

1. Нестабільність частоти обертання, викликана змінними навантаженнями на вузли через качку, нестабільність мережі живлення, роботи систем регулювання та інших значущих факторів.

2. Сильний взаємовплив близько розташованих машин через обмеженість приміщень, що проявляється як у спектрах конкретної машини компонент, джерелами виникнення яких є взаємодія інших елементів машинах.

У процесі візуального аналізу спектрів реального обладнання та виходячи з досвіду вивчення різних модельних сигналів, що генеруються в середовищі Mathcad, у ході дослідження сформульовані такі особливості спектрів вібраційних сигналів роторного обладнання та їх аналізу з точки зору оцінки параметрів діагностично значимих компонентів:

1. Спектр вібрації роторної машини в логарифмічних величинах (дБ) представляється вузькими викидами (рис. 2) на фоні обмеженого розкиду відліків, біля деякої плавної кривої. При цьому подібні викиди інтерпретуються як гармонійні складові спектру, а решта всіх відліків як фон, що характеризує випадкові складові.

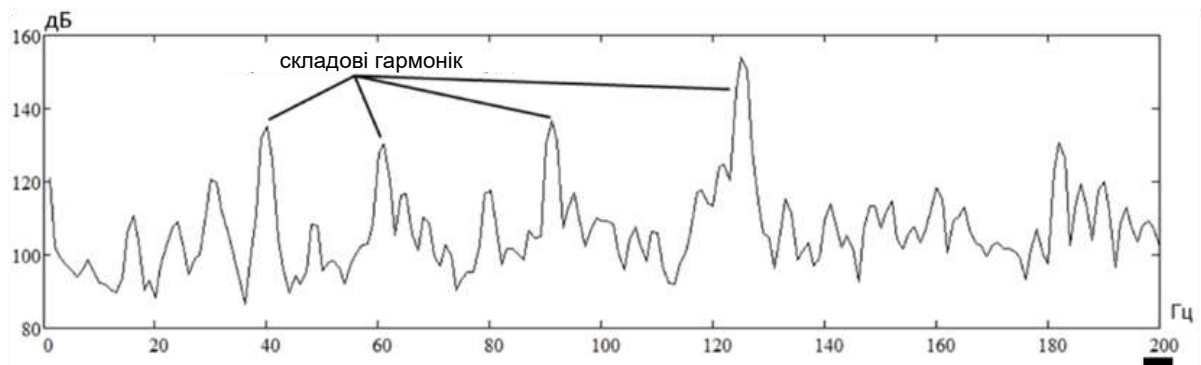


Рис. 2 – Гармонічні складові у спектрі вібрації планетарного суднового редуктора (результати візуального аналізу) (Джерело: [12])

2. Кількість відліків у спектрі, що характеризують гармонійні складові, як правило, набагато менше (у більшості випадків й на порядок більше) кількості відліків, що визначаються випадковими складовими, які входять до області обмеженого розкиду. У більшості спектрів типових агрегатів щільність гармонійних складових падає зі зростанням частоти.

3. Ознакою гармонійної складової, крім значного перевищення над фоном, є її обмежена ширина та характерна форма, які залежать від віконного перетворення, що застосовується в ШПФ. Форма гармонійних складових спектра трохи перевищує фон, спотворюється тим сильніше, чим нижче відносний до фону рівень гармоніки. Частота гармонійної складової близька до

максимальної частоти відліку (з точністю до половини ширини частотної лінії). Для того, щоб частота гармоніки збіглася з частотою спектрального відліку, спектр має бути побудований за цілою кількістю періодів, що відповідають частоті даної гармоніки [13]. Проте, практично немає сенсу проводити вибірку, спираючись на частоту конкретної компоненти, оскільки у сигналі можуть бути компоненти інших некротних її частот.

4. Збільшення кількості усереднень спектра призводить до зниження рівня розкиду випадкових компонентів, що позитивно позначається на виділенні гармонік з рівнями, порівнянними з фоном, але призводить при цьому до спотворення форми гармонік за їх нестабільних частот через збільшення тривалості вимірювання. Частоти більшості гармонійних складових у спектрі пов'язані лінійно з частотою обертання одного з роторів, тому наявність вузьких викидів з однаковою шириною по всій частотній ділянці спектра характеризує відносну стабільність частот обертання роторів у порівнянні з обраним частотним дозволом. Зростання ширини і спотворення форми викидів зі зростанням частоти свідчить про значну девіацію частоти обертання агрегату проти обраного частотного еталону. Наявність окремих широких складових у спектрі за відсутності ознак значної зміни частоти обертання свідчить про наявність у цій області невирішених за частотою гармонік. При девіації частоти енергія кожної гармонійної компоненти розподіляється за кількома частотним лініями, а оцінка її рівня за максимальним відліком дає істотну помилку, оскільки містить лише частину її потужності.

5. Істотним викидам відліків спектра також можуть відповідати резонанси, які підсилюють коливання в локальних частотних областях, проте їх ширина, як правило, значно перевершує ширину кількох нерозв'язаних гармонік, що йдуть поспіль. Також у деяких агрегатах можуть бути коливальні процеси, частоти яких не пов'язані лінійно із частотою обертання валу (одного з кількох валів). Прикладом таких процесів можуть бути складові, пов'язані з обертанням електромагнітного поля, які, у разі асинхронного двигуна, при зміні частоти обертання залишаються незмінними або коливання, які не пов'язані із взаємодією елементів досліджуваного агрегату, а передаються ззовні через коливання тиску середовищ або безпосередньо через жорстку механічну зв'язку, наприклад, від навісного допоміжного обладнання чи розташованого поблизу машин, особливо у обмежених за розміром суднових приміщеннях.

Виходячи з особливостей, розглянутих вище, можна сформулювати такі вимоги до автоматичного аналізу спектрів вібрації суднових машин:

1. Повинні ідентифікуватися викиди спектральних відліків, що відповідають гармонійним складовим спектру, за якими має визначатися їх частота та рівень.

2. Зі спектру повинна отримуватися інформація про розподіл потужності випадкових складових за рахунок видалення знайдених гармонійних складових.

3. Повинне відбуватися визначення параметрів гармонійних складових при девіації частоти обертання, характерної для суднових умов.

4. Має бути передбачено спосіб оцінки стабільності частоти обертання за відсутності датчика оборотів (неможливості його установки).

Точність визначення частоти гармонійної компоненти має вкрай важливе значення, оскільки саме за частотою здійснюється її ідентифікація (рішення про віднесення її до того чи іншого гармонійного ряду). Точність ідентифікації рівня гармонійної компоненти має бути прийнятною, оскільки діагностично значуще зростання визначається зміною в рази [12], а похибка навіть у 20-30% може бути цілком допустимою.

У спектрі роторного обладнання частка спектральних відліків, рівень яких визначаються гармонічними процесами, в рази (а здебільшого в десятки разів) менше частки відліків з переважним внеском випадкових складових, який називають фоном спектра. При цьому розподіл відліків фону у відносних одиницях (дБ) має обмежений розкид біля деякої кривої лінії фону, який залежить від кількості спектрів усереднень. Визначення цієї лінії, яка використовується для пошуку гармонійних складових, є основним завданням.

Для отримання згладженої лінії фону необхідно виключити вплив гармонійних складових, що реалізується за допомогою алгоритму, блок-схема якого наведена на рисунку 3.

За вихідним спектром в лінійних одиницях (СКЗ спектру), зведеному в ступінь 1/4 для звуження інтервалу розкиду фону (форма спектра стає аналогічною поданням у дБ), розраховується лінія фону L за допомогою зустрічного експоненційного згладжування з коефіцієнтом згладжування α [3].

Потужність даної лінії повинна відповідати потужності фону, для цього слід використовувати нормувальний коефіцієнт K_n , що залежить від кількості усереднень спектра та коефіцієнта згладжування. Якщо відліки вхідного спектра вищі за розраховану лінію порога $L * K_p^{1/4}$, то вони наводяться до лінії фону L . У результаті даної операції розраховується спектр фону SpF . Якщо необхідно, процедура згладжування та приведення викидів до фону повторюється K_f разів, при цьому на вході згладжування замість вихідного спектру використовується SpF , отриманий на попередньому кроці, також можуть використовуватись інші значення K_p, K_n та α .

Коли досягнута необхідна кількість ітерацій видалення викидів, із спектру Sp в окремий масив SpG виділяються відліки вихідного спектру, які перевищили останній поріг до лінії фону. Даний масив визначає відліки, які відповідають гармонійним складникам, і далі використовуються для ідентифікації їх параметрів. Аналогічний алгоритм можна застосувати і для значень спектра в дБ, перевівши коефіцієнти K_p та K_n в дБ, й використати підсумовування відносних одиниць замість множення на коефіцієнт.

При згладжуванні необхідно враховувати, що перші відліки спектру можуть визначатися постійною складовою сигналу, яка не пов'язана із випадковими процесами і може спотворити згладжену лінію.

Згладжування є фільтрацією і призводить до зміщення (затримки) вихідних даних щодо вхідних [4]. Для виключення даного впливу пропонується проводити згладжування відліків спектра у прямому, а потім у зворотному порядку (реверс) з подальшим обчисленням середнього за двома результатами.

Аналіз способів визначення діагностично значущих змін вібрації обладнання свідчить про необхідність розробки методу визначення порогових значень обладнання, специфіка роботи якого пов'язана з природними перехідними процесами різної тривалості.

Перехідний процес – це процес зміни параметра від одного встановленого значення до іншого, який може характеризуватись тривалістю та швидкістю зміни (постійний час). Але значень, що встановилися, може і не бути, як у випадку температури зовнішнього середовища, яка постійно змінюється. Багаторічний досвід аналізу вібрації обладнання в процесі експлуатації та різні джерела, у т. ч. державні стандарти, свідчать, що флуктуації віброактивності машин та обладнання часто не є випадковими, зміни можуть мати монотонний різноспрямований характер навіть у режимах роботи, що встановилися, що викликано різними змінами (рис. 3):

- температурний (прогрів машини, коливання температури навколишнього або робочого середовища);
- механічний (коливання навантаження, у тому числі через хитавицю);
- гідродинамічний (зміни параметрів потоку);
- електромагнітний (коливання параметрів мережі живлення).

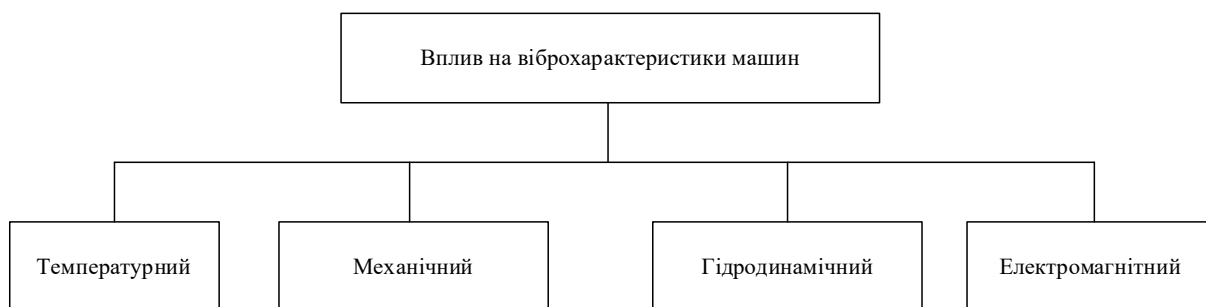


Рис. 3 – Класифікація впливу на віброхарактеристики машин (розроблено авторами)

Робота конкретного агрегату може супроводжуватись декількома подібними природними явищами, які можуть призводити до монотонних змін величин діагностичних вібраційних параметрів, значно відмінних від їх випадкових флуктуацій. Причому кожне з подібних явищ характеризується діапазоном зміни фактору, що впливає на вібрацію. Так, при пуску та прогріві температура елементів справної роторної машини піднімається до деякого певного значення, яке також залежить від температури навколишнього і робочого середовища, а діапазон змін

навантаження визначається технологічним процесом і властивостями агрегату. Вплив хитавиці визначається її допустимими кутами.

Більшість природних фізичних процесів, таких як прогрів або деградація, змінюється експоненційно і також призводить до експоненційних змін вібраційних параметрів. Часто зміни відбуваються стрибкоподібно або лінійно, рідше – за іншими законами, що призводить до аналогічних змін вібраційних параметрів. Деградація також може відбуватися стрибкоподібно при зовнішній дії, такий як порушення технологічного процесу, аварії даного чи пов'язаного агрегату (загальним технологічним процесом та іншими видами зв'язків).

Перехідний процес складної форми можна представити сукупністю перехідних процесів, кожен із яких наближено описується певною типовою функцією (пряма, експонента та інші). У свою чергу, кожен з таких простих перехідних процесів пов'язаний зі зміною одного з факторів, що впливають. Головним завданням при аналізі вібраційних параметрів під час природних перехідних процесів є виділення й обробка даних перехідних процесів змін, пов'язаних з деградацією технічного стану.

Традиційним методом побудови порогових значень параметрів, відповідно до стандартів вібродіагностики, є визначення базового значення як середнього з оцінкою розкиду значень у стабільному режимі роботи об'єкта, використовуючи дані, отримані за кілька послідовних вимірювань через значні проміжки часу [4].

Також у стандартах рекомендується визначати різні базові значення різних можливих значень робочих характеристик, поділяючи, таким чином, контроль у різних режимах. Однак на практиці ця вимога є складною, оскільки контроль зміни всіх впливових показників є проблематичним, а набір режимів може бути досить великим. Це викликано тим, що доводиться враховувати різні комбінації факторів, які впливають на дослідження.

Тому, зазвичай виділяють обмежену кількість режимів, як правило, за частотою, навантаженням (споживаним струмом) або іншим найбільш значущим для віброактивності об'єкта параметром при можливості їх контролю. При цьому як базове значення для кожного режиму встановлюється середнє, а порогові враховують максимальний розкид за час спостереження, що охоплює найтриваліші монотонні різноспрямовані зміни.

Якщо за час спостереження виявляється лише одна тенденція і є ознаки конкретних дефектів, це інтерпретується як деградація. Такий спосіб можна назвати стандартним, оскільки він є найбільш застосовним на практиці та відповідає ряду стандартів у галузі моніторингу та діагностики з вібрації [1-5]. При цьому навіть у межах одного виділеного режиму можуть бути суттєві флуктуації віброактивності через зміни різних факторів, які, як було наведено раніше, можуть призводити до недостовірної ідентифікації стану обладнання залежно від того, де знаходиться контрольований параметр щодо інтервалу природних змін під час початку деградації, і від того яка швидкість деградації має місце.

Як приклад таких змін розглянемо часовий тренд рівня гармоніки з частотою обертання газової турбіни, у складі турбогенератора (рис. 4).

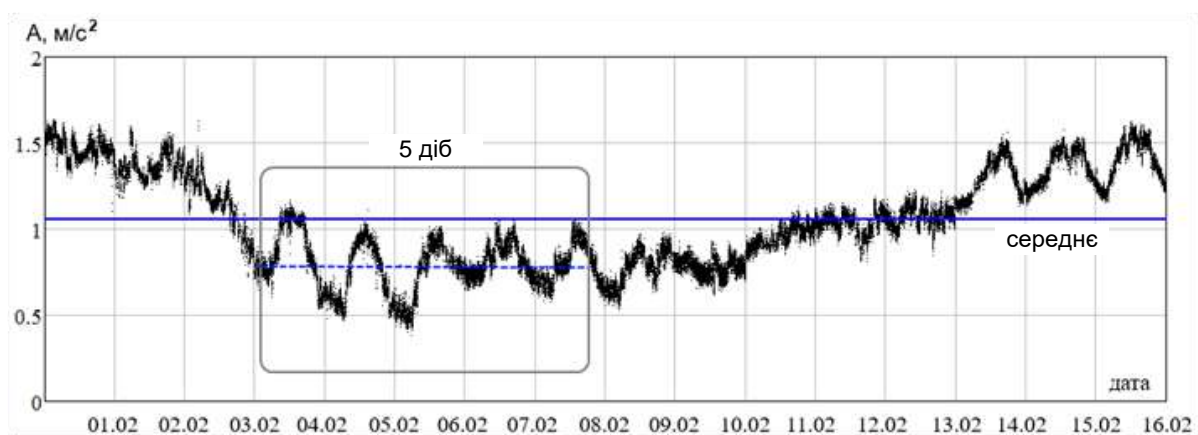


Рис. 4 – Графік зміни рівня гармоніки на частоті обертання газової турбіни (розроблено автором)

На графіку видно значні зміни параметра за період 15 днів. При цьому на їх фоні присутні менші флуктуації, пов'язані з добовими змінами навантаження на даний агрегат. А більш ранні дані свідчать про те, що дані флуктуації є природними, мають різноспрямований циклічний характер і пов'язані з температурними деформаціями опор та фундаменту.

Наведені на графіку (рис. 4) значення свідчать, що в інтервал кілька годин природні коливання параметрів складають $0,2 \text{ м/с}^2$, протягом кількох діб – $0,5 \text{ м/с}^2$, половину місяця – 1 м/с^2 . Тому, при підтвердженні рівнів даних флуктуацій за тривалий час швидка зміна параметра більш ніж на $0,5 \text{ м/с}^2$ за кілька годин буде свідчити про зміну стану обладнання або нетиповий режим, що вимагає уваги.

Підтвердити одну з гіпотез можна двома способами:

- 1) виявити чи є порушення в технологічному процесі та усунути їх;
- 2) провести діагностування виявлення ознак конкретних дефектів, що характеризуються виявленим нетиповим зростанням параметрів.

Таким чином, основою контролю технічного стану може бути статистична оцінка типових змін для виявлення нетипового зростання діагностичних параметрів. Оцінка швидкості зростання як діагностичний параметр пропонувалася і раніше, наприклад [9]. Але запропонований підхід не дозволяє оцінювати швидкості типових перехідних процесів, що не дає можливості реагувати на нетипові, повільні зміни, пов'язані з деградацією.

Для врахування змін з різними швидкостями слід оцінювати флуктуації параметрів на різних за довжиною часових інтервалах за набраною статистикою. При цьому пороги на певну величину зростання за конкретний часовий інтервал необхідно встановлювати з урахуванням оцінки статистики типових змін, що спостерігалися раніше, на даному інтервалі за час, мінімум на порядок довше часового відрізка, що розглядається.

Застосування цього підходу можна показати на прикладі. На рис. 5 наведено дві часові ділянки $dT1$ та $dT2$ з характерними інтервалами змін параметра $K1$ та $K2$ відповідно, пороги на інтервалі $dT2$ відповідають порогам, визначених за допомогою стандартного підходу.

Побудувавши на $dT1$ базове значення $B1$, відповідне нижньому рівню значень параметра, і відклавши від нього пороги, що відповідають максимальному інтервалу флуктуацій $K1$ (позначений зеленими лініями), що спостерігаються, можна виявити зміну стану в точці $P1$.

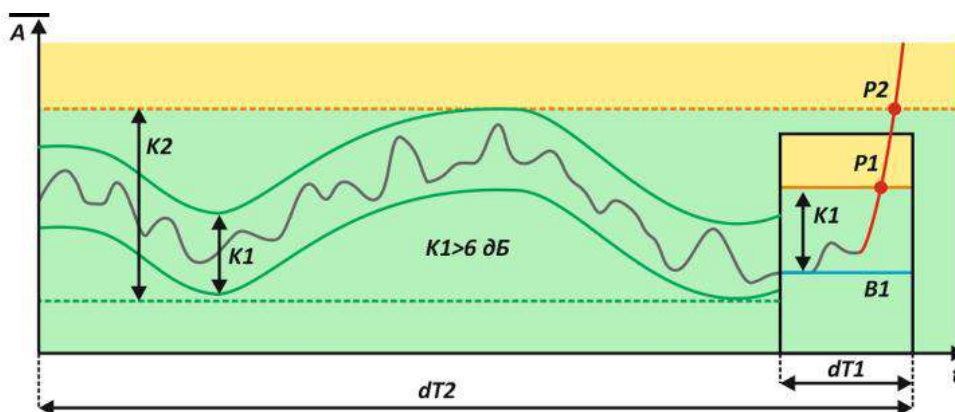


Рис. 5 – Виявлення вимірювання стану з оцінкою зростання на інтервалах із різною тривалістю (розроблено автором)

Точка $P2$ відповідає моменту виявлення зміни стану з порогом за рівнем максимальних флуктуацій сигналу $K2$ та запізнюється щодо $P2$. Спосіб реалізації цього принципу описаний нижче.

Для реалізації запропонованого підходу пропонується метод адаптації порогових значень, який здійснюється за допомогою організації накопичення діагностичних параметрів у кількох кільцевих буферах (накопичувачах результатів вимірювань).

У кожному буфері з заданою періодичністю (типова періодичність – половина довжини буфера) обчислюється середнє значення та інтервал зміни параметра й передається до наступного, більшого за тривалістю буфера. За рахунок усереднення відбувається згладжування

несуттєвих для конкретного інтервалу часу флуктуацій, при цьому необхідна для аналізу форма тренду зберігається. Буфери організовані в такий спосіб: дані приймаються по мірі їх заповнення; після заповнення буфера для прийому нового елемента найстаріший видаляється.

Буфери індексуються від 0, в якому знаходяться вихідні дані, індексація наступних – збільшується протягом зростання інтервалу згладжування та часового інтервалу оцінки. Базове значення даних, накопичених у поточний буфер, пропонується визначати за оцінкою нижньої межі інтервалу змін наступного буфера.

Пороги, що відраховуються від базового значення, пропонується визначати за статистичною оцінкою інтервалів зміни величини параметра на часових відрізках поточного та наступного буфера для мінімізації затримки, що з'являється при згладжуванні даних.

Останній буфер (архів) повинен накопичувати згладжені за попереднім буфером дані вимірювань за весь час спостереження. Самі значення порогів (відраховуються від базового значення) для накопичувача, крім останнього, визначаються з урахуванням величин природних флуктуацій параметра, визначених в ході набору статистики.

Способи побудови порогових значень та прогнозування часу їх досягнення наводяться нижче. Підхід з оцінки величин флуктуацій на різних часових інтервалах, як і стандартний, що використовує міру розкиду на всьому інтервалі оцінки, має недолік, пов'язаний із запізненням або відсутністю реакції на монотонне повільне зростання параметра, викликане деградацією, що з'явилася до початку накопичення статистики. Отже для останнього накопичувача (архіву), доцільно встановлювати поріг на задане число дБ (типове значення – 10 дБ для порога попередження) від базового значення, визначеного в цьому ж накопичувачі. Дані пороги, отримані для архіву, має сенс використовувати і для попереднього накопичувача, якщо обладнання до початку збору статистики давно перебуває в експлуатації.

Висновки

У ході дослідження отримав подальший розвиток метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій, який, на відміну від існуючих, є інваріантним до типу об'єкта діагностування, а прив'язка до конкретного агрегату здійснюється за допомогою складання конфігураційної матриці.

Перелік використаних джерел:

1. Rathbone T.C. Vibration tolerance. *Power plant engineering*. 1939. Vol. 43. Iss. 11. Pp. 721-724.
2. Bently D.E., Hatch C.T., Grissom B. Fundamentals of rotating machinery diagnostics. Minden : ASME, Bently Pressurized Bearing Company, 2002. 756 p. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.801FRM>.
3. Mitchell J.S. From vibration measurements to condition based maintenance. Seventy years of continuous progress. *Sound & vibration*. 2007. Vol. 41(1). Pp. 62-78.
4. Deery J. The «real» history of real-time spectrum analyzers. A 50-year trip down memory lane. *Sound & vibration*. 2007. Vol. 41(1). Pp. 54-59.
5. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. *Mathematics of Computation*. 1965. Vol. 19 (90). Pp. 297-301. DOI: <https://doi.org/10.2307/2003354>.
6. Brigham E.O. The fast Fourier transform and its applications. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1988. 448 p.
7. Beregun V.S., Krasilnikov A.I. Research of excess kurtosis sensitiveness of diagnostic signals for control of the condition of the electrotechnical equipment. *Technical Electrodynamics*. 2019. Vol. 4. Pp. 79-85. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2017.04.079>.
8. Chirica I., Presura A., Anghelută C.M. Retrofit solutions for green and efficient inland ships. *Journal of Physics: Conference Series* : 5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019, Mircea cel Batran Naval Academy, Constanta, Romania, 17-18 May 2019. Vol. 1297. Pp. 17-18. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012009>.
9. Tarasenko T., Zalozh V., Maksymov S. The ways to improve energy efficiency and eco-friendliness of the specific danube inland vessels. First Stage. *Journal of Physics: Conference Series* : 5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019, Mircea cel Batran Naval Academy, Constanta,

- Romania, 17-18 May 2019. Vol. 1297. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1297/1/012019>.
10. Scheffer C., Girdhar C. Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance. Elsevier: Newnes, 2004. 272 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-6275-8.X5000-0>.
 11. Міхалков С.В. Удосконалення технології діагностування підшипників кочення електричних двигунів тепловозів за вібраційними характеристиками : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.07. Харків: 2007. 20 с.
 12. Determination of top dead center location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis / R.A. Varbanets, V.I. Zalozh, A.V. Shakhov, I.V. Savelieva, V.M. Piterska. *Diagnostyka*. 2020. № 21(1). Pp. 51-60. DOI: <https://doi.org/10.29354/diag/116585>.
 13. Improving the process of vehicle units diagnosis by applying harmonic analysis to the processing of discrete signals / A. Golovan et al. *SAE Technical Paper*. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1774>.

References:

1. T.C. Rathbone, «Vibration tolerance», *Power Plant Engineering*, vol. 43, iss. 11, pp. 721-724, 1939.
2. D.E. Bently, C.T. Hatch, and B. Grissom, *Fundamentals of rotating machinery diagnostics*. Minden, Germany: ASME Publ., 2002. doi: **10.1115/1.801FRM**.
3. J.S. Mitchell, «From vibration measurements to condition based maintenance. seventy years of continuous progress», *Sound & vibration*, vol. 41(1), pp. 62-78, 2007.
4. J. Deery, «The «real» history of real-time spectrum analyzers. A 50-year trip down memory lane», *Sound & vibration*, vol. 41(1), pp. 54-59, 2007.
5. J.W. Cooley, and J.W. Tukey, «An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series», *Mathematics of Computation*, vol. 19(90), pp. 297-301, 1965. doi: **10.2307/2003354**.
6. E.O. Brigham, *The fast Fourier transform and its applications*. Englewood Cliffs, USA: Prentice Hall Publ., 1988.
7. V.S. Beregun, and A.I. Krasilnikov, «Research of excess kurtosis sensitiveness of diagnostic signals for control of the condition of the electrotechnical equipment», *Technical Electrodynamics*, vol. 4, pp. 79-85, 2019. doi: **10.15407/techned2017.04.079**.
8. I. Chirica, A. Presura, and C.M. Anghelută, «Retrofit Solutions for Green and Efficient Inland Ships», in *Journal of Physics: Conference Series: 5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019*, Constanta, Romania, 2019, vol. 1297, pp. 17-18. doi: **10.1088/1742-6596/1297/1/012009**.
9. T. Tarasenko, V. Zalozh, and S. Maksymov, «The Ways to Improve Energy Efficiency and Eco-friendliness of the Specific Danube Inland Vessels. First Stage», in *Journal of Physics: Conference Series: 5th International Scientific Conference SEA-CONF 2019*, Constanta, Romania, 2019, vol. 1297, pp. 1-8. doi: **10.1088/1742-6596/1297/1/012019**.
10. C. Scheffer, and C. Girdhar, *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*, Elsevier: Newnes Publ., 2004. doi: **10.1016/B978-0-7506-6275-8.X5000-0**.
11. Mikhalkov S.V. «Udoskonalennia tekhnolohii diahnostuvannia pidshypnykiv kochennia elektrychnykh dvyhuniv teplovoziv za vibratsiinymy kharakterystykamy» [«Improvement of the technology of diagnosing the rolling bearings of electric engines of diesel locomotives by vibration characteristics »], PhD thesis, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, 2007. (Ukr.)
12. R.A. Varbanets, V.I. Zalozh, A.V. Shakhov, I.V. Savelieva, and V.M. Piterska, «Determination of top dead center location based on the marine diesel engine indicator diagram analysis», *Diagnostyka*, № 21(1), pp. 51-60, 2020. doi: **10.29354/diag/116585**.
13. A. Golovan et al., «Improving the Process of Vehicle Units Diagnosis by Applying Harmonic Analysis to the Processing of Discrete Signals», *SAE Technical Paper*, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1774**.

Рецензент: А.І. Головань
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 21.09.2023
Стаття прийнята 14.10.2023

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ РОБОТИ НЕЙРОМЕРЕЖІ В СИСТЕМІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ НАДВОДНОЇ ОБСТАНОВКИ

Особливість поточного моменту для сучасного судноплавання полягає в тому, що інформаційні технології інтенсивно застосовуються на флоті та у портовій інфраструктурі. Однак, незважаючи на впровадження нових технічних засобів судноводіння, залишається невирішеною проблема врахування впливу людського фактору. Найбільш перспективним напрямом застосування інформаційних технологій для вирішення вищевказаної проблеми є концепція е-Навігації, яка на теперішній час є ключовою ініціативою ІМО. Концепція передбачає застосування «наскрізних» цифрових технологій штучного інтелекту та доповненої реальності у частині інтелектуалізації інтерфейсу судноводія. Дані технології є ключем до принципово нового рівня взаємодії людини-оператора (судноводія) з навігаційними даними в цифровому середовищі, в тому числі й для ідентифікації обстановки та розпізнавання ситуацій. За результатами проведених досліджень отримано висновок про те, що точність прогнозу параметрів руху судна нейрокомп'ютером вища, ніж при використанні для цієї мети системи розподілених обчислень. Таким чином, у розглянутих модельних ситуаціях нейронна мережа виявила більшу обчислювальну надійність у порівнянні з паралельним алгоритмом розв'язання диференціального рівняння. Також необхідно відзначити, що висновки за результатами дослідження надійності нейромережової системи зчислення слід розуміти в статистичному, а не абсолютному значенні.

Ключові слова: автоматизація, автоматизація процесу судноводіння, безпека мореплавання, датчики навігаційної інформації, доповнена реальність, джерело інформації, зона небезпеки, ідентифікація, ідентифікація обстановки, ідентифікація надводної обстановки, інформаційна модель прийняття рішення, програмний засіб, район плавання, розпізнавання надводної обстановки, розпізнавання ситуацій, рух судна, система управління рухом суден, судноводій, судноводіння, судноплавання, безпека, технічні засоби судноводіння, формалізація, штучний інтелект.

H. Shapiro. Investigation of the stability of the neuronetwork in the surface identification system. The peculiarity of the current moment for modern shipping is that information technologies are intensively used in the fleet and port infrastructure. However, despite the introduction of new technical means of navigation, the problem of taking into account the influence of the human factor remains unsolved. The most promising direction of application of information technologies to solve the above-mentioned problem is the concept of e-Navigation, which is currently a key initiative of the IMO. The concept involves the use of «end-to-end» digital technologies of artificial intelligence and augmented reality in the part of intellectualization of the shipmaster's interface. These technologies are the key to a fundamentally new level of human-operator (master) interaction with navigation data in the digital environment, including for identifying the situation and recognizing situations. According to the results of the conducted research, the conclusion was obtained that the accuracy of the forecast of the ship's motion parameters by a neurocomputer is higher than when using a distributed computing system for this purpose. Thus, in the considered model situations, the neural network showed higher computational reliability compared to the parallel algorithm for solving the differential equation. It should also be noted that the conclusions based on the results of the study of the reliability of the neural network calculation system should be understood in a statistical and not an absolute sense.

Key words: automation, navigation process automation, navigation safety, navigation

* здобувачка ступеня доктора філософії, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-4245-9365

information sensors, augmented reality, information source, danger zone, identification, situation identification, surface situation identification, decision-making information model, software tool, navigation area, surface situation recognition, recognition situations, ship traffic, ship traffic control system, shipmaster, ship navigation, shipping, safety, technical means of navigation, formalization, artificial intelligence.

Постановка проблеми. Забезпечення безпеки мореплавання є пріоритетним науковим і практичним завданням, необхідність вирішення якого обумовлена достатньо високим рівнем аварійності флоту. За даними ІМО, 60-80% всіх інцидентів пов'язані з «людським фактором» [1, 2]. І хоча інформаційні технології (ІТ) інтенсивно розвиваються на флоті та у портовій інфраструктурі, досі невирішеною залишається проблема врахування впливу людини на процеси судноводіння. Діяльність Судноводій багато часу працює в умовах психофізіологічних та інформаційних перевантажень, що сприяє прийняттю несвоєчасних та неефективних рішень. Для подолання цих проблем ІМО проголосило е-Навігацію ключовою концепцією застосування ІТ [3].

Значні обсяги даних про надводну обстановку, що надходять від різномірних джерел інформації з різним темпом оновлення, потребують ефективного опрацювання та вироблення судноводієм своєчасних й адекватних рішень. Сучасне суспільство вимагає застосування сучасного ефективного інтелектуального підходу.

Метою дослідження є забезпечення стійкості роботи нейромережі в системі ідентифікації надводної обстановки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Для рішення завдань ідентифікації й управління динамічними об'єктами у теперішній час знаходять широке застосування нейромережеві та нечіткі технології [4-5]. Завдання ідентифікації об'єкта управління та різні варіанти моделювання руху об'єктів розглянуті у роботах [6-10].

Роботи [11-15] присвячені нечіткому (або нейро-нечіткому) моделюванню руху рухомих об'єктів і моделей підтримки прийняття рішення та ідентифікації систем.

Завдання ідентифікації та управління тісно пов'язані з побудовою систем зчислення. Так, в [12] автори пропонують багатопарову нейронну мережу для прогнозу куткових та лінійних координат робота за вимірами кутів у шарнірах його ніг.

У роботі [16] визначені два напрямки застосування нейронних мереж і нечітких систем для визначення зчислених координат судна: перший напрямок – обробка навігаційної інформації; другий напрямок – безпосередньо для управління (за курсом або за траєкторією) рухом судна. Регульована величина підлягає оцінці на основі алгоритму, побудованого з використанням нейронної мережі, нечіткої або гібридної системи.

У дослідженні [17] автор будує систему автоматичного утримання судна в заданій точці позиціонування, що складається із нейромережевої моделі судна та нейрорегулятора. Але синтезована нейронна мережа не може ідентифікувати моделі судна в умовах збурюючих впливів, хоча й показала високу точність прогнозу параметрів руху судна для маневрів «циркуляція» та «зиг-заг».

Дослідження [18, 19] присвячені питанням вивчення здатностей нейронних мереж до прогнозу параметрів циркуляції судна. За результатами тестування доведено, що відносна точність прогнозу параметрів циркуляції не гірше 7%.

Робота [20] присвячена використанню гібридної нечіткої нейронної мережі з еліпсоїдальними функціями активації для ідентифікації моделі руху судна. За основу береться Generalized Ellipsoidal Function Based Fuzzy Neural Network – GEBF-FNN. Нечіткі правила формуються по мірі настроювання системи, тобто структура системи змінюється по мірі навчання. Результати перевірки свідчать, що модуль відносної помилки прогнозу координат судна не перевищує 1%.

У роботі [16] розробляється інтелектуальна система утримання судна на курсі. У результаті дослідження доведено, що нейронні мережі відтворюють динаміку судна і забезпечують найбільшу точність прогнозу курсу при використанні мережі прямого поширення з методом навчання Левенберга-Марквардта [21].

У роботах [22] та [23] пропонується використовувати двошарові нейронні мережі для апроксимації правої частини диференціального рівняння руху, складеного для судна. Нейронні мережі після навчання використовуються для відновлення відповідних коефіцієнтів вихідної моделі і забезпечують відносну помилку нейромережевого відновлення, яка не перевищує 9%.

Другий напрямок використання нейромережових, нечітких і гібридних (нейронечітких) технологій у судноводінні пов'язаний з управлінням рухом судна й у поточному дослідженні нас не цікавить.

Таким чином, питання забезпечення необхідної стійкості роботи нейромережі в системі ідентифікації надводної обстановки до кінця не вирішені.

Виклад основного матеріалу. Визначення швидкості дрейфу судна V_{oy1} на основі диференціального рівняння системи допускає обчислення його правої частини в певні дискретні моменти часу. Якщо зазначені обчислення виконуються за допомогою одного обчислювального обладнання (процесора), то при виході з ладу даного обладнання обчислення швидкості дрейфу судна стає неможливим. Для підвищення надійності системи визначення швидкості дрейфу судна слід вдаватися до розподілених обчислень. Отже, мова йде про дослідження відмовостійкості нейромережової системи прогнозування шляху судна.

При розподілених обчисленнях величини, що формують праву частину диференціального рівняння, обчислюються окремо на своєму обчислювальному вузлі (процесорі). Так, сила, що діє на корпус судна з боку керма, обчислюється на одному процесорі, а відцентрова сила – на іншому.

Конкретна схема розподілу обчислень визначається кількістю незалежних процесорів, задіяних в обчисленнях, а також методиками розрахунків сил, що впливають на корпус судна при його русі в умовах зовнішнього збурення. Розглянемо такий варіант розподілу обчислень швидкості дрейфу на основі диференціального рівняння. Допустимо, що в системі використовується вісім елементів обчислювальних обладнань. Перші сім з них обчислюють сили, що діють на корпус судна, а також величини, що залежать від кінематичних характеристик його руху:

$$Z = (-m\omega V_{ox1}, -mk_{11}\omega V_{ox1}, F_{Py1}, F_{Ry1}, F_{Vy1}, F_{Ay1}, F_{Wy1})^T.$$

Результати обчислень надходять далі на восьмий процесор, що обчислює швидкість дрейфу судна V_{oy1} . Загальний вигляд розглянутої системи розподілених обчислень наведено на рис. 1.

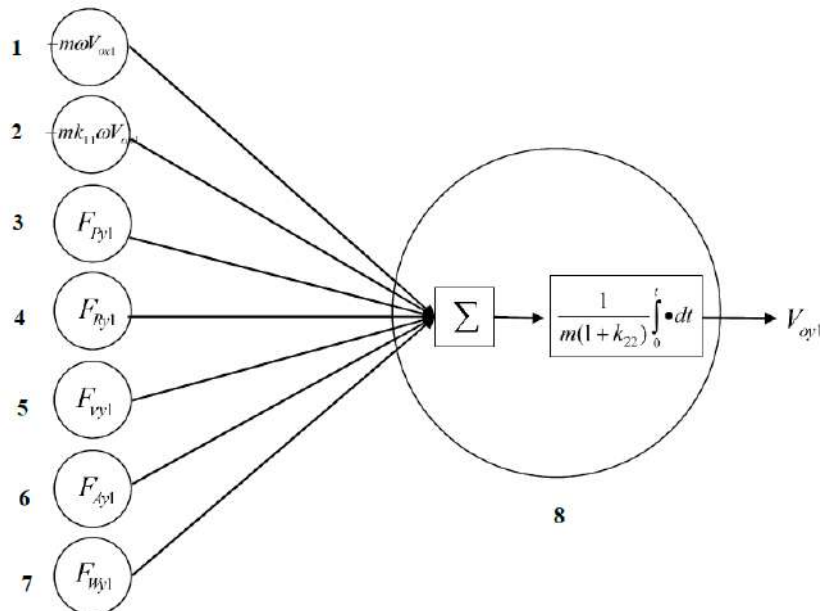


Рис. 1 – Схема системи розподілених обчислень швидкості дрейфу судна. Джерело: розроблено автором

Використання розробленої схеми розподілених обчислень швидкості дрейфу судна набуває сенсу, коли потрібно забезпечити не тільки надійність, але й швидкодію системи прогнозу. Якщо є 8 незалежних процесорів, можна виконувати обчислення правих частин

диференціального рівняння на кожному з них, не виконуючи поділ їх на суми, що складаються. У даному випадку обчислення на кожному процесорі виконуються послідовно. А розроблена система розподілених обчислень дозволяє організувати паралельні обчислення, що дозволяють, як правило, підвищити продуктивність обчислень при прогнозі швидкості дрейфу судна.

Розроблена схема обчислень допускає використання процесорів різної продуктивності з урахуванням складності конкретної обчислювальної задачі. Наприклад, обчислення величини $-m\omega V_{ox1}$ представляє собою множення трьох дійсних чисел, і для виконання даної операції не потрібно потужний обчислювальний вузол. Розрахунки ж сили $F_{Wу1}$, що діє на судно з боку поверхні моря, допускає інтегрування по змоченій поверхні корпусу судна, тому для обчислень необхідно використовувати продуктивний процесор.

Інший шлях щодо досягнення оптимальності системи розподілених обчислень швидкості дрейфу – раціональний добір величин, обчислюваних з використанням процесорів, відповідно до їх продуктивності. В подальшому допускаємо, що розподілена система визначення швидкості дрейфу є оптимальною з точки зору швидкодії формуючих її обчислювальних вузлів, а основну увагу приділимо дослідженню надійності даної системи.

Аналогічну функцію прогнозу швидкості дрейфу судна виконує кожна з нейронних мереж. Якщо вхідний шар мережі містить 7 нейронів, то кількість обчислювальних вузлів її буде точно дорівнювати кількості процесорів розглянутої раніше системи розподілених паралельних обчислень швидкості дрейфу судна. Таким чином, дані дві обчислювальні системи будуть еквівалентні з погляду обчислювальних (апаратних) можливостей. Було проведено таке дослідження. Для прогнозу швидкості дрейфу вибирається статична нейронна мережа, перший шар якої містить 7 нейронів. Дана нейронна мережа використовується надалі для прогнозу швидкості дрейфу судна. Для такої ж мети використовується й система паралельних обчислень (рис. 1). Передбачається, що в процесі обчислень виходять із ладу декілька обчислювальних вузлів першого шару.

Рух судна моделюється для трьох класів навігаційних ситуацій (НС). Розглянуто по 100 модельних ситуацій для кожного варіанта виходу з ладу заданої кількості процесорів. Кожна модельна ситуація представляє собою плавання судна протягом чотиригодинного періоду часу. Номера конкретних процесорів, які виходять із ладу, (від 1 до 6) вибираються для кожної модельної ситуації випадково.

В якості показників працездатності систем (за прогнозом швидкості дрейфу) в умовах порушення роботи їх окремих обчислювальних вузлів використовуються величини e_{max} , e_{mean} – найбільше й середнє значення модуля помилки швидкості в тестових модельних ситуаціях. В якості «дійсного» значення швидкості дрейфу при цьому використовується значення, прогнозоване системами в неушкодженому стані, коли використовуються всі обчислювальні вузли системи ідентифікації надводної обстановки. Характеристиками прогнозу траєкторії служать величини c_{max} , c_{mean} – найбільше й середнє значення максимуму модуля нев'язки, спостережуваного в тестових модельних ситуаціях. Результати тестування наведено в табл. 1-4.

Таблиця 1

Результати тестування системи розподілених обчислень (за швидкістю) – найбільший модуль похибки (Джерело: розроблено автором)

Клас навігаційної ситуації	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу швидкості						
		Найбільший модуль похибки, м/с						
		Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів						
		1	2	3	4	5	6	
I	20	2,23	5,41	6,10	2,53	12,74	2,23	
II	ГС пост.	20	2,56	8,92	5,92	4,96	15,67	2,95
	ГС змін.	20	12,74	11,89	13,56	9,93	35,06	8,49
III	ГС пост.	20	2,67	7,70	6,54	2,41	17,34	3,21
	ГС змін.	20	12,35	14,21	10,61	13,36	35,10	6,69
Загальний результат		100	12,74	14,21	13,56	13,36	35,10	8,49

Таблиця 2

Результати тестування системи розподілених обчислень (за швидкістю) – середній модуль похибки (Джерело: розроблено автором)

Клас навігаційної ситуації	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу швидкості						
		Найбільший модуль похибки, м/с						
		Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів						
		1	2	3	4	5	6	
I	20	0,38	1,95	1,84	0,53	2,26	0,52	
II	ГС пост.	20	0,41	2,18	1,65	0,44	2,39	0,65
	ГС змін.	20	0,61	1,54	2,42	0,57	3,54	0,55
III	ГС пост.	20	0,49	1,45	1,79	0,42	2,03	0,79
	ГС змін.	20	0,59	1,77	1,92	0,73	3,58	0,53
Загальний результат	100	0,50	1,74	1,93	0,54	2,76	0,61	

Таблиця 3

Результати тестування системи розподілених обчислень (за координатами) – середній максимум нев'язки (Джерело: розроблено автором)

Клас навігаційної ситуації	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу швидкості						
		Найбільший модуль похибки, м/с						
		Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів						
		1	2	3	4	5	6	
I	20	3,14	13,18	10,74	8,25	20,82	17,40	
II	ГС пост.	20	1,34	17,78	11,86	6,50	19,35	11,33
	ГС змін.	20	1,38	6,04	11,34	3,29	10,44	10,04
III	ГС пост.	20	1,89	10,21	10,79	7,37	10,00	13,22
	ГС змін.	20	2,59	8,84	9,84	5,38	11,21	7,36
Загальний результат	100	2,09	10,93	10,97	6,24	14,37	11,87	

Таблиця 4

Результати тестування системи розподілених обчислень (за координатами) – найбільший максимум нев'язки (Джерело: розроблено автором)

Клас навігаційної ситуації	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу швидкості						
		Найбільший модуль похибки, м/с						
		Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів						
		1	2	3	4	5	6	
I	20	14,22	41,10	41,75	23,94	52,26	25,73	
II	ГС пост.	20	8,67	52,95	42,01	43,79	89,22	25,10
	ГС змін.	20	13,87	15,08	24,72	12,54	22,55	29,06
III	ГС пост.	20	5,86	42,92	31,44	24,17	20,15	32,87
	ГС змін.	20	13,51	35,40	33,88	18,21	31,58	19,03
Загальний результат	100	14,22	52,95	42,01	43,79	89,22	32,87	

Подібні таблиці можуть бути складені й для нейронної мережі. У таблицях 5-8 наведені результати тестування нейронної мережі, в якій не використовується один або кілька обчислювальних вузлів.

Таблиця 5

Результати тестування нейронної мережі (за швидкістю) –
найбільший модуль похибки (Джерело: розроблено автором)

Клас навігацій- ної ситуації	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу швидкості						
		Найбільший модуль похибки, м/с						
		Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів						
		1	2	3	4	5	6	
I		20	3,17	4,46	3,46	3,44	3,17	2,87
II	ГС пост.	20	3,50	4,99	3,19	3,78	3,17	3,16
	ГС змін.	20	2,57	4,03	4,54	3,58	3,55	3,23
III	ГС пост.	20	4,03	3,26	4,10	4,11	4,17	3,01
	ГС змін.	20	4,25	4,10	4,29	4,53	3,26	3,00
Загальний ре- зультат		100	4,25	4,99	4,54	4,53	4,17	3,23

Таблиця 6

Результати тестування нейронної мережі (за швидкістю) –
середній модуль похибки (Джерело: розроблено автором)

Клас навігацій- ної ситуації	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу швидкості						
		Середній модуль похибки, м/с						
		Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів						
		1	2	3	4	5	6	
I		20	0,98	1,62	1,38	1,47	1,10	1,02
II	ГС пост.	20	1,14	1,82	1,39	1,29	1,23	1,24
	ГС змін.	20	1,09	1,42	1,89	1,38	1,15	0,87
III	ГС пост.	20	0,95	1,34	1,56	1,31	1,60	0,79
	ГС змін.	20	1,00	1,24	1,57	1,40	1,19	0,85
Загальний ре- зультат		100	1,04	1,47	1,55	1,37	1,25	0,95

Таблиця 7

Результати тестування нейронної мережі (за координатами) – середній максимум нев'язки
(Джерело: розроблено автором)

Клас навігацій- ної ситуації	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу швидкості						
		Середній максимум нев'язки, милі						
		Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів						
		1	2	3	4	5	6	
I		20	5,91	9,68	7,12	9,77	5,94	5,88
II	ГС пост.	20	6,48	10,96	7,99	7,37	8,66	9,14
	ГС змін.	20	5,37	5,63	7,58	5,77	4,79	3,24
III	ГС пост.	20	5,74	7,37	9,63	8,3	10,16	5,16
	ГС змін.	20	3,75	4,37	6,72	5,72	4,50	3,31
Загальний ре- зультат		100	5,51	7,40	7,75	7,39	6,81	5,35

Таблиця 8

Результати тестування нейронної мережі (за координатами) – найбільший максимум нев’язки (Джерело: розроблено автором)

Клас навігаційної ситуації	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу швидкості						
		Найбільший максимум нев’язки, милі						
		Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів						
		1	2	3	4	5	6	
I	20	18,29	18,70	21,71	21,71	23,88	21,53	
II	ГС пост.	20	26,50	29,61	22,36	20,79	24,04	23,96
	ГС змін.	20	14,52	14,73	18,95	12,92	22,79	13,87
III	ГС пост.	20	13,58	17,28	26,26	21,81	24,81	21,27
	ГС змін.	20	11,91	15,67	16,67	15,83	8,58	11,04
Загальний результат	100	26,50	29,61	26,26	21,81	24,81	23,96	

У табл. 9 виконано порівняння надійності роботи двох систем. Найкращі за точністю значення підкреслені тонкою лінією.

Таблиця 9

Порівняння працездатності двох систем (Джерело: розроблено автором)

Тип системи	Кількість модельних ситуацій	Точність прогнозу параметрів руху судна, милі						
			Кількість непрацюючих обчислювальних вузлів					
			1	2	3	4	5	6
Система розподілених паралельних обчислень	100	e_{max}	12,74	14,21	13,56	13,36	35,10	8,49
		e_{mean}	<u>0,50</u>	1,74	1,93	<u>0,54</u>	2,76	<u>0,61</u>
		c_{max}	<u>14,22</u>	52,95	42,01	43,79	89,22	32,87
		c_{mean}	<u>2,09</u>	10,93	10,97	<u>6,24</u>	14,37	11,87
Нейронна мережа	100	e_{max}	<u>4,25</u>	<u>4,99</u>	<u>4,54</u>	<u>4,53</u>	<u>4,17</u>	<u>3,23</u>
		e_{mean}	1,04	<u>1,47</u>	<u>1,55</u>	1,37	<u>1,25</u>	0,95
		c_{max}	26,50	<u>29,61</u>	<u>26,26</u>	<u>21,81</u>	<u>24,81</u>	<u>23,96</u>
		c_{mean}	5,51	<u>7,40</u>	<u>7,75</u>	7,39	<u>6,81</u>	<u>5,35</u>

За результатами проведеного дослідження можна зробити ряд висновків. Так, точність прогнозу швидкості й розрахунків зчислених координат не монотонно погіршується зі збільшенням кількості вузлів, що вийшли з ладу. Це твердження відноситься як до системи розподілених паралельних обчислень, так і до нейронної мережі. Однак характеристики точності нейронної мережі більш стабільні до зміни кількості непрацюючих обчислювальних вузлів.

Наочним прикладом тому служать два графіка, наведені на рисунку 2, що й відображають залежність найбільшого значення максимуму модуля нев’язки за чотири години плавання від кількості ушкоджених процесорів.

Як видно з рис. 2, похибка нейронної мережі залишається практично постійною при будь-яких значеннях кількості процесорів, виключених з обчислень, а система розподілених обчислень характеризується помилками, величина яких змінюється істотно при зміні кількості непрацюючих вузлів.

Подібні твердження відносяться й до інших характеристик точності прогнозу координат і швидкості. Даний результат пояснюється тим, що процесори «нейрокомп'ютера», на відміну від системи розподілених обчислень, приймають сигнали від усіх елементів входу, що дозволяє як би «вирівнювати», розподіляти навантаження інтенсивних вхідних сигналів, повне ігнорування яких приводить до істотних похибок у даних умовах плавання.

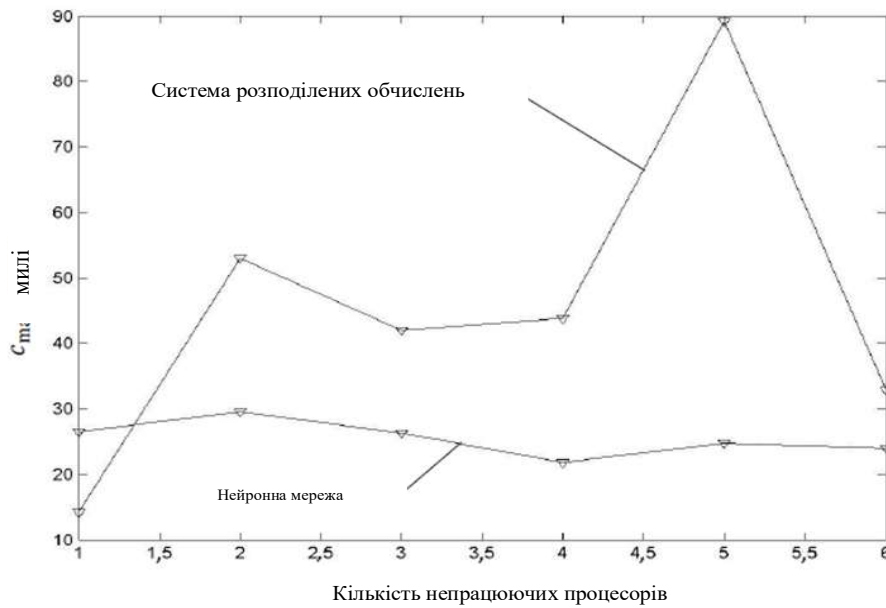


Рис. 2 – Порівняння відмовостійкості системи розподілених паралельних обчислень та нейронної мережі. Джерело: розроблено автором

Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок про те, що точність прогнозу параметрів руху судна нейрокомп'ютером вища, ніж при використанні для цієї мети системи розподілених обчислень. Таким чином, у розглянутих модельних ситуаціях нейронна мережа виявила більшу обчислювальну надійність у порівнянні з паралельним алгоритмом розв'язання диференціального рівняння. Також необхідно відзначити, що висновки за результатами дослідження надійності нейромережової системи зчислення слід розуміти в статистичному, а не абсолютному змісті.

Перелік використаних джерел:

1. IMO. Human Element. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx> (дата звернення: 15.03.2023).
2. IMO. Human Element. Vision, Principles and Goals. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx> (дата звернення: 15.03.2023).
3. IMO. E-Navigation. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx> (дата звернення: 10.04.2023).
4. Руденко О.Г., Бодяньський Є.В. Штучні нейронні мережі. Харків : Компанія СМІТ, 2006. 404 с.
5. Дубровін В.І., Субботін С.О. Методи оптимізації та їх застосування в задачах навчання нейронних мереж: навчальний посібник. Запоріжжя : ЗНТУ, 2003. 136 с.
6. A real time control system for balancing a ball on a platform with FPGA parallel implementation / V. Shymkovych, V. Samoty, S. Telenyk, P. Kravets, T. Posvistak. *Technical Transactions*. 2018. Vol. 5. Pp. 109-117. DOI: <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.18.077.8559>.
7. Shymkovych V., Niechkina V. The criterion for determining the buffering time of the measuring channel for smoothing the variable changes of the sensor signal. *2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS)*, Kyiv, Ukraine, 12-14 May 2020. Pp. 343-346. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS50319.2020.9160084>.
8. Гильгурт С.Я. Анализ применения реконфигурируемых вычислителей на базе ПЛИС для реализации нейронных сетей. *Моделирование та інформаційні технології*. 2006. Вип. 37. С. 168-174.

9. Symkovych V., Kravets P. Hardware implementation neural network controller on FPGA for stability ball on the platform. *ICCSEEA 2019 Advances in Computer Science for Engineering and Education II. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 938. Pp. 247-256. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-16621-2_23.
10. Нейромережевий контролер системи стабілізації рухомого об'єкта з апаратно-програмною реалізацією на ПЛІС / П.І. Кравець, В. М. Шимкович, В.В. Федорчук, А.А. Гой. *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, керування та обчислювальна техніка*. 2014. № 63. С. 4-11
11. Hunt K.J., Sbarbaro D., Zbikowski R., Gawthrop P.J. Neural networks for control systems: A survey. *Automatica*. 1992. Vol. 28. № 6. Pp. 1083-1112. DOI: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(92\)90053-I](https://doi.org/10.1016/0005-1098(92)90053-I).
12. Hierarchical neural network model for voluntary movement with application to robotics / Kawato M., Uno Y., Isobe M., Suzuki R. *IEEE Control Systems Magazine*. 1988. Vol. 8. Iss. 2. Pp. 8-16. DOI: <https://doi.org/10.1109/37.1867>.
13. Passalis N., Tefas A. Continuous drone control using deep reinforcement learning for frontal view person shooting. *Neural Computing and Applications*. 2020. Vol. 32. Pp. 4227-4238. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04330-6>.
14. Наконечний М.В., Наконечний Ю.М. Особливості ідентифікації динамічних об'єктів за допомогою рекурентних нейронних мереж. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»: Автоматика, вимірювання та керування*. 2009. № 639. С. 107-116.
15. Субботін С.О., Олійник А.О., Олійник О.О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: монографія / за заг. ред. С.О. Субботіна. Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. 375 с.
16. Нейромережеві технології оперативного діагностування технічного стану рухомого складу / В.М. Шимкович, П.І. Кравець, В.А. Жеребко, В.М. Шимкович, Р.Ю. Дьомін, А.В. Мостович. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2011. № 123. С. 119-123.
17. FPGA Implementation of a functional neuro-fuzzy network for nonlinear system control / J.-Y. Jhang, K.-H. Tang, C.-K. Huang, C.-J. Lin, K.-Y. Young. *Electronics*. 2018. Vol. 7. № 145. Pp. 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics7080145>.
18. Doronin V. Application of evaluation criteria of functional sustainability instrumental method of navigation on Ukraine's Inland waterways. *The XIII International Scientific Conference, Zheleznii Port, Ukraine, 2017*. Pp. 178-181.
19. Panin V., Doronin V., Aleynikov V. Application of the system analysis of implementation of the instrumental method of navigation on inland waterways of Ukraine. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. 2018. No. 2(45). Pp. 125-134. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-2-14>.
20. Application of intelligent processing of data flows under conditions of river navigation / Panin V., Doronin V., Tykhonov I., Alieinikov M. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3/9(93). Pp. 6-18. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.131599>.
21. Nocedal J., Wright S.J. Numerical optimization, 2nd ed. New York, USA: Springer Publ., 2006. 661 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-40065-5>.
22. Алексейчук Б.М., Сикирин В.Е., Астайкин Д.В. Оценка эффективности обсервованных координат судна при избыточных линиях положения, полученная имитационным моделированием. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2017. Vol. 14. Iss. 132. Pp. 47-51.
23. Тришин Н.В., Сикирин В.Е. Интегрирование предиктивной модели движения судна в ЭКНИС. *Судовождение*. 2014. Вып. 24. С. 164-171.

References:

1. IMO. Human Element [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx>. Accessed on: March 15, 2023.
2. IMO. Human Element. Vision, Principles and Goals [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement/Pages/Default.aspx>. Accessed on: March 15, 2023.

3. IMO. E-Navigation [Online]. Available: <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/eNavigation.aspx>. Accessed on: April 10, 2023.
4. O.H. Rudenko, and Ye.V. Bodianskyi, *Shtuchni neironni merezhi* [Artificial neural networks]. Kharkiv, Ukraine: SMITH company Publ., 2006. (Ukr.)
5. V.I. Dubrovin, and S.O. Subbotin, *Metody optymizatsii ta yikh zastosuvannia v zadachakh navchannia neironnykh merezh: navchalnyi posibnyk* [Optimization methods and their application in the tasks of learning neural networks: a tutorial]. Zaporizhzhia, Ukraine: NU Zaporizhzhia Polytechnic Publ., 2003. (Ukr.)
6. V. Shymkovych, V. Samoty, S. Telenyk, P. Kravets, and T. Posvistak, «A real time control system for balancing a ball on a platform with FPGA parallel implementation», *Technical Transactions*, vol. 5, pp. 109-117, 2018. doi: **10.4467/2353737XCT.18.077.8559**.
7. V. Shymkovych, and V. Niechkina, «The criterion for determining the buffering time of the measuring channel for smoothing the variable changes of the sensor signal», in Proceedings of IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 343-346. doi: **10.1109/ESS50319.2020.9160084**.
8. S.Ia. Hyllhurt, «Analyz pryomenenya rekonfihuryuemыkh vichyslytelei na baze PLYS dlia realyzatsyy neironnykh setei» [«Analysis of the use of reconfigurable FPGA-based computers for the implementation of neural networks»], *Modeliuvannia ta informatsiini tekhnologii – Modeling and information technologies*, vol. 37, pp. 168-174, 2006. (Ukr.)
9. V. Symkovych, and P. Kravets, «Hardware implementation neural network controller on FPGA for stability ball on the platform», in ICCSEEA 2019 Advances in Computer Science for Engineering and Education II. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2020, vol. 938, pp. 247-256. doi: **10.1007/978-3-030-16621-2_23**.
10. P.I. Kravets, V.M. Shymkovych, V.V. Fedorchuk, and A.A. Goy, «Neiromerezhevi kontroler systemy stabilizatsii rukhomoho obiekta z aparatno-prohramnoi realizatsiieiu na PLIS» [«Neural network controller of the moving object stabilization system with hardware and software implementation on FPGA»], *Visnyk NTUU «KPI». Informatyka, keruvannia ta obchysliuvalna tekhnika – Visnyk NTUU «KPI». Informatics, operation and computer science*, № 63, pp. 4-11, 2014. (Ukr.)
11. K.J. Hunt, D. Sbarbaro, R. Zbikowski, and P.J. Gawthrop, «Neural networks for control systems: A survey», *Automatica*, vol. 28, № 6, pp. 1083-1112, 1992. doi: **10.1016/0005-1098(92)90053-I**.
12. M. Kawato, Y. Uno, M. Isobe, and R. Suzuki, «Hierarchical neural network model for voluntary movement with application to robotics», *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 8, iss. 2, pp. 8-16, 1988. doi: **10.1109/37.1867**.
13. N. Passalis, and A. Tefas, «Continuous drone control using deep reinforcement learning for frontal view person shooting», *Neural Computing and Applications*, vol. 32, pp. 4227-4238, 2020. doi: **10.1007/s00521-019-04330-6**.
14. M.V. Nakonechnyi, and Yu.M. Nakonechnyi, «Osoblyvosti identyfikatsii dynamichnykh obektiv za dopomohoiu rekurentnykh neironnykh merezh» [«Peculiarities of identification of dynamic objects using recurrent neural networks»], *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»: Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia – Bulletin of Lviv Polytechnic National University: Automation, measuring and management*, № 639, pp. 107-116, 2009. (Ukr.)
15. S.O. Subbotin, A.O. Oliinyk, and O.O. Oliinyk, *Neiteratyvni, evoliutsiini ta multyahentni metody syntezy nechitkolohichnykh i neiromerezhnykh modelei: monohrafiia* [Non-iterative, evolutionary and multi-agent methods of synthesis of fuzzy and neural network models: monograph], S.O. Subbotin, Ed., Zaporizhzhia, Ukraine: NU Zaporizhzhia Polytechnic Publ., 2009. (Ukr.)
16. V.M. Shymkovych, P.I. Kravets, V.A. Zherebko, V.M. Shymkovych, R.Iu. Domin, and A.V. Mostovych, «Neiromerezhevi tekhnologii operatyvnoho diahnostuvannia tekhnichnoho stanu rukhomoho skladu» [«Neural network technologies for operational diagnosis of the technical condition of rolling stock»], *Zbirnyk naukovykh prats Ukrainskoho derzhavnoho universytetu zaliznychnoho transportu – Collected scientific works of Ukrainian state university of railway transport*, № 123, pp. 119-123, 2011. (Ukr.)
17. J.-Y. Jhang, K.-H. Tang, C.-K. Huang, C.-J. Lin, and K.-Y. Young, «FPGA implementation of a functional neuro-fuzzy network for nonlinear system control», *Electronics*, vol. 7, № 145, pp. 1-22, 2018. doi: **10.3390/electronics7080145**.

18. V. Doronin, «Application of evaluation criteria of functional sustainability instrumental method of navigation on Ukraine's Inland waterways», in Proceedings of XIII International Scientific Conference, Zheleznii Port, Ukraine, 2017, pp. 178-181.
19. V. Panin, V. Doronin, and V. Aleynikov, «Application of the system analysis of implementation of the instrumental method of navigation on inland waterways of Ukraine», *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 2(45), pp. 125-134, 2018. doi: **10.15588/1607-3274-2018-2-14**.
20. V. Panin, V. Doronin, I. Tykhonov, and M. Alieinikov, «Application of intelligent processing of data flows under conditions of river navigation», *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3/9(93), pp. 6-18, 2018. doi: **10.15587/1729-4061.2018.131599**.
21. J. Nocedal, and S.J. Wright, *Numerical Optimization*, 2nd ed. New York, USA: Springer Publ., 2006. doi: **10.1007/978-0-387-40065-5**.
22. В.М. Алексеичук, В.Е. Сыкырын, and Д.В. Астаикын, «Otsenka efektyvnosti observovannikh koordynat sudna pry yzbitochnikh lyniakh polozheniya, poluchennaia ymytatsyonnim modelyrovanyem» [«Estimation of efficiency of coordinates of ship at the surplus lines of position, got the imitation design»], *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, vol. 14, iss. 132, pp. 47-51, 2017. (Rus.)
23. N.V. Tryshyn, and V.E. Sykyryn, «Yntehyrovanye predyktivnoi modely dvyzheniya sudna v EKNYS» [«Integration of vessel maneuvering prediction model into the ECDIS»], *Sudovozhdenye – Shipping&Navigation*, vol. 24, pp. 164-171, 2014. (Rus.)

Рецензент: А.І. Головань
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 21.09.2023
Стаття прийнята 14.10.2023

274 АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.052:612.821

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300123

© Фалендиш А.П.¹, Помазков М.В.², Ганжеєв Д.І.³**РОЗВИТОК МЕТОДІВ ВПЛИВУ НА ПСИХОЕМОЦІЙНИЙ СТАН
УЧАСНИКІВ ДОРОЖНЬОГО РУХУ ЯК ТРАНСПОРТНУ НАДСИСТЕМУ**

Для ефективної організації дорожнього руху на вулично-дорожній мережі міста, планування обсягів і властивостей транспортних потоків, оперативного управління ними та зменшення рівня небезпеки у критичних точках мережі необхідно враховувати низку різних за природою факторів, деякі з яких мають непрогнозований характер. До таких факторів відноситься, зокрема, і психоемоційний стан кожного з учасників руху, який зумовлює поведінкові алгоритми водіїв і пішоходів, впливає на час їх реакції та кількість можливих помилок, а в загальному розумінні формує також певну соціокомунікативну атмосферу, в якій співпрацює та взаємодіє велика кількість осіб. Це стає передумовою виникнення неочікуваних внутрішніх впливів. Тобто, множину психоемоційних станів, зв'язків між ними, зовнішніх факторів і рівнів їх вагомості, засобів контролю та моніторингу, методик і алгоритмів втручання в зазначені процеси доцільно розглядати, як розвинену багаторівневу систему, яка може досліджуватися за допомогою системного аналізу, моделювання та засобів теорії вірогідності.

Ключові слова: транспорт, транспортна система, вулично-дорожня мережа міста, водії, пішоходи, психологічний стан, емоційний стан, управління, організація руху, безпека руху.

A.P. Falendysh, M.V. Pomazkov, D.I. Ganzheev. Development of methods of influence on the psycho-emotional state of traffic participants as a transport supersystem. For the optimal organization of vehicular movement within the urban street-road infrastructure, meticulous consideration of the magnitude and characteristics of traffic flows, the judicious operational oversight thereof, and the mitigation of perilous circumstances at critical nodal points within the network, a comprehensive acknowledgment of a myriad of diverse factors is imperative. It is noteworthy that some of these factors exhibit an inherent unpredictability. Among these factors, the psycho-emotional states inherent to each participant in the vehicular and pedestrian milieu hold particular significance. These states intricately govern the behavioral paradigms of drivers and pedestrians alike, thereby exerting influence over their reaction times and proclivity towards committing errors. Furthermore, these psycho-emotional states contribute, in a broader context, to the cultivation of a socio-communicative ambiance within which cooperation ensues, and a multitude of individuals engage in reciprocal interactions. This phenomenon, in turn, establishes a foundation for the emergence of unforeseen internal influences. Ergo, the amalgamation of psycho-emotional states, their interconnections, external determinants and their respective magnitudes of influence, the mechanisms of control and surveillance, as well as the methodologies and algorithms facilitating intervention in the aforementioned processes should be conceptualized as components of a sophisticated multi-level system.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3602-7945, fap_hiit@ukr.net

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0009-0008-8787-2907, Pomazkovmik1@gmail.com

³ асистент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-3438-0086, dmitrgan9@gmail.com

This system, in its entirety, lends itself amenable to scrutiny through the prism of systematic analysis, modeling techniques, and the application of probabilistic methodologies. The proposed research provides a theoretical basis for taking into account the stochastic effects of the psycho-physiological state of drivers, pedestrians and other road users on safety parameters and other target functions of the sustainable development of city road networks. The issues are important for the strategic and operational control of the functioning of transport systems, the improvement of the means of researching transport operations, modeling processes, the intellectualization of transport and traffic management.

Key words: *transport, transport system, urban street-road infrastructure, drivers, pedestrians, psychological state, emotional state, management, traffic organization, traffic safety.*

Постановка проблеми. Питання психічних станів, емоційних і когнітивних реакцій учасників дорожнього руху потребує детального вивчення, бо є одним з основних факторів, що впливають на безпеку і надійність функціонування транспортних мереж міст.

Сучасні світові тенденції, такі, як збільшення кількості транспортних засобів і, як наслідок, інтенсивності потоків на вулично-дорожній мережі (ВДМ), а також загальне розростання міст й агломерацій, формують стресостимулюючу атмосферу на дорогах. В містах України ситуація додатково ускладнюється постійними ризиками, пов'язаними з військовими діями. Аналізуючи їх вплив на транспортні системи, важливо враховувати не тільки фактичні збитки, але і пригнічений, напружений стан водіїв, пасажирів і пішоходів. Це підвищує вірогідність ДТП й інших критичних ситуацій у містах нашої держави.

Задля зменшення інтенсивності впливу негативних психоемоційних станів, важливо розуміти їх природу, вміти структурувати причинно-наслідкові зв'язки в системі взаємовідносин учасників руху та зовнішнього середовища, а також мати дієві алгоритми організаційно-управлінських заходів. На детальне опрацювання зазначених аспектів і спрямовано дане дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Поодинокі впливи фізіологічного, психічного, емоційного стану окремих учасників дорожнього руху і їх вплив на транспортний процес широко освітлені в українській науці. Зокрема, у працях В.А. Гайдукевича та О.Б. Потійчука з Національного університету водного господарства та природокористування [1]; О.М. Рудковського із Академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного [2]; О.В. Степанова із Харківського національного автомобільно-дорожнього університету [3]; І.О. Трунової, Т.Ю. Затравської, Р.Є. Стеця, І.П. Пістуна із Сумського державного університету [4] та інших підіймаються загальні питання індивідуальних станів кожного з фактичних і потенційних учасників руху.

Важливий внесок у розуміння загальної картини взаємозалежностей негативних психічних станів і поведінкових реакцій водіїв висвітлені в роботах вчених Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського А.В. Боярчука, М.М. Іванової, М.І. Гученка, [5] та Т.П. Гречко із Національної академії державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького [6].

Серед наукових праць іноземних дослідників особливий інтерес представляють роботи Т. Arakawa, R. Hibi, T. Fujishiro, (Технологічний університет Аіти, Гамагорі, Японія) [7], S. Milardo, P. Rathore, M. Amorim, U. Fugiglando, P. Santi and C. Ratti (Массачусетський технологічний інститут, США) [8], в яких всебічно розглянуті питання психоемоційних і психофізіологічних станів учасників дорожнього руху. Автоматизація відстеження цих станів розглядається у спільній праці Кембриджського університету і холдингової компанії JLR, авторами якої є Z. Ma, M. Mahmoud, P. Robinson, E. Dias, L. Skrypchuk [9].

Важливо зазначити, що систематизація психоемоційних станів різних учасників дорожнього руху як окремих компонентів загальної надсистеми і, тим більше, питання їх апроксимації й імплементації в процеси оперативного управління рухом на ВДМ міст, розглянуті дослідниками лише частково. У сучасній транспортній науці відчувається нестача чітких формалізованих алгоритмів дій, які не тільки дозволяли би врахувати фактичні рівні психоемоційного напруження певних груп на ВДМ, але й сприяли б зниженню негативних впливів. Для досяг-

нення цієї мети доцільним є використання системних методів, що базуються на чіткому структуруванні внутрішніх компонентів і підсистем та можливості їх алгоритмізації.

Метою дослідження є пошук оптимальних методів комплексного впливу на психоемоційний стан учасників дорожнього руху для зменшення суб'єктивних ризиків, кризових станів та загальної нестабільності в системі ВАДС.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести фундаментальний аналіз і синтез інформації щодо поодиноких і комплексних психоемоційних впливів, визначити й узагальнити внутрішньосистемні причинно-наслідкові зв'язки, характери й інтенсивності різнонаправлених впливів. Це дасть змогу сформувати теоретичний базис алгоритмізації управлінських впливів на загальний психоемоційний стан учасників дорожнього руху.

Виклад основного матеріалу. Розглядаючи транспортну систему міста як мережу інфраструктурних об'єктів і шляхів сполучення, по яким рухаються транспортні одиниці, можна дійти висновку, що стабільність її роботи цілком пов'язана зі стабільністю і прогнозованістю поведінки кожної з цих одиниць. Водій, що керує транспортним засобом, в одиницю часу знаходиться у певному психофізіологічному стані [10], на який впливають такі фактори, як:

- темперамент, особливості характеру та інші індивідуальні якості людини;
- наявність хронічних хвороб й інших довготривалих порушень фізіологічного характеру;
- наявність гострих хвороб й інших короткотривалих станів;
- довго- та короткотривалі психічні порушення;
- емоційний стан і загальний рівень нервового напруження, зокрема, фактори стресу і втоми, панічні атаки, хибні відчуття;
- фармакологічні впливи.

Ці фактори тісно пов'язані між собою, а також з низкою зовнішніх чинників. Вони є структурною основою загального стану водія чи іншого учасника транспортного процесу у його проекції на умовну шкалу часу. Сукупність таких станів для певної групи осіб, об'єднаних, наприклад, територіальними чинниками (рухом по певній ділянці ВДМ), формує загальний стан вибірки, який, в свою чергу, є основною структурною одиницею підсистеми мікрокомпонентів [11] (рис. 1).

Макрокомпоненти доцільно формувати для окремого району, міста або міської агломерації. Окрім зазначених підсистем до них мають включатися узагальнені стани груп, сформованих за різними критеріями, наприклад:

- усіх осіб, задіяних у транспортному процесі;
- осіб, об'єднаних у певну групу за соціальними критеріями;
- за демографічними критеріями;
- за економічними критеріями;
- за професійними критеріями тощо.

Фактори, здатні здійснити глобальний психоемоційний вплив на населення регіону, країни чи світу, не слід включати в склад макрокомпоненту системи, але обов'язково треба враховувати, наприклад, у вигляді коефіцієнтів кореляції [8, 12].

Зворотній (інформаційний) зв'язок компонентів і підсистем з умовним центром прийняття управлінських рішень здійснюється на засадах послідовного і безперервного аналізу, формування статистичних масивів та вибірок із них, створення апроксимацій, придатних до масового комп'ютеризованого обчислення та використання в моделювальних комплексах. Прямий (управлінський) зв'язок може носити особистісний характер і бути спрямований на окремих учасників руху чи малі групи [13] або мати вигляд заздалегідь спланованих організаційних заходів, що націлені на покращення інформаційного, технічного, технологічного забезпечення макрогрупи і, як наслідок, впливу на психоемоційний стан її учасників або на загальну соціально-економічну забезпеченість системи як структурної одиниці транспортного комплексу країни [14]. В останньому випадку вплив здійснюється не на муніципальному, а на державному рівні.

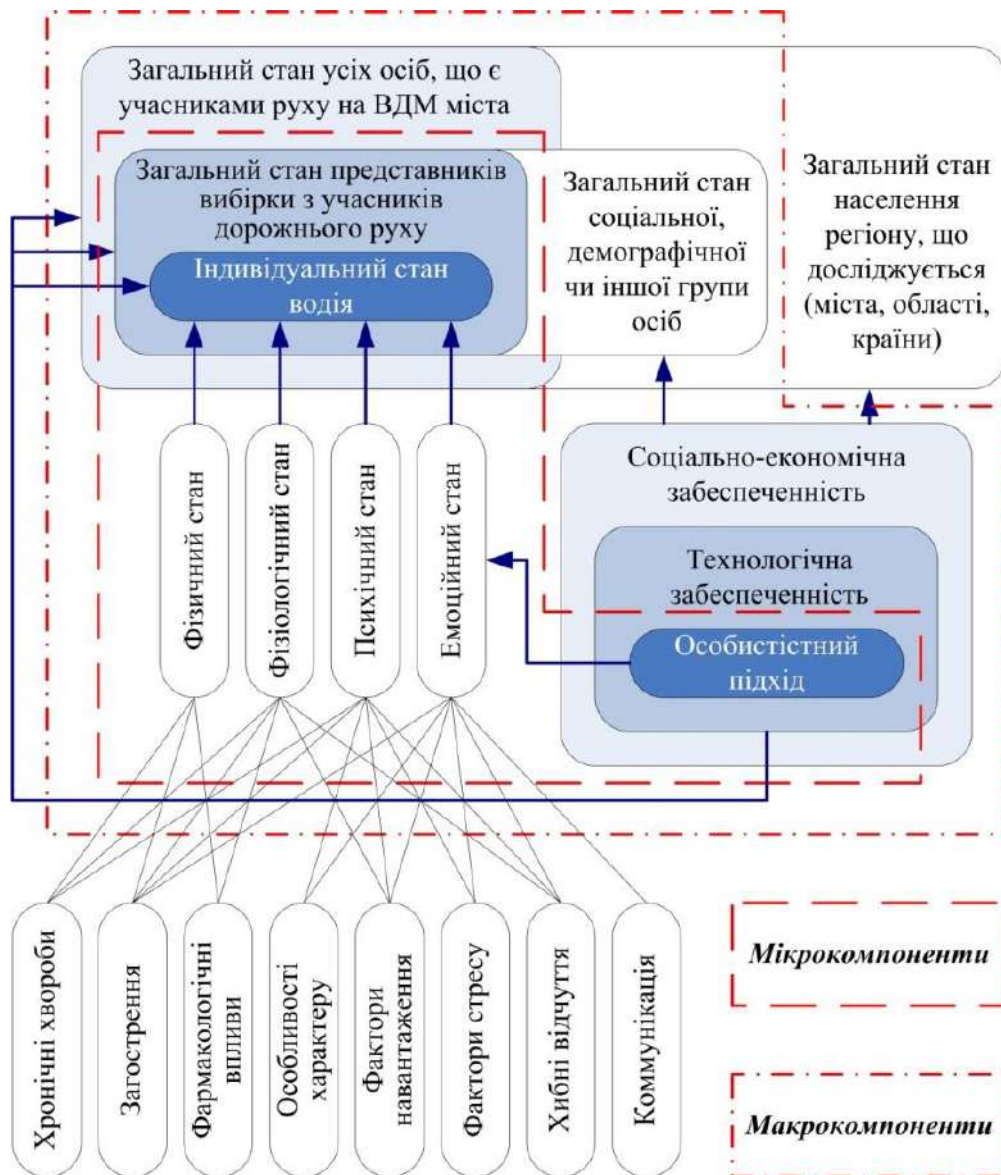


Рис. 1 – Спрощена структура системи психофізіологічних станів учасників дорожнього руху

Збір первинної інформації щодо поточного та довготривалого психоемоційного стану учасників дорожнього руху є складним завданням, для вирішення якого мають застосовуватися специфічні технічні засоби і методики [1]. Дослідження індивідуального стану водія, пасажир чи пішохода може бути суб'єктивним або об'єктивним. Під суб'єктивним мається на увазі оцінка психоемоційного стану безпосередньо особою, наприклад, за допомогою засобів анкетування та психологічних тестів. Таку інформацію легко зібрати, узагальнити та використати, але її достовірність викликає сумніви [6, 15].

Об'єктивна оцінка надається спеціалістом, групою спеціалістів або автоматизованими системами відстеження [7]. Експертний метод оцінки психоемоційного стану доцільно використовувати:

- перед випуском на лінію водіїв пасажирського транспорту і водіїв, задіяних у перевезенні небезпечних вантажів;
- безпосередньо на маршруті, якщо виконання транспортної роботи пов'язано з високим рівнем фізичного або нервового напруження, а також при подовженому (більше 9,5 год.) трудовому дні;

- у разі виникнення ДТП, інших фактично чи потенційно небезпечних ситуацій для покращення розуміння їх причин і зниження ризиків у майбутньому;
- масово-вибірковим методом серед певної групи учасників дорожнього руху з метою збору статистичних даних.

Наразі експертний метод є найбільш точним, але повільним і ресурсоємним [16]. Він потребує залучення сторонніх спеціалістів та індивідуальної роботи з кожним суб'єктом транспортного процесу, що досліджується. Значно пришвидшити збір даних можна за допомогою автоматизованих систем відстеження психоемоційних станів, розробкою яких зараз займаються провідні вчені європейських та американських університетів. У склад подібних систем входять:

1. *Засоби відеофіксації* – камери, встановлені безпосередньо у транспортних засобах, у транспортних вузлах або на навантажених ділянках ВДМ, які здійснюють постійну зйомку обличчя водія та надають потік даних до обчислювального блоку. Роль засобу фіксації може виконувати також особистий пристрій (смартфон, планшет, регістратор тощо) із спеціалізованим програмним забезпеченням. Важливо наголосити, що зйомка має організовуватися лише з інформованої згоди осіб.
2. *Обчислювальний блок* – представляє собою SoC або інший спрощений комп'ютеризований модуль з виділеним сховищем для зберігання інформації та процесором, на який покладено аналітичні завдання.
3. *Програмне забезпечення* – середовище, яке на базі сформованих алгоритмів знаходить залежності між змінами в зображенні (наприклад, напруженням лицьових м'язів, швидкості рухів) і задалегідь наданими зразками психоемоційних станів. У більш складних системах аналіз може здійснюватися на основі нейромереж.
4. *Блок інтерпретації і зв'язку* – слугує для подачі зібраних даних у дискретному або безперервному вигляді до кінцевого аналітичного центру, де інформація використовується для прийняття оперативних управлінських рішень.

Індивідуальна інформація, отримана будь-яким із зазначених методів, не має практичної цінності, поки не об'єднана в формалізовані масиви [9]. Доцільним є формування матриць психоемоційних станів для певної групи учасників дорожнього руху, наприклад, водіїв на під'їзді до небезпечного перехрестя або водіїв при старт-стопному русі у заторі. Матричний вигляд дозволяє ідентифікувати не тільки стани суб'єктів транспортного процесу, але і їх поточне положення на ВДМ, оперативно відстежувати будь-які зміни у них, а також проводити обчислювальні операції.

З точки зору ефективності, найдоцільнішим методом впливу на психоемоційний стан учасників дорожнього руху є особистісний підхід, який базується на комплексному аналізі причин виникнення негативних станів і реакцій, розробці методів зменшення їх впливу, впровадженні заходів з ліквідації можливих наслідків нестабільної поведінки [17]. Проте, в умовах сучасних, складних і розгалужених транспортних систем особистісний вплив потребує надзвичайно великих трудових і матеріальних витрат, тому його використання обмежене низкою критичних ситуацій, коли потребується точковий вплив на певну транспортну одиницю або невелику їх групу [18].

Для здійснення комплексного впливу на психоемоційний стан групи учасників дорожнього руху треба узагальнити групоутворюючі фактори та розробити оптимізаційні заходи, спираючись на виявлені комплексні проблеми. Наприклад, у групах, сформованих за професійними критеріями (водії-далекобійники, водії міського пасажирського транспорту тощо), поліпшення психоемоційного фону може досягатися шляхом реорганізації праці, створення адаптивних графіків, проведення масових заходів і, вже як підсистемний компонент, – індивідуальною роботою з членами тієї чи іншої вибірки. При цьому важливо пам'ятати, що учасники транспортного процесу – це і пішоходи, і пасажери громадського транспорту, й інші категорії населення, які теж потребують аналізу. Для них важливим критерієм буде рівень задоволення якістю транспортних послуг і функціонування транспортної системи міста в цілому. Це підводить нас до третьої, найбільш об'ємної групи впливів – оптимізації макрокомпонентів.

Вплив на психоемоційний стан надгруп (наприклад, усіх водіїв чи пішоходів), а також на узагальнений психоемоційний стан усіх осіб, що є учасниками руху на ВДМ міста, може здійснюватися декількома способами, зокрема:

- покращенням інформаційного, техніко-технологічного забезпечення транспортного процесу;
- покращенням матеріально-технічного забезпечення транспорту та інфраструктури;
- покращенням загальної соціально-економічної забезпеченості;
- соціополітичними впливами на населення;
- за допомогою медійних засобів тощо.

При будь-якому зовнішньому впливі на макрокомпонент повинен здійснюватися моніторинг змін в режимі реального часу, постійна оцінка ефективності заходів і, у разі необхідності, оперативне коригування прийнятої стратегії дій.

Висновки

Аналіз праць по впливу на психоемоційний стан учасників дорожнього руху, як транспортну надсистему, показав, що сучасні дослідження сформували надійний фундамент для розробок алгоритмів оперативного втручання в транспортний процес, але власне алгоритми ще не були детально розглянуті та апробовані. Синтез інформації про поодинокі впливи на водія як суб'єкт транспортного процесу, на їх групи та вибірки дозволяє пропонувати й впроваджувати конкретні управлінські методики, які, тим не менш, потребують постійного моніторингу для оцінки ефективності функціонування.

При розробці методів впливу на психоемоційний стан учасників дорожнього руху важливо проводити структурування системи за об'єктно-орієнтованими признаками, виділяти підсистеми мікро- та макрорівня, які мають аналізуватися та коригуватися різними методами. У складі цих підсистем вказуються внутрішні та зовнішні зв'язки, проводяться заходи зі збору деталізованої первинної інформації, створюються формалізовані матриці станів, придатні для опрацювання автоматизованими системами. Структура і обсяг інформації при цьому будуть залежати не лише від структури групи, що досліджується, але і від її положення у системній ієрархії. Після комплексних аналітичних заходів розробляються адаптивні заходи оптимізації психоемоційного стану формалізованої групи, які можуть застосовуватися для неї в цілому або для її компонентів в окремоті. Кінцевий вплив здійснюється на особистісному рівні для мікрокомпонентів або на різних структурних рівнях для макрокомпонентів. В останньому випадку найбільш дієвими є інформаційні, техніко-технологічні, матеріально-технічні та соціальні заходи.

В послідовних дослідженнях необхідно з'ясувати деталізовану структуру кожного зі вказаних механізмів впливу, розробити засоби моніторингу та контролю, сформувати адаптивні елементи алгоритмів, за допомогою яких можливо суттєво зменшити статистичні похибки в аналітичних даних. Для цього доцільно поєднувати натурні дослідження з заочними й анонімними емпіричними методами збору інформації безпосередньо у учасників дорожнього руху.

Перелік використаних джерел:

1. Гайдукевич В.А., Потійчук О.Б. Основи транспортної психології : навч. посібник. Рівне : НУВГП, 2012. 207 с.
2. Рудковський О.М. Особливості методики підготовки водія автомобіля з використанням сучасних технологій моделювання з урахуванням його психофізіологічних якостей. *Військово-технічний збірник*. 2013. № 1(8). С. 107-112. DOI: <https://doi.org/10.33577/2312-4458.8.2013.107-112>.
3. Степанов О.В. Вплив психофізіологічних характеристик водія на безпеку дорожнього руху. *Механіка та машинобудування*. 2010. № 1. С. 14-22.
4. Психофізіологічна надійність водіїв автотранспортних засобів / Трунова І.О., Затравська Т.Ю., Стець Р.Є., Пістун І.П. *Вісник Національного транспортного університету*. 2011. № 19. С. 271-277.
5. Боярчук А.В., Іванова М.М., Гученко М.І. Дослідження взаємозв'язку між психофізичними характеристиками водія та його здатністю уникати зіткнень. *Нові технології*. 2009. № 2. С. 30-36.
6. Гречко Т.П. Негативні емоційні стани водіїв автотранспорту в екстремальних умовах професійної діяльності та особливості їх психокорекції : дис. ... канд. псих. наук : 19.00.09. Хмельницький, 2011. 232 с.

7. Arakawa T., Hibi R., Fujishiro T. Psychophysical assessment of a driver's mental state in autonomous vehicles. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*. 2019. Vol. 124. Pp. 587-610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.05.003>.
8. Understanding Drivers' Stress and Interactions With Vehicle Systems Through Naturalistic Data Analysis / S. Milardo, P. Rathore, M. Amorim, U. Fugiglando, P. Santi, C. Ratti. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2022. Vol. 23. Iss. 3. Pp. 14570-14581. DOI: <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3130438>.
9. Automatic detection of a driver's complex mental states / Z. Ma, M. Mahmoud, P. Robinson, E. Dias, L. Skrypchuk. *Computational Science and Its Applications : Proceedings of the 17th International Conference, Trieste, Italy, 3-6 July 2017*. Pp. 678-691. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62398-6_48.
10. Гюлев Н.У. К вопросу о зависимости функционального состояния водителя от его индивидуально-типологических свойств. *Комунальне господарство міст : наук.-техн. зб. Харків : ХНАМГ, 2011. Вип. 97. С. 314-319.*
11. Гюлев Н.У. Особливості ергономіки та психофізіології в діяльності водія : навч. посібник. Харків : ХНАМГ, 2012. 185 с.
12. Експертний аналіз дорожньо-транспортних пригод / П.В. Галаса, В.Б. Кисельов, А.С. Куйбіда, Ю.О. Лахно, Г.М. Надгорний. Київ : Експерт-сервіс, 1995. 192 с.
13. Назаркін О.А., Сазонов О.Г. Підготовка до прийняття самостійних рішень в оперативних нестандартних ситуаціях при водінні автомобіля : метод. розробка з дисципліни «Автомобільна підготовка». Харків : НУВС, 2005. 25 с.
14. Поліщук В.П., Кунда Н.Т. Інформаційне забезпечення учасників дорожнього руху. Київ : ВПОЛ, 1998. 129 с.
15. Рациборинський В.В., Рациборинська-Полякова Н.В., Мацко Л.А. Індивідуально-психологічні характеристики водія як фактор безпеки дорожнього руху. *Наукові нотатки : міжвузівськ. зб. Луцьк, 2014. № 45. С. 465-471.*
16. Трофімов Ю.Л. Інженерна психологія : підручник. Київ : Либідь, 2002. 264 с.
17. Шапенко Є.М. Визначення комплексу факторів, які впливають на роботу водіїв на маршрутах міського пасажирського транспорту. *Вісник Національного транспортного університету*. 2012. Вип. 26. С. 355-358.
18. Burlakova G.Y., Ganzheev D.I. Psychophysiological status of the driver as a stochastic factor of traffic. *SWorldJournal*. 2022. Iss. 11. Part 2. Pp. 7-14. DOI: <https://doi.org/10.30888/2663-5712.2022-11-02-074>.

References:

1. V.A. Haidukevych, and O.B. Potiichuk, *Osnovy transportnoi psikhologii : navch. posibnyk* [Basics of transport psychology: a study guide]. Rivne, Ukraine: NUWEE Publ., 2012. (Ukr.)
2. О. Rudkov's'kyi, «Osoblyvosti metodyky pidhotovky vodiia avtomobilia z vykorystanniam suchasnykh tekhnologii modeliuvannia z urakhuvanniam yoho psykhofiziologichnykh yakosteï» [«Features of methods of preparation of car driver with the use of modern technologies of design taking into account his psychological and physiological qualities»], *Viiskovo-tekhnichnyi zbirnyk – Military Technical Collection*, № 1(8), pp. 107-112, 2013. doi: **10.33577/2312-4458.8.2013.107-112**. (Ukr.)
3. O.V. Stepanov, «Vplyv psykhofiziologichnykh kharakterystyk vodiia na bezpeku dorozhnoho rukhu» [«The influence of psychophysiological characteristics of the driver on road safety»], *Mekhanika ta mashynobuduvannia – Mechanics and Mechanical Engineering*, № 1, pp. 14-22, 2010. (Ukr.)
4. I.O. Trunova, T.Iu. Zatravska, R.Ie. Stets, and I.P. Pistun, «Psykhofiziologichna nadiinist vodiiv avtotransportnykh zasobiv» [«Psychophysiological reliability of motor vehicle drivers»], *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – The National Transport University Bulletin*, № 19, pp. 271-277, 2011. (Ukr.)
5. A.V. Boiarchuk, M.M. Ivanova, and M.I. Huchenko, «Doslidzhennia vzaiemozviazku mizh psykhofizychnymy kharakterystykamy vodiia ta yoho zdatnistiu unykaty zitknen» [«Research on the relationship between the driver's psychophysical characteristics and his ability to avoid

- collisions»], *Novi tekhnologii – New technologies*, № 2, pp. 30-36, 2009. (Ukr.)
6. Т.Р. Hrechko, «Nehatyvni emotsiini stany vodiiv avtotransportu v ekstremalnykh umovakh profesiinoi diialnosti ta osoblyvosti yikh psykhhokorektsii» [«Negative emotional states of motor vehicle drivers in extreme conditions of professional activity and peculiarities of their psychocorrection»], PhD thesis, Khmelnytskyi, Ukraine, 2011. (Ukr.)
 7. T. Arakawa, R. Hibi, and T. Fujishiro, «Psychophysical assessment of a driver's mental state in autonomous vehicles», *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, vol. 124, pp. 587-610, 2019. doi: **10.1016/j.tra.2018.05.003**.
 8. S. Milardo, P. Rathore, M. Amorim, U. Fugiglando, P. Santi, and C. Ratti, «Understanding Drivers' Stress and Interactions With Vehicle Systems Through Naturalistic Data Analysis», *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, iss. 3, pp. 14570-14581, 2022. doi: **10.1109/TITS.2021.3130438**.
 9. Z. Ma, M. Mahmoud, P. Robinson, E. Dias, and L. Skrypchuk, «Automatic detection of a driver's complex mental states», in Proceedings of the 17th International Conference «Computational Science and Its Applications», Trieste, Italy, 2017, pp. 678-691. doi: **10.1007/978-3-319-62398-6_48**.
 10. N.U. Hiulev, «K voprosu o zavysymosti funktsyonalnoho sostoiannya vodytelia ot eho yndyvydualno-typolohycheskykh svoistv» [«On the issue of the dependence of the driver's functional state on his individual typological properties»], *Komunalne hospodarstvo mist – Municipal economy of cities*, vol. 97, pp. 314-319, 2011. (Rus.)
 11. N.U. Hiulev, *Osoblyvosti erhonomiky ta psykhhofiziolohii v diialnosti vodiia : navch. posibnyk* [Peculiarities of ergonomics and psychophysiology in the activity of a driver: study guide]. Kharkiv, Ukraine: O. M. Beketov NUUE Publ., 2012. (Ukr.)
 12. P.V. Halasa, V.B. Kyselov, A.S. Kuibida, Yu.O. Lakhno, and H.M. Nadhornyi, *Ekspertnyi analiz dorozhno-transportnykh pryhod* [Expert analysis of traffic accidents]. Kyiv, Ukraine: Ekspert-servis Publ., 1995. (Ukr.)
 13. O.A. Nazarkin, and O.H. Sazonov, *Pidhotovka do pryiniattia samostiinykh rishen v operatyvnykh nestandartnykh sytuatsiakh pry vodinni avtomobilia : metod. rozrobka z dystsypliny «Avtomobilna pidhotovka»* [Preparation for making independent decisions in operational non-standard situations when driving a car: methodical development from the discipline «Automotive training»]. Kharkiv, Ukraine: KNUA Publ., 2005. (Ukr.)
 14. V.P. Polishchuk, and N.T. Kunda, *Informatsiine zabezpechennia uchasnykiv dorozhnoho rukhu* [Information support for road users]. Kyiv, Ukraine: VIPOL Publ., 1998.
 15. V.V. Ratsyborynskiy, N.V. Ratsyborynska-Poliakova, and L.A. Matsko, «Indyvidualno-psykhholohichni kharakterystyky vodiia yak faktor bezpeky dorozhnoho rukhu» [«Individual and psychological characteristics of the driver as a factor of road traffic safety»], *Naukovi notatky – Scientific notes*, № 45, pp. 465-471, 2014. (Ukr.)
 16. Yu.L. Trofimov, *Inzhenerna psykhholohiia : pidruchnyk* [Engineering psychology: a textbook]. Kyiv, Ukraine: Lybid Publ., 2002. (Ukr.)
 17. Ye.M. Shapenko, «Vyznachennia kompleksu faktoriv, yaki vplyvaiut na robotu vodiiv na marshrutakh miskoho pasazhyrskoho transportu» [«Determination of a complex of factors that affect the work of drivers on urban passenger transport routes»], *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – The National Transport University Bulletin*, vol. 26, pp. 355-358, 2012. (Ukr.)
 18. G.Y. Burlakova, and D.I. Ganzheev, «Psychophysiological status of the driver as a stochastic factor of traffic», *SWorldJournal*, iss. 11, part 2, pp. 7-14, 2022. doi: **10.30888/2663-5712.2022-11-02-074**.

Рецензент: О.В. Клецька
канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ»

Стаття надійшла 7.07.2023
Стаття прийнята 15.08.2023

**БІОГАЗ ЯК ДОБАВКА ДО СТИСНЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ
ДЛЯ ДВИГУНІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

У статті розглядається можливість застосування біогазу для двигунів транспортних засобів (ТЗ), у якості добавки до стисненого природного газу та приведено результати експериментальних досліджень екологічних показників і паливної економічності ТЗ, обладнаного бензиновим двигуном та переобладнаного для роботи на суміші біогазу та стисненого природного газу. Доведено, що використання біогазу як моторного палива для двигунів ТЗ зменшує енергетичну залежність від нафтових палив та викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах двигуна ТЗ, а використання біогазу як добавки до стисненого природного газу надасть можливість не витрачати додаткові ресурси для його очищення. Виконано порівняльний аналіз паливно-економічних та екологічних показників роботи двигуна ТЗ в режимах Європейського міського їздового циклу під час роботи двигуна на стисненому природному газі, суміші біогазу та стисненого природного газу та рідкому нафтовому паливі бензині марки А-92.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння, транспортний засіб, біогаз, стиснений природний газ, паливна економічність, екологічні показники.

R.V. Symonenko, S.I. Shymanskyi, I.V. Gritsuk, D.S. Pohorletskyi. Biogas as an additive to compressed natural gas for vehicle engines. The article considers the possibility of using biogas for vehicle engines, as an additive to compressed natural gas, and gives the results of experimental studies of environmental indicators and fuel efficiency of a vehicle equipped with a gasoline engine and converted to work on a mixture of biogas and compressed natural gas. Currently, there are many vehicles in operation that operate without feedback on the content of oxygen in the exhaust gases, they run on gasoline and gas motor fuels, in view of this, the results of these studies are very relevant. It has been proven that the use of biogas as motor fuel for vehicle engines reduces the energy dependence on petroleum fuels and reduces emissions of harmful substances in the exhaust gases of the vehicle engine, and the use of biogas as an additive to compressed natural gas will provide an opportunity not to spend additional resources for its purification. The use of biogas as a motor fuel confirms the possibility of its use in traditional constructions of vehicle engine power systems. With simple, reliable and proven production technologies, biogas can become a cost-effective and efficient type of fuel obtained from renewable sources. In this way, it is possible to satisfy these needs by using alternative types of fuels, one of these types of fuels is biogas, which is obtained in the process of anaerobic decomposition of organic waste. Biogas consists of methane CH₄, carbon dioxide CO₂, small amounts of carbon monoxide CO, hydrogen H₂, nitrogen N₂, oxygen O₂, water vapor H₂O and hydrogen sulfide H₂S. The possibility of using a mixture of fuels, namely biogas as an additive to compressed natural gas, is substantiated. A comparative analysis of the fuel-economical and environmental performance of the vehicle engine in the modes

¹ д-р техн. наук, доцент, заступник начальника центру наукових досліджень комплексних транспортних проблем, ДП «ДержавтотрансНДІпроект», м. Київ, ORCID: 0000-0002-4269-5707, rsymonenko@insat.org.ua

² канд. техн. наук, зав. сектору забезпечення обігу карток для цифрових тахографів, ДП «ДержавтотрансНДІпроект», м. Київ, ORCID: 0000-0001-5316-2466

³ д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7065-6820, gritsuk_iv@ukr.net

⁴ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1256-8053, pohorletskyi.dmytro@ksma.ks.ua

of the European urban driving cycle was performed while the engine was running on compressed natural gas, a mixture of biogas and compressed natural gas, and liquid petroleum fuel gasoline brand A-92.

Key words: *internal combustion engine, vehicle, biogas, compressed natural gas, fuel efficiency, environmental indicators.*

Постановка проблеми. Одним з видів моторних палив є біогаз, що являє собою продукт, одержаний з допомогою анаеробних бактерій у процесі розкладання та бродіння органічних матеріалів (при певних умовах: вологість, кислотність, температура) за відсутності повітря, різних органічних матеріалів. Він є практично невичерпним видом палива. Застосування біогазу як моторного палива підтверджує можливість його застосування у традиційних конструкціях транспортних засобів. Маючи прості, надійні та перевірені технології виробництва, біогаз може стати економічно вигідним та ефективним видом палива, яке отримують з відновлювальних джерел. Двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ) є одним з джерел забруднення навколишнього середовища, працюючи у широкому діапазоні швидкісних та навантажувальних режимів роботи, визначаючих умови руху ТЗ в транспортному потоці. Застосовуючи експлуатаційні режими роботи, а саме: усталений рух, розгін, уповільнення, гальмування двигуном, примусовий холостий хід і активний холостий хід. Транспортні двигуни під час експлуатації ТЗ працюють, загалом в неусталених режимах, з послідовними та циклічними переходами з одного режиму до іншого.

Зростаючі потреби суспільства в енергії спонукають до збільшення витрати енергоносіїв, що призводить до виснаження енергоресурсів планети та забруднення навколишнього середовища. На даний час гостро стало питання економії природних ресурсів планети при збільшенні виробництва енергетичних ресурсів, необхідних для задоволення повсякденних потреб суспільства. Задовольнити ці потреби можливо шляхом застосування альтернативних видів палив, які отримують з поновлювальних джерел. Одним з таких видів палив є біогаз, який отримують в процесі анаеробного розкладання органічних відходів. Біогаз складається з метану CH_4 , діоксиду вуглецю CO_2 , в невеликих кількостях оксиду вуглецю CO , водню H_2 , азоту N_2 , кисню O_2 , водяної пари H_2O та сірчистого водню H_2S .

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Біогаз має інший вплив на роботу ДВЗ, ніж традиційні види моторних палив. Основним джерелом енергії для транспортних засобів є ДВЗ, також він є джерелом забруднення навколишнього середовища. Звичайні експлуатаційні режими роботи це: розгін, уповільнення, гальмування двигуном, усталений рух, примусовий холостий хід та активний холостий хід. Двигуни ТЗ в процесі експлуатації працюють, як правило, в неусталених режимах, з послідовним циклічним переходом з одного режиму до іншого. Характеристики повністю або частково очищеного біогазу подібні до стисненого природного газу (СПГ). Його зберігають та транспортують у стисненому або зрідженому стані, доставляють на заправні станції за допомогою спеціальних автоцистерн [1]. Недоліками біогазу та природного газу під час їх використання у якості моторних палив, у порівнянні з рідкими видами палива, є: мала концентрація енергії в 1 м^3 горючої суміші, це призводить до зменшення ефективної потужності двигуна ТЗ (двигуни з іскровим запалюванням 11...12% з оптимізацією кута випередження запалювання $\theta_{\text{вип.зап}}$ та 17...19% – без оптимізації $\theta_{\text{вип.зап}}$). Для горючих сумішей при $\alpha = 1$ нижча теплота згоряння 1 м^3 становить: суміш бензину та повітряна – $h_{\text{H}} = 3739 \text{ КДж/м}^3$; газу та повітря – $h_{\text{H}} = 3404 \text{ КДж/м}^3$, а біогазу та повітря (при $\text{CH}_4 = 62\%$) – $h_{\text{H}} = 2168 \text{ КДж/м}^3$. Згідно розрахунку зниження теплоти горючої суміші двигуна ТЗ 1 м^3 під час використання природного газу становить 8,7%, біогазу 42,1%, а при застосуванні суміші з 80% природного газу та 20% біогазу, зменшення теплоти згоряння 1 м^3 горючої суміші становить 15,25% [2]. Для запобігання зниження енергетичних показників двигуна ТЗ та втрати енергії на очищення біогазу під час застосування його як моторного палива, доцільно використовувати його у складі суміші з природним газом.

Метою дослідження є обґрунтування можливості застосування суміші палив, а саме біогазу, як добавки до стисненого природного газу для двигунів транспортних засобів. Розглянути застосування біогазу як моторного палива для покращення паливної економічності (зменшення

енергетичної залежності від нафтових палив) та зменшення викидів шкідливих речовин у відпрацьованих газах ТЗ.

Виклад основного матеріалу. Експериментальні дослідження роботи двигуна ТЗ на бензині, СПГ і суміші СПГ та біогазу проводились на ТЗ марки (ВАЗ-2101), який було переобладнано для роботи на газовому паливі. Регулювання складу паливоповітряної суміші в двигуні ТЗ здійснено згідно показників розрідження у впускному колекторі (на бензині – карбюратор змішувач, на СПГ – редуктор, дозатор газу та карбюратор змішувач, без використання зворотного зв'язку за вмістом кисню у відпрацьованих газах (ВГ) двигуна ТЗ.

На даний час в експлуатації перебуває багато транспортних засобів, які працюють без зворотного зв'язку за вмістом кисню у відпрацьованих газах (ВГ), вони працюють на бензині та газових моторних паливах, з огляду на це результати цих досліджень є дуже актуальними. Для виставлення об'єктивної оцінки показників двигуна ТЗ в неусталених швидкісних та навантажувальних режимах роботи, відповідно для ТЗ в несталих режимах руху використано Європейський міський їздовий цикл NEDC (New Urban Driving Cycle) Правила ЄЕК ООН №83 [1-3]. Дослідження проводилися на роликівому гальмівному стенді, у відповідності з заданими в часі швидкостями, для точного визначення рівня викидів шкідливих речовин з ВГ. Під час проведення експериментальних досліджень для визначення доцільності застосування біогазу як одного з видів моторного палива у суміші з СПГ було використано значну його кількість. У зв'язку з цим, а особливо з дефіцитом біогазу в Україні, який використовується для проведення експериментальних досліджень транспортних двигунів, було розроблено методику для моделювання газу, який містить метан та діоксид вуглецю у зазначених пропорціях. На рис. 1 приведено результати вимірювань миттєвої витрати палива під час випробування ТЗ на роликівому гальмівному стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу при живленні транспортного двигуна сумішшю палив (20% біогазу та 80% СПГ) і змодельованим газом (6% CO₂ та 94% СПГ), на рис. 2 приведені результати вимірювання миттєвої концентрації викидів шкідливих речовин у ВГ [4-5].

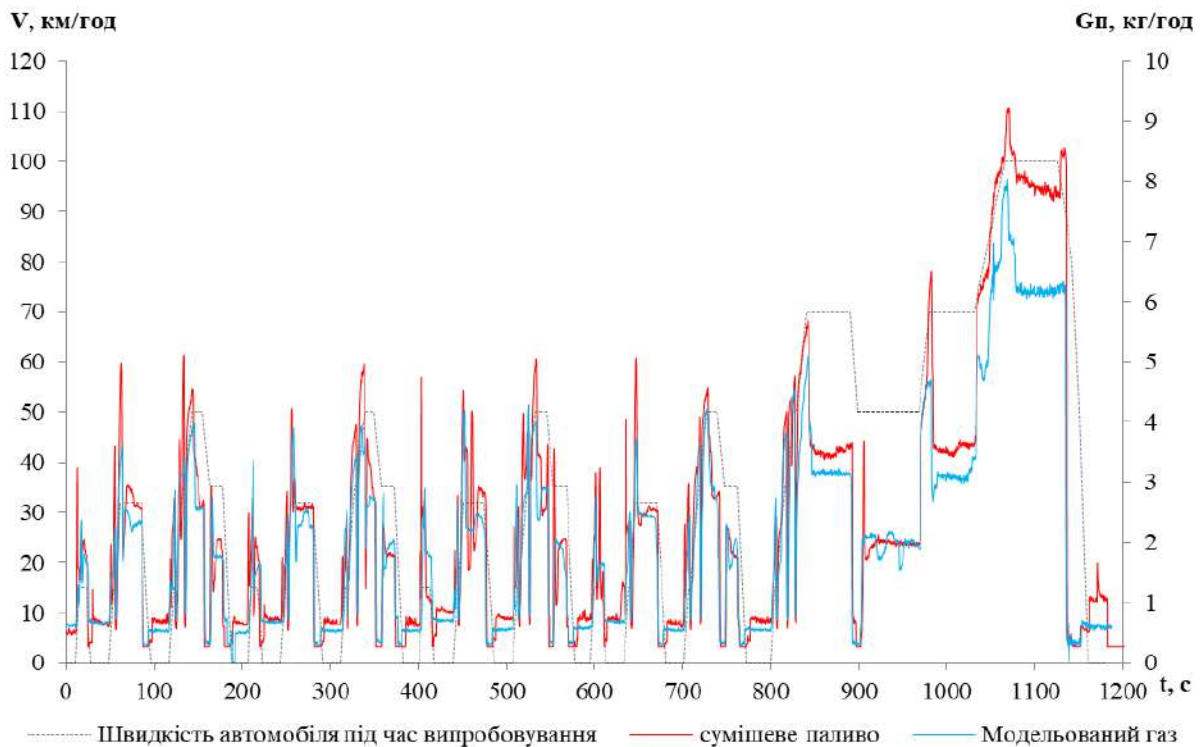


Рис. 1 – Миттєва витрати палива G_p під час випробування ТЗ на гальмівному роликівому стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу

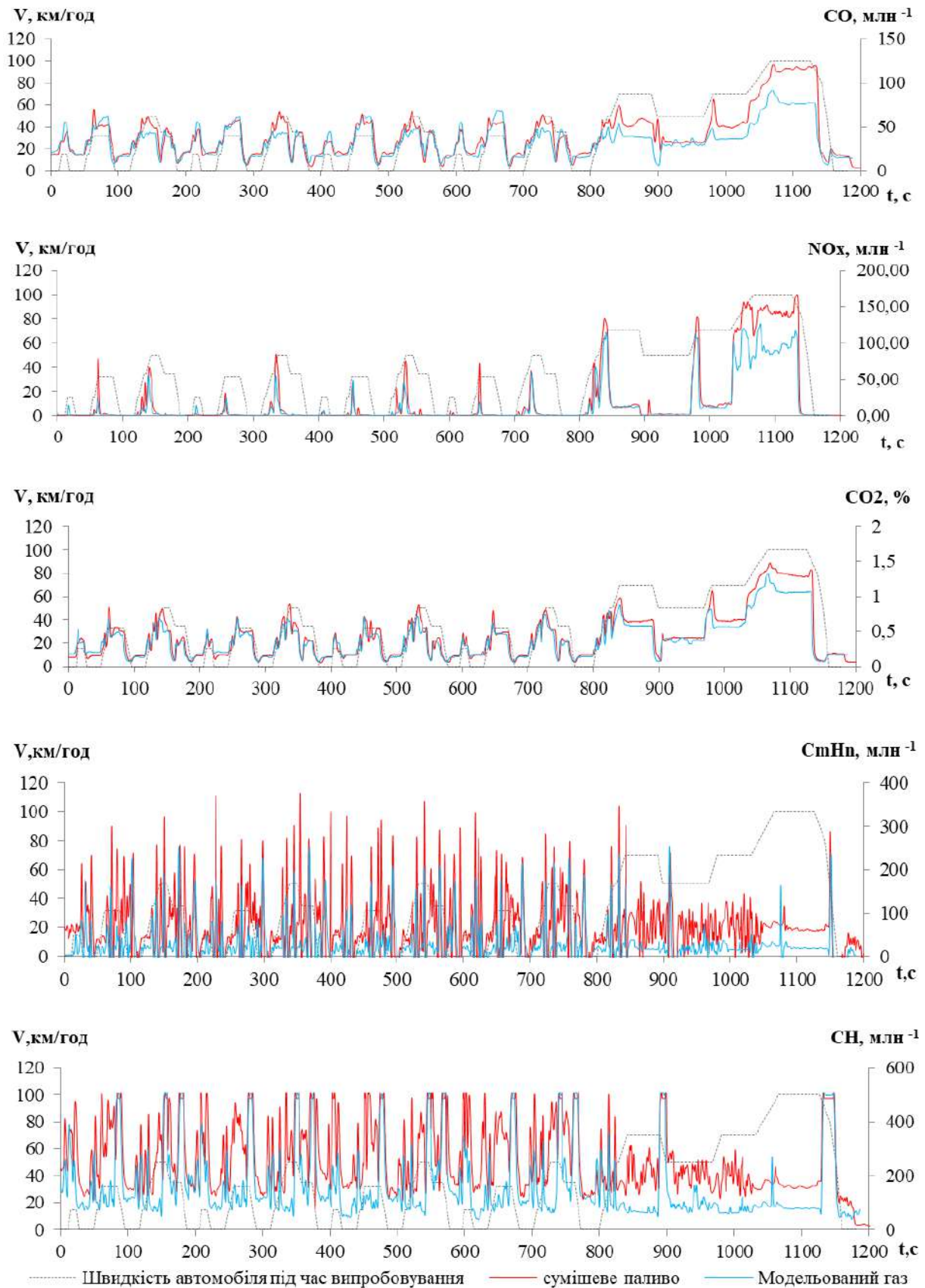


Рис. 2 – Концентрація викидів шкідливих речовин у ВГ під час випробування ТЗ на гальмівному роликовому стенді згідно Європейського їздового циклу

Результати проведених випробовувань на динамометричному роликовому стенді в режимах руху, згідно Європейського їздового циклу ТЗ обладнаного двигуном (марки 21011), працюючого на суміші палив та змодельованим газом, продемонстровано в табл. 1.

Таблиця 1

Масові викиди шкідливих речовин у ВГ та витрата палива ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011)

Паливо	Витрата палива, г/цикл	Масові викиди шкідливих речовин у ВГ			
		G_{CO} , г/км	G_{NOx} , г/км	G_{CO_2} , г/км	G_{CmHn} , г/км
Суміш СПГ та біогазу	720,56	0,5313	0,4552	113,2	0,3463
Змодельований газ	677,35	0,5040	0,4269	106,4	0,3334

Згідно результатів проведених випробувань ТЗ на динамометричному гальмівному роликовому стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу під час роботи двигуна ТЗ на суміші палив, витрата палива збільшилася на 6% у порівнянні з роботою двигуна ТЗ на змодельованому газу.

Масові викиди шкідливих речовин у ВГ транспортного засобу під час живлення змодельованим газом у порівнянні з живленням сумішшю палив зменшуються: оксиди азоту G_{NOx} на 6,2%, діоксид вуглецю G_{CO_2} на 6%, оксиди вуглецю G_{CO} на 5,1%, не метанові вуглеводні G_{CmHn} на 3,7%.

Проведений аналіз експериментальних досліджень стверджує, що змодельований газ відповідає суміші палив та може бути застосований для масштабних експериментальних досліджень.

Для проведення масштабної серії експериментальних досліджень застосовували змодельований газ (CO_2 – 6%; CH_4 – 94%), який відповідає суміші CH_4 – 80% та біогаз 20%, вміст CO_2 в якому 6%. Біогаз, який застосовано при проведенні досліджень, має склад: CO_2 – 30%, CH_4 – 57%, та інші гази, що не приймають участь у процесі згорання [4]. На рис. 3 показано миттєве значення витрати палива $G_{п} = f(t)$, які були отримані під час випробувань ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011) на динамометричному гальмівному роликовому стенді у режимах руху за Європейським їздовим циклом.

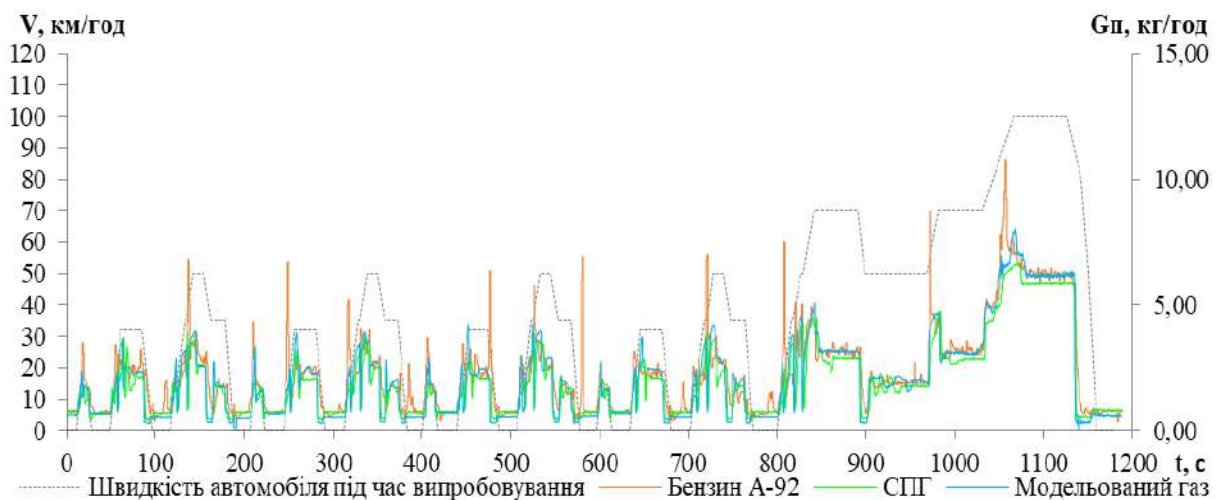


Рис. 3 – Витрата палива $G_{пал}$ транспортного засобу обладнаного двигуном (марки 21011) на динамометричному гальмівному роликовому стенді

Результати експериментальних випробувань ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011) під час живлення різними видами палив, приведено в табл. 2 і 3. Згідно результатів випробувань ТЗ на динамометричному гальмівному роликовому стенді з імітацією режимів Європейського міського їздового циклу та живленням двигуна ТЗ СПГ і змодельованим газом, у порівнянні з бензином марки А-92, було визначено, що витрата палива (г/цикл) під час живлення СПГ зменшилась на 13,1%, а змодельованим газом на 9,8%.

Таблиця 2

Витрата палива під час випробувань ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011), на роликовому стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу

Паливо	г/цикл	МДж/цикл	на 100 км
Бензин А-92	750,81	33,04	9,17 л/100км
СПГ	652,61	30,02	7,96 м ³ /100км
Змодельований газ	677,35	29,26	7,8 м ³ /100км

Таблиця 3

Масові викиди шкідливих речовин у ВГ під час випробувань ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011), на динамометричному гальмівному роликовому стенді з імітацією режимів Європейського міського їздового циклу

Масові викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах	Тип палива		
	Бензин марки А-92	СПГ	Змодельований газ
G_{CO} , г/км	2,7743	0,7379	0,5040
G_{CO_2} , г/км	180,8	127,3	106,4
G_{CH} , г/км	1,5051	2,7941	1,7749
G_{NOx} , г/км	1,7855	1,7580	0,4269
G_{CmHn} , г/км	1,4502	0,7352	0,3334
$G_{\Sigma CO}$, ум. г/км	80,741	75,315	19,103

Палива, які застосовувались під час проведення експериментальних досліджень мали різну питому теплоту згорання, згідно цьому твердженню оцінка якості їх тепловикористання приведено за витратою палива у енергетичному еквіваленті (МДж/цикл). Під час роботи двигуна ТЗ та живлення його СПГ (46 МДж/кг) відбувається зменшення витрати палива в енергетичному еквіваленті на 9,1%, а під час живлення змодельованим газом (43,2 МДж/кг) – на 11,8% відносно бензину марки А-92 (44 МДж/кг), що було затрачено на виконання роботи під час випробувань з імітацією режимів Європейського міського їздового циклу. На рис. 4 приведено результати вимірювань миттєвих концентрацій викидів шкідливих речовин у ВГ двигуна ТЗ під час проведення випробування ТЗ на динамометричному гальмівному роликовому стенді у режимах руху згідно Європейського їздового циклу.

Згідно отриманих концентрацій викидів шкідливих речовин у ВГ розраховано масові викиди деяких компонентів і сумарні масові викиди, приведені до СО (табл. 3). Екологічні показники транспортного засобу під час переходу на живлення змодельованим газовим паливом покращуються у порівнянні з бензином марки А-92. Наприклад, оксид вуглецю G_{CO} під час живлення СПГ менший на 73,4%, а змодельованим газовим паливом – 81,8%, оксиди азоту G_{NOx} під час живлення СПГ менші на 1,5%, а змодельованим газовим паливом – 76,1%, діоксид вуглецю G_{CO_2} під час живлення СПГ менше на 29,6%, а змодельованим газовим паливом – на 41,2%, неметанові вуглеводні G_{CmHn} під час живлення СПГ менші на 49,3%, а змодельованим газовим паливом – на 77%, але сумарні вуглеводні G_{CH} – збільшуються під час живлення СПГ на 46,1%, а змодельованим газовим паливом – на 15,2% [4-5].

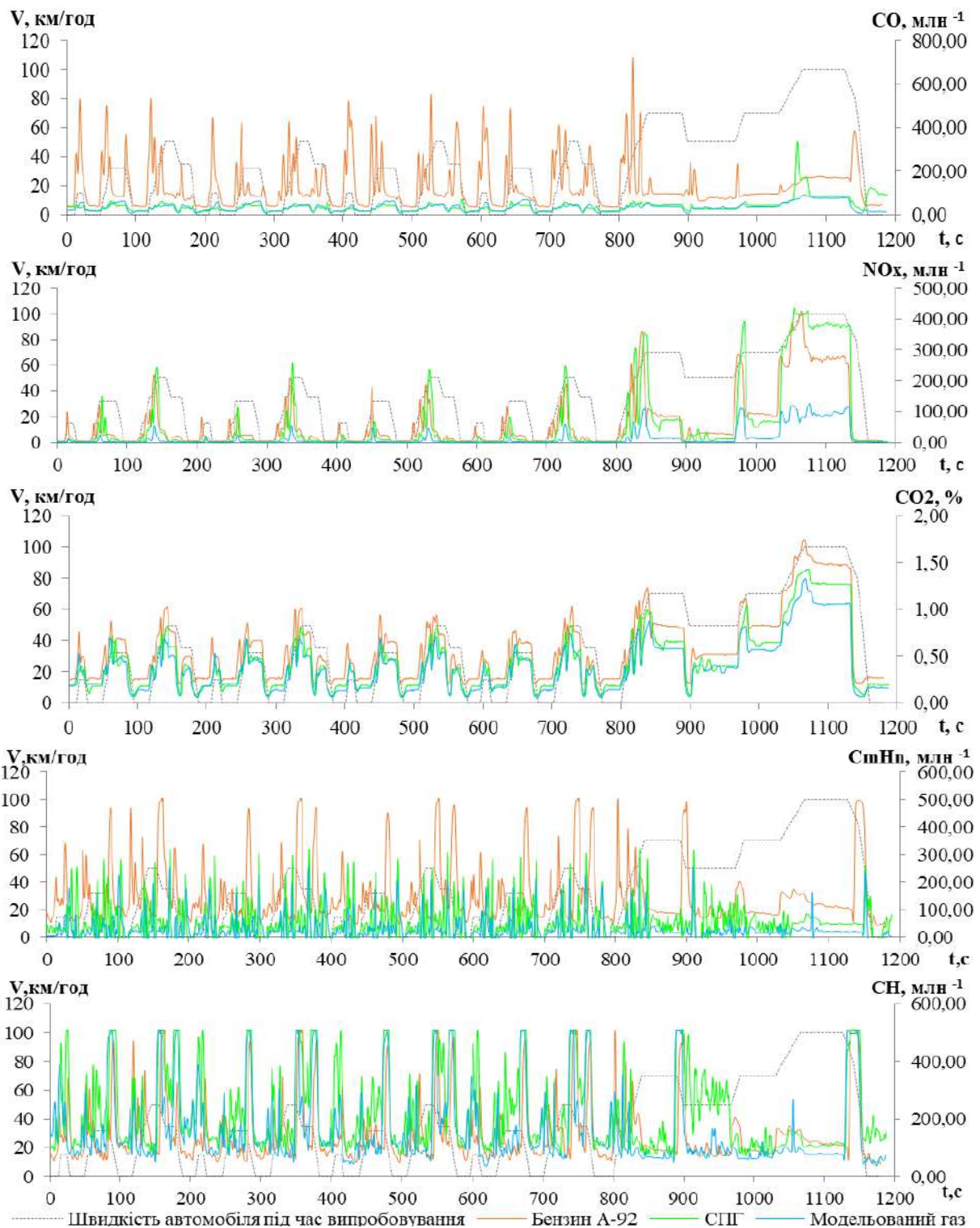


Рис. 4 – Миттєві концентрації викидів шкідливих речовин у ВГ двигуна ТЗ під час випробовувань на динамометричному гальмівному роликівому стенді

Сумарні масові викиди шкідливих речовин у ВГ ТЗ, зведені до CO, є екологічною оцінкою об'єкту, їх розраховують за масовими викидами у ВГ та коефіцієнтами відносної агресивності ($NO_x = 41,1$; $CO = 1$; $CH = 3,16$) [5]. Значення сумарних масових викидів шкідливих речовин у ВГ транспортного засобу, зведених до CO, наведені у табл. 3. Масові викиди шкідливих речовин у ВГ, зведені до CO, ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011), на динамометричному

гальмівному роликовому стенді з імітацією режимів Європейського міського їздового циклу, під час живлення СПГ, при порівнянні з бензином марки А-92, зменшилися на 1,1%, а під час живлення змодельованим газом, в порівнянні з бензином марки А-92, зменшилися на 76,3% [4-5].

Висновки

Згідно результатів проведених досліджень, можливо зробити висновок, що застосування суміші палив (які під час випробовувань заміщували подібним, змодельованим газовим паливом) зменшує концентрації та викиди шкідливих речовин у ВГ транспортного засобу. Випробування ТЗ, обладнаного двигуном (марки 21011), переобладнаного для живлення СПГ, показали, що масові викиди шкідливих речовин у ВГ, а саме $G_{\text{СmHn}}$, G_{CO} , G_{NOx} , зменшилися під час живлення двигуна ТЗ СПГ і змодельованим газовим паливом, у порівнянні з бензином марки А-92, але G_{CH} навпаки – збільшуються. За результатами проведених випробувань встановлено, що сумарні масові викиди шкідливих речовин у ВГ ТЗ, зведені до СО, в імітації режимів Європейського міського їздового циклу, під час живлення двигуна ТЗ СПГ зменшуються на 1,1%, а змодельованим газовим паливом – на 76,3% в порівнянні з бензином марки А-92.

Таким чином, використання біогазу як моторного палива для двигунів транспортних засобів зменшує енергетичну залежність від нафтових палив та викиди шкідливих речовин у відпрацьованих газах. А використання біогазу як добавки до стисненого природного газу дає можливість не витратити додаткові ресурси для його очищення.

Перелік використаних джерел:

1. Біогаз. – URL: <http://rea.org.ua/dieret/Fuels/biogas.html> (дата звернення: 15.05.2023).
2. Використання біогазу як моторного палива / Шиманський С.І., Симоненко Р.В., Мерзиевська Л.П., Говорун А.Г. *Автомобіліст України*. 2013. № 6. С. 13-15.
3. Разработка научных основ управления эколого-экономическими показателями / А.П. Кудряш та ін. *Двигуни внутрішнього згорання*. 2001. № 1. С. 10-64.
4. Шиманський С.І. Використання біогазу як добавки до стисненого природного газу для живлення двигунів транспортних засобів: дис... канд. техн. наук : 05.22.20. Київ, 2020. 200 с.
5. Екологія та автомобільний транспорт: навч. посібник / Ю.Ф. Гутаревич та ін. Вид. 2-г., переробл. та допов. Київ : Арістей, 2008. 296 с.

References:

1. Biohaz (Biogas) [Online]. Available: <http://rea.org.ua/dieret/Fuels/biogas.html>. Accessed on: May 15, 2023).
2. S.I. Shymanskyi, R.V. Symonenko, L.P. Merzhyievska, and A.H. Hovorun, «Vykorystannia biohazu yak motornoho palyva» [«Use of biogas as motor fuel»], *Avtoshliakhovuk Ukrainy*, № 6, pp. 13-15, 2013.
3. A.P. Kudriash, A.P. Marchenko, N.K. Riazantsev, A.P. Stokov, and A.F. Shekhovtsov, *Razrabotka nauchnykh osnov upravleniya ekoloho-ekonomychnykh pokazateliamy* [Development of scientific foundations for managing environmental and economic indicators], *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia – Internal combustion engines*, № 1, pp. 10-64, 2001.
4. S.I. Shymanskyi, «Vykorystannia biohazu yak dobavky do stysnenoho pryrodnoho hazu dlia zhyvlennia dvyhuniv transportnykh zasobiv» [«Use of biogas as an additive to compressed natural gas to power vehicle engines»], PhD thesis, Kyiv, 2020.
5. Yu.F. Hutarevych, D.V. Zerkalov, A.H. Hovorun, A.O. Korpach, and L.P. Merzhyievska, *Ekolohiia ta avtomobilnyi transport: navch. posibnyk* [Ecology and road transport: a study guide]. Kyiv, Ukraine: Aristei Publ., 2008.

Рецензент: А.І. Головань
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 13.07.2023
Стаття прийнята 25.08.2023

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

До публікації у збірнику приймаються тільки наукові статті, виконані відповідно до вимог Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003р. № 7-05/1, які мають наступні необхідні елементи: **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; **формулювання цілей статті** (постановка завдання); **виклад основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; **висновки** з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку та **перелік використаних джерел** (оформлений відповідно до стандарту – ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання»). Список джерел повинен бути складений в порядку спогяду в тексті. Посилання на літературу поміщають у квадратні дужки. Після списку використаних джерел надається пристайейна бібліографія латиницею **References**, 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; лівє, правє – по 25 мм Основний текст набирається шрифтом Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал – 1,0. Червоний рядок абзаців відповідає відступу – 1 см. Нумерація сторінок не проставляється. Вирівнювання тексту виконується по ширині. Для спеціальних символів і формул використовувати шрифт Symbol MT Extra, в редакторі формул слід використовувати математичний курсив. Графічний матеріал, представлений у вигляді малюнків і графіків, повинен бути вмонтований в текст статті.

Стаття повинна містити номер УДК (в лівому верхньому кутку). На наступному рядку по правому полю, жирним шрифтом, розмір 11 – прізвище, ім'я та по батькові (у називному відмінку) з надрядковими номерами; в нижній частині першої сторінки у вигляді зноски курсивом, розмір шрифту 10 – науковий ступінь, вченє звання (як що немає – посада), місце роботи (без скорочень), місто, ORCID при наявності, адреса електронної пошти; іноземні автори вказують назву країни. Далі, після міжрядкового інтервалу друкується назва статті (прописними літерами, по центру, без заключної крапки); анотації двома мовами (для статей не англійською мовою обсяг анотації англійською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова; для статей не українською мовою обсяг анотації українською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), першою наводиться анотація на мові статті (відступ зліва і справа по 1 см, курсивом) та ключові слова (від трьох до восьми).

Наприкінці статті повинні бути приведені ініціали, прізвище, вчений ступінь, вченє звання, місце роботи рецензента; дата подачі статті.

До статті надаються наступні супровідні матеріали (**по одному примірнику**):

- експертний висновок про можливість публікації статті у відкритому друці;
- рецензія фахівця за профілем статті, в якій повинні бути відображені наукова новизна результатів, їх цінність і значущість, зауваження по суті статті і по її оформленню;
- згода на обробку персональних даних (окрема для кожного з співавторів);
- ліцензійний договір (у двох екземплярах).

Форми необхідних документів та вимоги до оформлення статей представлені на сайті (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 28.12.2023 р.

Папір тип № 2. Умов. друк. ар. 44,98. Тираж 100.

Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу. Ціна договірна