

**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 49

Том 2

Серія: Технічні науки

Дніпро, 2024

**MINISTRY OF EDUCATION AND
SCIENCE OF UKRAINE**

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

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

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

COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS

**Published twice a year,
since 1995**

Issue 49

Volume 2

Section: Technical sciences

Dnipro, 2024

Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки. Дніпро: ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2024. Вип. 49, том 2. 216 с. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.49.2.2024>.

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Іщенко А.О.

Angeliki G. Lekatou

Hossam Ahmed Mohamed

Halfa

Sergey Edward Lyshevski

Dmytro Makarchuk

Oleksandr Vrublevskiy

Азархов О.Ю.

Белоконь К.В.

Білоусов Є.В.

Булгаков М.П.

Бялобржеський О.В.

Головань А.І.

Грищук І.В.

Губинський М.В.

Єфременко В.Г.

Кириллова О.В.

Клецька О.В.

Ковалевська О.С.

Кухар В.В.

Лук'яненко А.О.

Мазур В.О.

Маменко П.П.

Онищенко О.А.

Парфененко Ю.В.

Петренко Т.Г.

Плахтій О.А.

Погорлецкий Д.С.

Проніна О.І.

Прус В.В.

Пяतिकоп О.Є.

Саєнко Ю.А.

Симоненко Р.В.

Сілі І.І.

Тарандушка А.А.

Твердомед В.М.

Ткачов В.В.

Худяков І.В.

Чабак Ю.Г.

Чеберячко Ю.І.

Чупринов Є.В.

Шумило О.М.

Савенко О.С.

головний редактор, д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**
Dr., PhD, University of Ioannina (UOI), **Greece**

Dr., PhD, Central Metallurgical R&D Institute (CMRDI), Cairo, **Egypt**

Dr., PhD, Rochester Institute of Technology, New York, **USA**

PhD, Solent University, Southampton, **UK**

Dr., PhD, University of Warmia and Mazury in Olsztyn, Olsztyn, **Poland**

д-р мед. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

канд. техн. наук, доц., Запорізький національний університет, **Україна**

д-р техн. наук, проф., Херсонська державна морська академія, **Україна**

канд. техн. наук, доц., Одеський національний морський університет, **Україна**

канд. техн. наук, доц., КрНУ ім. Михайла Остроградського, **Україна**

канд. техн. наук, доц., Одеський національний морський університет, **Україна**

д-р техн. наук, проф., Національна металургійна академія України, **Україна**

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет, **Україна**

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

канд. техн. наук, доц., Донбаська державна машинобудівна академія, **Україна**

д-р техн. наук, проф., «Технічний університет «Метінвест Політехніка»,

Україна

канд. техн. наук, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона

Національної академії наук України, **Україна**

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

доктор філософії, доц., Херсонська державна морська академія, **Україна**

д-р техн. наук, проф., НУ «Одеська морська академія», **Україна**

канд. техн. наук, доц., Сумський державний університет, **Україна**

канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, **Україна**

канд. техн. наук, доц., УкрДУЗТ, **Україна**

канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія, **Україна**

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

д-р техн. наук, доц., КрНУ ім. Михайла Остроградського, **Україна**

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

д-р техн. наук, проф., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

д-р техн. наук, проф., Національний транспортний університет, **Україна**

канд. техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

д-р техн. наук, проф., Черкаський державний технологічний університет, **Україна**

канд. техн. наук, доц., Державний університет інфраструктури та техно-

логій, **Україна**

д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка», **Україна**

канд. техн. наук, доц., Херсонська державна морська академія, **Україна**

д-р техн. наук, доц., ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

д-р техн. наук, проф., НТУ «Дніпровська політехніка», **Україна**

канд. техн. наук, доц., Державний університет економіки і технологій, **Україна**

д-р техн. наук, проф., Одеський національний морський університет, **Україна**

відповідальний секретар, канд. техн. наук, ДВНЗ «ПДТУ», **Україна**

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:** vestnik.pgtu@gmail.com (для надсилання статей).

Ідентифікатор в Реєстрі суб'єктів у сфері друкованих медіа – R30-02289, згідно з рішенням Нацради України з питань телебачення і радіомовлення від 21.12.2023 № 1821. 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 26.12.2024 р.

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

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

ЗМІСТ

CONTENTS

**ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

**ELECTRICAL ENGINEERING AND
ELECTROMECHANICS**

**Кривонос В.Є., Матвієнко О.М.,
Кривонос В.В., Пруднікова Н.Д.,
Савенко О.С., Скосирев В.Г.**
*Аналіз та концепція розвитку неруйні-
вних тестових методів діагностування
ізоляції електродвигуна*

6

**V.E. Kryvonosov, O.M. Matviienko,
V.V. Kryvonosov, N.D. Prudnikova,
O.S. Savenko, V.H. Skosyriev**
*Analysis and concept of development of
non-destructive test methods for diagnos-
ing electric motor insulation*

ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

HEAT POWER ENGINEERING

Ялова А.М., Бондар Н.В.
*Проблема підвищення робочого ресурсу
деталей енергетичного обладнання*

22

A. Yalova, N. Bondar
*The problem of increasing the working re-
source of energy equipment details*

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

**AUTOMATION AND COMPUTER-
INTEGRATED TECHNOLOGIES**

**Горбійчук М.І., Василенчук М.З.,
Козутяк М.І.**
*Дослідження динамічних властивос-
тей непрямого нагрівника нафти як
об'єкта автоматичного керування*

29

**M. Horbiichuk, M. Vasylenchuk,
M. Kohutyak**
*Study of dynamic properties of an indirect
oil heater as an object of automatic control*

БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

BIOMEDICAL ENGINEERING

**Зайцев Д.В., Азархов О.Ю., Сілі І.І.,
Єфременко Б.В.**
*Прилад просторової навігації для людей
з обмеженими можливостями*

41

**D.V. Zaitsev, O.Yu. Azarkhov, I.I. Sili,
B.V. Efremenko**
*Spatial navigation device for people with
disabilities*

Франчевська Г., Яворська Є.
*Математичне моделювання електро-
кардіосигналу плода для розробки про-
грамного забезпечення для його достові-
рного виділення в комп'ютерних кардіо-
діагностичних системах*

50

H. Franchevska, E. Yavorska
*Mathematical modeling of the fetal electro-
cardiosignal for the development of soft-
ware for reliable extraction in computer
cardiodiagnostic systems*

Котик М.В.
*Доступне лікування діабету: стратегії
розробки економічно ефективних неін-
вазивних систем моніторингу рівня
глюкози*

61

M. Kotyk
*Affordable diabetes treatment: strategies
for the development of cost-effective non-
invasive glucose monitoring systems*

ЕЛЕКТРОНІКА

ELECTRONICS

**Хребтова О.А., Перекрест А.А.,
Зачепа Ю.В., Зачепа Н.В.,
Некрасов А.В., Маслій М.А.**
Удосконалення алгоритму керування
системи ПЧ-АД механізму переміщення
плит фільтр-пресу ФКМ-500

**O.A. Khrebtova, A.L. Perekrest,
Iu.V. Zachepa, N.V. Zuchepa,
A.V. Nekrasov, M.A. Masliy**
71 Improvement of the control algorithm for
the VFD-IM system of the plate movement
mechanism in the FKM-500 filter press

**ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ
НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА**

**ENVIRONMENTAL PROTECTION
TECHNOLOGY**

Волошин В.С., Бурко В.А.
Відповідність принципу термодинаміч-
ної двоєдності, як причини відходоутво-
рювання

V.S. Voloshyn, V.A. Burko
86 Improvement of individual protection
equipment against falls from a height us-
ing the methods of focal objects and control
questions

Волошин В.С.
Чому людина починає програвати кон-
куренцію за термодинамічну нерівно-
важність, як фактор розвитку в на-
вколишньому техногенному середовищі

V.S. Voloshyn
93 Why is the human begins to lose the com-
petition for thermodynamic disequilibrium
as a factor of development in the techno-
genic environment

ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

CIVIL SECURITY

**Мітіна Н.Б., Плис М.М.,
Когтева О.П., Герасименко В.О.,
Мініна Ю.О.**
Обґрунтування впливу метеорологічних
та топографічних умов на розповсю-
дження хмари забрудненого повітря

**N. Mitina, M. Plys,
O. Kohtieva, V. Herasyumenko,
Y. Minina**
105 Substantiation of the influence of meteorolo-
gical and topographical conditions on the
spread of a cloud of polluted air

РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

RIVER AND SEA TRANSPORT

**Худяков І.В., Грицук І.В.,
Погорлецький Д.С., Черненко В.В.,
Рибалко І.В.**
Можливості тренажера у формуванні
професійної компетенції морського фа-
хівця у відповідності з вимогами конве-
нції ПДНВ

**I.V. Khudiakov, I.V. Gritsuk,
D.S. Pohorletsky, V.V. Chernenko,
I.V. Rybalko**
118 Possibilities of the trainer in forming the
professional competence of a maritime
specialist in accordance with the require-
ments of the PDNV convention

Абрамов Г.С., Плотніков В.І.
Застосування підходу Байєса для ви-
значення надійності навігаційного ком-
плексу

G.S. Abramov, V.I. Plotnikov
127 Application of bayesian approach for de-
termining the reliability of the navigation
complex

Томчаковський Г.Г.
Сучасні технології спостереження за
океаном: аналіз та перспективи розви-
тку

G.G. Tomchakovsky
137 Modern technologies for ocean observation:
analysis and development prospects

- | | | |
|--|-----|--|
| <p>Голубева С.М., Гороховська О.К.
Динамічна модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами</p> | 148 | <p>S. Golubieva, O. Horokhovska
<i>Dynamic model of a propulsion diesel-electric plant with unipolar machines</i></p> |
| <p>Заєць А.Ю., Коскіна Ю.О., Дрожджин О.Л.
SWOT-аналіз у системі управління ризиками морських бурових платформ</p> | 158 | <p>A.Yu. Zaiets, Yu.O. Koskina, O.L. Drozhzhyn
<i>SWOT-analysis in the risk management system of offshore drilling platforms</i></p> |
| <p>Ганношина І.М., Левченко О.В.
Методи оцінювання ефективності навчання під час тренажерної підготовки судноводіїв</p> | 172 | <p>I. Hannoshina, O. Levchenko
<i>Assessment methods for the training effectiveness during the navigators' simulator training</i></p> |
| <p>Фуклев О.І., Вечурко О.М.
Знання-орієтовані технології прийняття рішень під час руху суден у стиснутих водах</p> | 178 | <p>O. Fukliev, O. Vechurko
<i>Knowledge-oriented decision-making technologies during vessel operations in pressured waters</i></p> |
| <p>Тимошук О.М., Левченко О.В., Куц О.В.
Дослідження щодо оцінки морської підготовки як невід'ємної частини морської освіти та навчання</p> | 186 | <p>O. Tymoshchuk, O. Levchenko, O. Kushch
<i>A study to assess maritime training as an integral part of maritime education and training</i></p> |
| <p>Тимошук О.М., Шапран Ю.Є.
Метод управління автономними інверторами напруги суднових електроенергетичних установок</p> | 195 | <p>O. Tymoshchuk, Y. Shapran
<i>Control method for autonomous voltage inverters of ship power plants</i></p> |

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

ROAD TRANSPORT

- | | | |
|---|-----|--|
| <p>Головащенко О.В.
Систематизація схем структури забезпечення технічної готовності транспортних засобів шляхом удосконалення матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення їх працездатності</p> | 201 | <p>O.V. Holovashchenko
<i>Systematization of structure schemes for ensuring the technical readiness of vehicles by improving the material and technical support of the processes of restoring their workability</i></p> |
|---|-----|--|

ДО УВАГИ АВТОРІВ

216 INTO CONSIDERATION OF AUTHORS

**141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА,
ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

UDC 631.371

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321345

© Kryvonosov V.E.¹, Matviienko O.M.², Kryvonosov V.V.³, Prudnikova N.D.⁴,
Savenko O.S.⁵, Skosyriev V.H.⁶**ANALYSIS AND CONCEPT OF DEVELOPMENT OF NON-DESTRUCTIVE
TEST METHODS FOR DIAGNOSING ELECTRIC MOTOR INSULATION**

The timely detection of a critical state and forecasting the development of an emergency situation in the insulation of AM (asynchronous motor) windings is the main direction of increasing the economic efficiency of electrical engineering systems. One of the methods of reducing electricity losses is the compensation of reactive power, both complex and local. Asynchronous motors consume more than 60% of the produced electricity. Modern microprocessor devices, which are implemented in the automation of electrical engineering complexes, enable to combine local compensation of the reactive power consumed by synchronous motors with a diagnostic system for monitoring and predicting the residual life of an asynchronous motor and detecting a winding circuit in the stator windings of an electric motor. The purpose of the work is the analysis of the existing non-destructive test methods for diagnosing the state of the dielectric property of the insulation of AM windings, substantiating the direction of the development of diagnostic test methods and forecasting the decrease in the property of the body insulation of AM windings with the use of residual energy in the conditions of using a capacitor bank. To achieve the goal, the following tasks were solved: an analysis of the control methods of body and turn insulation was conducted; for the first time, the energy remaining in the capacitors after their disconnection was used in non-destructive test methods; it was proven that to predict the residual resource of the motor housing insulation, the time constant of the capacitor discharge decay can be effectively used as a criterion parameter, similarly, to detect a short circuit in the stator windings, the periodic voltage decay time on the capacitor can serve as a useful criterion; established interrelationships between changes in the resistance of the casing insulation of the windings and the time constant of the capacitor discharge. The most important result is the establishment of a unique relationship between the state of the case insulation and the value of the voltage decay time constant on the capacitor; change in period time and the number of turned-off turns in the AM stator winding. The most significant result is that the change in the time constant was used for the first time as a criterion parameter for predicting the residual life of the dielectric properties of the motor body insulation, and the change in the time period as a criterion parameter for the detection of a winding circuit. The significance of the study is that the value obtained after the first disconnection of the

¹ Dsc (Engineering), professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: 0000-0002-8219-021X, kryvonosov@nubip.edu.ua

² postgraduate student, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: 0009-0002-0577-8949, matviienkooleksandrm@gmail.com

³ leading specialist of energy management, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: 0009-0008-7083-7881, krivonosov.val05@gmail.com

⁴ PhD (Engineering), associate professor, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, ORCID: 0009-0004-0890-5952

⁵ PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi State Technical University», Dnipro, ORCID: 0000-0002-8108-2575, savenko_o_s@pstu.edu

⁶ PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskyi State Technical University», Dnipro, skosyrev_v_g@pstu.edu

electric motor from the network is taken as the basic value of the constant decay time. Methods have been proposed and software developed for the device, which allows monitoring non-phase voltage modes of the network and current circuits during the operation of the electric motor, and when the electric motor is disconnected from the network – to control the value of the insulation resistance of the stator windings of the electric motor and the cable, as well as to predict the residual life of the electric motor.

Keywords: *corpus insulation of electric motor windings, forecasting, residual resource, local compensation of reactive power, discharge time constant, capacitor, software, windings of electric motor stator windings, transient processes, test diagnostics.*

Кривонос В.Є., Матвієнко О.М., Кривонос В.В., Пруднікова Н.Д., Савенко О.С., Скоцирєв В.Г. Аналіз та концепція розвитку неруйнівних тестових методів діагностування ізоляції електродвигуна. *Умови роботи асинхронного двигуна (АД) пов'язані з неякісною напругою мережі живлення, підвищеною запиленістю, вологістю та кислотністю навколишнього середовища, технологічними та випадковими струмовими перенавантаженнями, що є наслідком зниження властивості ізоляції та непередбачених аварійних ситуацій. Щорічно до 80% аварійного виходу АД з ладу припадає на пошкодження ізоляції як корпусної до 20-25%, так і міжвиткової, на долю якої випадає до 80%. Своєчасне виявлення критичного стану і прогнозування розвитку аварійної ситуації ізоляції обмоток АД є головним напрямком підвищення економічної ефективності електротехнічних комплексів. Одним з методів зниження втрат електроенергії є компенсація реактивної потужності як комплексна, так і локальна. Асинхронні двигуни споживають більше 60% виробленої електроенергії. Застосування асинхронних двигунів у нерегульованому електроприводі складає до 75% від усього парку електроприводу. Щорічно аварійний вихід з експлуатації АД становить до 20-25%, а в деяких випадках – до 30%. Сучасні мікропроцесорні пристрої, які впроваджуються в автоматизацію електротехнічних комплексів, дозволили поєднати локальну компенсацію реактивної потужності, що споживають асинхронні двигуни, з діагностичною системою контролю та прогнозування залишкового ресурсу роботи асинхронного двигуна та виявлення виткового замикання у статорних обмотках електродвигуна. Метою роботи є аналіз існуючих тестових неруйнівних методів діагностування стану діелектричної властивості ізоляції обмоток АД, обґрунтування напрямку розвитку методів тестової діагностики та прогнозування зниження властивості корпусної ізоляції обмоток АД із застосуванням залишкової енергій в умовах використання батареї конденсаторів. Для досягнення мети вирішені такі завдання: проведено аналіз методів контролю корпусної та виткової ізоляцій; вперше енергію, яка залишається в конденсаторах після їх відключення, використано в тестових неруйнівних методах; доведено, що для прогнозування залишкового ресурсу корпусної ізоляції електродвигуна в якості критеріального параметру доцільно використовувати постійну часу затухання розряду конденсатора, а для виявлення виткового замикання в статорних обмотках в якості критеріального параметра доцільно використовувати час періоду періодичного затухання напруги на конденсаторі; встановлені взаємозв'язки зміни опору корпусної ізоляції обмоток та постійною часу розряду конденсатора. Найважливішим результатом є встановлення однозначного взаємозв'язку стану корпусної ізоляції та величини постійної часу згасання напруги на конденсаторі; зміна часу періоду та кількості вимкнутих витків у статорній обмотці АД. Найбільш суттєвим результатом є те, що зміну постійної часу вперше використано як критеріальний параметр для прогнозування залишкового ресурсу діелектричних властивостей корпусної ізоляції електродвигуна, а зміну часу періоду – як критеріальний параметр виявлення виткового замикання. Значимістю дослідження є те, що базовим значенням постійної часу згасання приймається значення, отримане після першого відключення електродвигуна від мережі. Запропоновано методи і розроблено програмне забезпечення для пристрою, що дозволяє контролювати неповнофазні режими*

напруги мережі та струмових ланцюгів в період роботи електродвигуна, а при відключенні електродвигуна від мережі – контролювати величину опору ізоляції статорних обмоток електродвигуна і кабелю, а також прогнозувати залишковий ресурс експлуатації електродвигуна.

Ключові слова: корпусна ізоляція обмоток електродвигуна, прогнозування, залишковий ресурс, локальна компенсація реактивної потужності, постійна часу розряду, конденсатор, програмне забезпечення, виткові замикання статорних обмоток електродвигуна, перехідні процеси, тестова діагностика.

Description of the problem. Over 80% of the total amount of electrical equipment of electric drives of electrotechnical complexes of industrial and agro-industrial enterprises are asynchronous motors (AM) with a short-circuited rotor [1]. These motors often operate under harsh conditions, including low-quality voltage of the power supply network, increased dustiness, humidity and acidity of the environment, technological and accidental current overloads, which is a consequence of the reduction of insulation properties and unforeseen emergency situations [2, 3]. Every year, up to 80% of the emergency failure of AS occurs due to damage to the insulation, both body insulation up to 20-25%, and inter-turn insulation, which accounts for up to 80% [4]. Timely detection of a critical state and forecasting the development of an emergency situation of insulation of AM windings is the main direction of increasing the economic efficiency of electrotechnical complexes.

Assessing the technical condition of AM is critical for improving the reliability and trouble-free operation of electrical systems.

A promising direction for assessing the insulation condition of AM windings is the development of test diagnostics using capacitor battery energies.

In works [5, 6] it was proved that with local compensation of reactive power, by connecting a battery of capacitors in parallel with the AM, the energy that remained in the capacitors after they were turned off was used to assess the condition of the casing insulation of the AM windings [7]. The energy of the capacitors is used in relay protection to power switches, as well as to improve the starting characteristics of AM [8].

Timely diagnostics of AM conditions can significantly reduce repair costs and loss of working time of service personnel associated with unplanned repairs and stoppages of technological processes.

Thus, the development of new non-destructive methods of controlling damage to the body and inter-turn insulation, without taking AM out of operation, with the use of energy-saving approaches, is an urgent task at the present time, which will increase the reliability of electrotechnical complexes (ETC) and avoid economic losses.

Analysis of the latest research and publications. In terms of economic expediency, a number of industrial enterprises are forced to switch from a system of planned and preventive repairs to repairs and prevention upon detection before an emergency situation. During maintenance according to the actual condition, the normal operation of the AM is not disturbed due to human intervention. Currently, the development of methods and means of monitoring the current condition of engines allows the implementation of maintenance technology based on the actual condition [9].

As a rule, the assessment of the state of insulation of the stator windings of AM is carried out during technological pauses.

There are various methods of detecting damage to the AM insulation. A diagnostic method based on the analysis of the deformed magnetic field in the gap of the machine [10] or based on the method of compensation of the field in the air gap is used to detect damage to the turn insulation in the AM windings. It is shown that when the number of closed turns increases, the ampere-turns in these turns increase, accordingly, the intensity of the magnetic field in the air gap also increases. The application of the estimate of the reverse magnetic field, which occurs as a result of the turn shorting, is inefficient for a small number of closed turns in multi-turn windings.

In the works of the authors [11], a method of determining the inter-turn short circuit was developed, in which the shift between the angles of phase currents and phase voltages during the operation of AM is controlled. This additional diagnostic parameter controls the asymmetric modes in the AM stator winding. But in this work, there is no study of the influence of the asymmetry of the phase voltage of the power supply network on the sensitivity of detecting the number of closed turns.

In work [12], the authors applied vector analysis when detecting the initial occurrence of a winding circuit taking into account the asymmetry of the voltage in the power supply network, but with a dynamic change in the asymmetry the voltage of the power supply network, the reliability of detecting the initial moment of the appearance of a winding circuit decrease.

In works [13], the method and devices for detecting a winding circuit using the coefficients of asymmetry of phase currents and the coefficient of asymmetry of the voltage of the power supply network are presented.

In work [14], the most widely used test method for monitoring the body and turn insulation in the windings of a non-working electric motor is described - it is the millivoltmeter and ammeter method.

In work [15], the authors considered test tests of inter-turn and body insulation of a non-working electric motor. An impulse voltage of 1000V-2500V is applied to the phase windings, signals are recorded in the form of the amplitude value of the voltage from each of the windings of the electric motor. Signals are compared during tests of two windings, the information is processed by the Proni method.

The disadvantages of the method are that it is used during tests of a non-working electric motor, requires a separate high-voltage power source, to ensure sufficient sensitivity requires N - the number of samples during the test, and does not take into account the discrepancy in the parameters of the electric motor windings [16].

In the work of the authors Jameson N.J., Azarian M.H., Pecht M. [17] a method for detecting the degradation of insulation used in low-voltage devices by evaluating the change in the impedance characteristic is presented. It is shown that the impedance of the coil changes differently under different load conditions, which reflects signs of insulation deterioration due to different damage mechanisms. This method can be used to estimate the insulation life of electromagnetic coils during preventive maintenance.

Existing diagnostic methods for monitoring the occurrence of pre- and emergency situations require additional equipment and do not always have sufficient sensitivity. In known scientific works, it is not enough to consider the methods of non-destructive test diagnostics of control and forecasting of the decrease in the property of case insulation from the use of technological equipment, for example, static compensators of reactive power. The development of new methods allows to automate the monitoring of the condition of the housing insulation of electric motors

Purpose and task statement. Analysis of existing non-destructive test methods for diagnosing the state of the dielectric property of insulation of AM windings, substantiation of the direction of development of diagnostic test methods and forecasting the decrease in the properties of body and turn insulation of AM windings with the use of residual energy in the conditions of using a capacitor bank.

Methods. The electrical method of the influence of the voltage of the charged capacitor U_c on the change of the functional parameters of the transient process and the integral analysis of the dependence $U_c = f(\tau)$, periodic and aperiodic components of the voltage decrease on the capacitor in time τ .

Summary of the main material. Winding insulation by the method of non-destructive test diagnostics is based on the formation of artificial disturbances on the body insulation and windings of AM during the technological pause and the analysis of the functional parameters of the transition process.

According to the electrical scheme of the discharge of the capacitor on the active-inductive resistance (fig. 1).

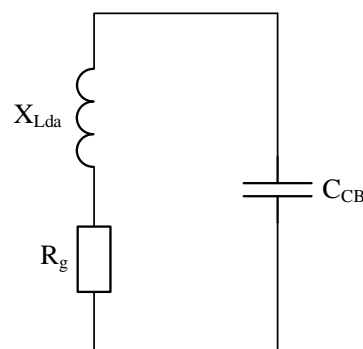


Fig. 1 – Electric scheme of the discharge of the capacitor on the active-inductive resistance

The equation of the voltage change at the capacitor terminals was analyzed

$$E = I \cdot R_g - U_{CB} , \tag{1}$$

$$\frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{R_g}{L_{da}} \frac{dI}{dt} + \frac{I}{L_{da} \cdot C_{CB}} = 0 , \tag{2}$$

where X_{Lda} – inductive resistance of the stator winding AM, R_g – active resistance of the stator winding or body insulation AM, R_g, X_g – active and capacitive components of cable line insulation resistance and AL, C_{CB} – capacity of a capacitor bank (CB) with residual voltage after its disconnection from the network.

The solution of this equation is known and given in [17].

The nature of the transient process occurring in the circuit depends on the ratio of the resistance parameters of the active and inductive components.

The results of mathematical modeling shown in fig. 2, made it possible to establish the numerical values of the CB discharge speed and to develop an energy-saving method and device for diagnosing the power supply network in operating mode and the state of the case insulation when the AM is disconnected [18, 19], which use the energy that remained in the capacitor after it was disconnected from the power supply network.

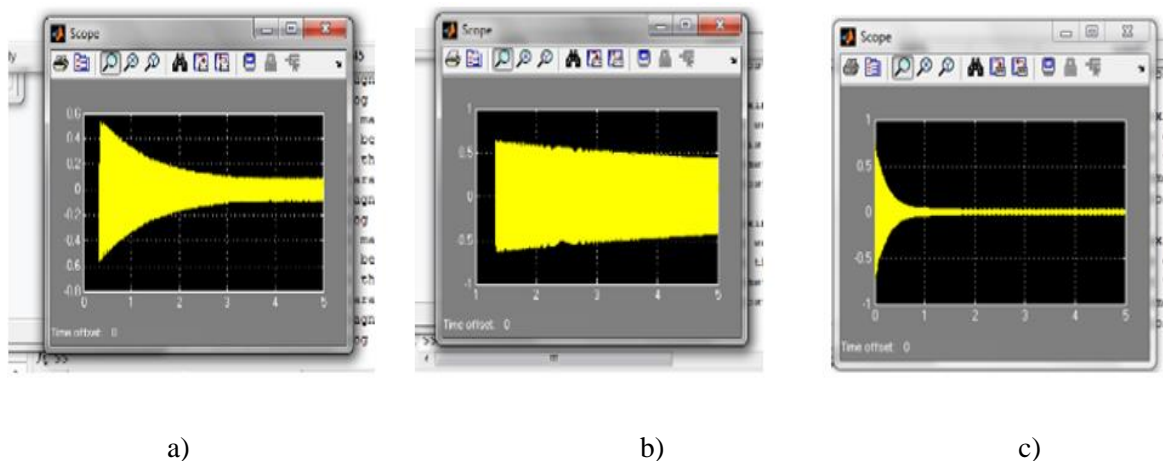


Fig. 2 – Simulation results: a) the discharge rate is 0.1 v/s; b) the discharge rate is 0.5 v/s, c) the discharge rate is 0.01 v/s

Figure 3 shows a structural model of information support for assessing the quality of insulation and power supply network modes with local compensation of reactive power.

1. In AM operating mode, local compensation of reactive power is carried out and changes in phase voltage values are measured at the CB terminals, in the absence of one- or two-phase voltages, the presence of incomplete phase modes or short circuits in the power network is determined.

2. At the moment of disconnection of AM from the network, the maximum value of the voltage at the terminals of one of the capacitors is determined. The capacitor with the highest voltage is connected to the «phase-body» terminals of the AM and the CB discharge rate is measured on the resistance of the body insulation. Different values of the rate of change of voltage at the capacitor terminals correspond to different values of the insulation resistances of AM.

The development of this test method made it possible to develop a method and a device for diagnosing and predicting a decrease in the property of the body insulation of the stator windings of AM [20, 21].

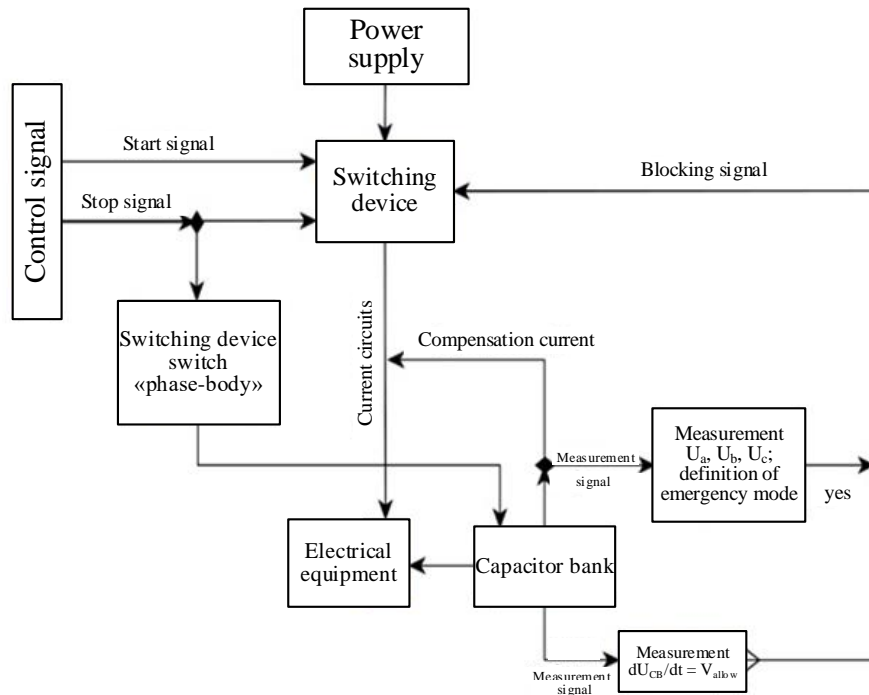


Fig. 3 – Structural model of information support for assessing the quality of insulation and power network modes with local compensation of reactive power

The method consists in the possibility of predicting the remaining service life of AM. The scheme of the laboratory installation, presented in Figure 4, allows to analyze the transient processes of the capacitor discharge in the circuit «complex resistance of the AM winding + capacitor capacity + complex resistance of the housing insulation».

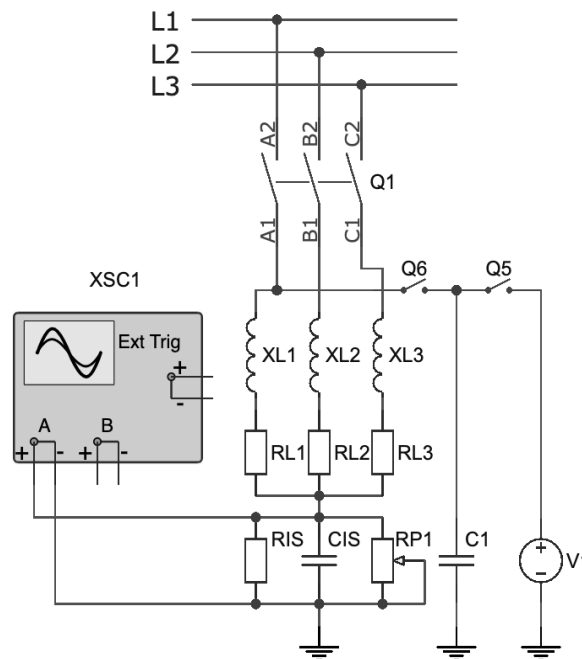


Fig. 4 – Schematic electrical diagram used for simulation and research of transient processes

R_{is} , C_{is} represent the active and capacitive components of the replacement model of the AM case insulation. R_{p1} – variable resistance, which allows to simulate changes in the dielectric properties of insulation. $XSCI$ represents an oscilloscope and is a DC power source.

The change in voltage on the body insulation of AM according to (1) and (2) is described by the expression:

$$U_{Zis} = U_{C1} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{RR}}} \right), \quad (3)$$

where τ_{RR} – time constant of over-damping discharge $\tau_{RR} = C_1 R_{is}$ and depends on the value of the active component of the complex insulation resistance.

U_{C1} represents the voltage at the terminals of the phase capacitor.

The decay time of the aperiodic capacitor discharge process depends on the active component of the resistance of the body insulation and the following inequality is fulfilled:

$$\tau_a > \tau_b > \tau_c \leftrightarrow R_a > R_b > R_c, \quad (4)$$

where τ_a , τ_b , τ_c and R_a , R_b , R_c are time constants and active components of the resistance reduction of the body insulation AM, respectively.

Inequality (4) allows considering the capacitor discharge time constants as a critical parameter for assessing the state of the dielectric properties of the insulation.

The intensity of the decrease in the dielectric properties of the insulation is characterized by the parameter «rate of change of time constants» of capacitor discharges during engine operation, which is determined by the expression:

$$V_{disc\ i} = \frac{\tau_{first} - \tau_i}{\sum_i^n \Delta t_i}, \quad (5)$$

where τ_{first} is the initial capacitor discharge time when the engine is first disconnected from the power source;

τ_i – the capacitor discharge time constant during current disconnections of the engine from the power source;

Δt_i – engine operation time in the current period;

n – the number of periods of engine operation.

Approbation of the method.

The first disconnection of AM from the power supply network, during which is determined $t_{disc\ 1}$ – the initial capacitor discharge time, τ_{first} – the initial capacitor discharge time constant at the initial dielectric properties of the insulation of the AM stator windings, τ_{crist} – the critical value of the capacitor discharge time constant, at the insulation resistance, $R_{1S} = 0.5\ MOhm$.

During the first disconnection of AM from the resistance network, the resistance R_{p1} is disconnected. Using the Start button Q_5 , connect a capacitor (for example, a capacitor C_1) to the power supply unit V_1 , the voltage is 150 V. In this way, we simulate the charge of the capacitor C_1 , we consider it charged to the highest voltage. Using the Start button Q_6 connect the charged capacitor to the «phase + body» terminals of AM. Fig. 5 shows a graph of the voltage change during the discharge of capacitor C_1 .

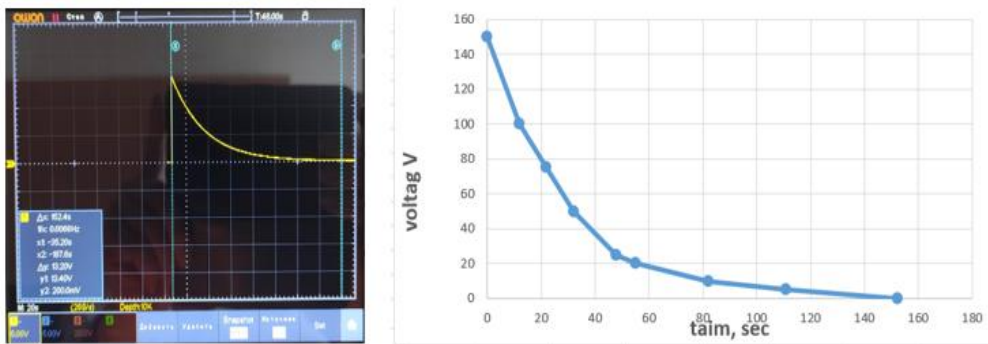


Fig. 5 – Graph of voltage change during capacitor discharge C_1 : $t_{disc1} = 152.4\ sec$;
 $\tau_{first} = 152.4/5 = 30.5\ sec$

The initial insulation resistance of the AM stator windings, without taking into account the divider coefficient in the voltage measurement circuit, is equal to:

$$R_{1S\ first} = \frac{\tau_{first}}{C_1} = 10.2\ MOhm.$$

We calculate τ_{crit} – the critical value of the capacitor discharge time constant $\tau_{crit} = 1.5\ sec.$

The second disconnection of AM from the power supply network. Resistance $R_{P2} = 20\ MOhm.$ We assume that during operation of AM the insulation resistance has decreased and is equal to:

$$R_{1S\ 2} = \frac{R_{1S\ first} \cdot R_{P2}}{R_{1S\ first} + R_{P2}} = 6.6\ MOhm.$$

Consequently, the level of dielectric properties of the insulation decreased by 36%. Suppose that the operating time of the electric motor was $\Delta t_2 = 10\ hours.$ In fig. 6, a graph of voltage changes during capacitor discharge is given.

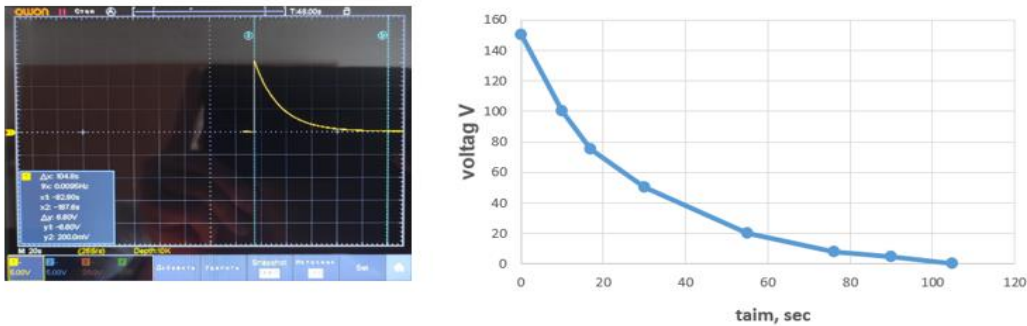


Fig. 6 – Graph of voltage change during capacitor C_1 discharge: $t_{disc2} = 104.8\ sec;$
 $\tau_{disc2} = 20.9\ sec$

The rate of change of the capacitor discharge time constant after the second period of AM operation.

The predicted remaining operating time of AM is equal to:

$$T_{disc} = \frac{20.9 - 1.5}{0.27 \cdot 10^{-3}} = 71.9 \cdot 10^3 = 19.97\ hours.$$

Thus, if the wear, i.e. deterioration of the insulation properties, will occur at this rate, the AM will work for another 19.97 hours.

The remaining service life of the electric motor in percent as:

$$Rr_{disc} = \left(1 - \frac{30.5 - 20.9}{30.5 - 1.5}\right) \cdot 100\% = 77\%.$$

The third disconnection of AM from the power supply network. Resistance $R_{P3} = 5\ MOhm.$ We assume that during the operation of AM the insulation resistance has decreased and is equal to:

$$R_{1S\ 3} = \frac{R_{1S\ first} \cdot R_{P3}}{R_{1S\ first} + R_{P3}} = 6.6\ MOhm.$$

Therefore, the level of dielectric properties of the insulation decreased by 70%. We calculate that the working time of AM was $\Delta t_3 = 30\ hours.$ Fig. 7 shows a graph of voltage changes during capacitor C_1 discharge.

The rate of change of the capacitor discharge time constant after the third period of AM operation:

$$V_{disc3} = \frac{20.9 - 10.82}{(10 + 30) \cdot 60 \cdot 60} = 7.5 \cdot 10^{-5}.$$

We adjust the remaining working time of AM, which is equal to:

$$T_{disc} = \frac{10.82 - 1.5}{7.5 \cdot 10^{-5}} = 1.242 \cdot 10^5 = 34.5\ hours.$$

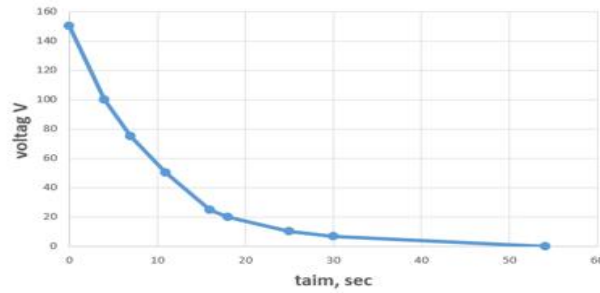
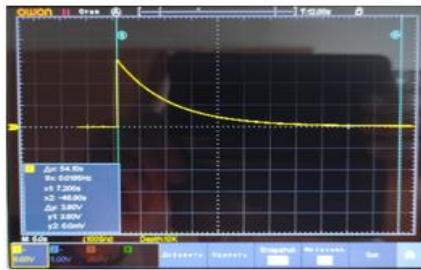


Fig. 7 – Graph of voltage change during capacitor C_1 discharge: $t_{disc3} = 54.1 \text{ sec}$; $\tau_{disc3} = 10.82 \text{ sec}$

Thus, if the deterioration of the insulation properties will occur at this rate, the AM will work for another 34.5 hours.

The remaining service life of the electric motor in percent as:

$$Rr_{disc3} = \left(1 - \frac{30.5 - 10.82}{30.5 - 1.5}\right) \cdot 100\% = 33\%.$$

The fourth disconnection of AM from the power supply network. Resistance $R_{P4} = 0.3 \text{ MOhm}$. We assume that during the operation of AM the insulation resistance has disappeared and is equal to:

$$R_{1S4} = \frac{R_{1S \text{ first}} \cdot R_{P4}}{R_{1S \text{ first}} + R_{P4}} = 0.292 \text{ MOhm}.$$

Therefore, the level of dielectric properties of the insulation has decreased by 100% and further operation of the AM will lead to an accident. Let's assume that the working time of AM was $\Delta t_4 = 80 \text{ hours}$. Fig. 8 shows a graph of voltage changes during capacitor C_1 discharge.

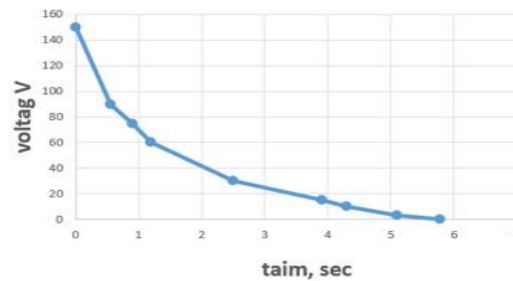
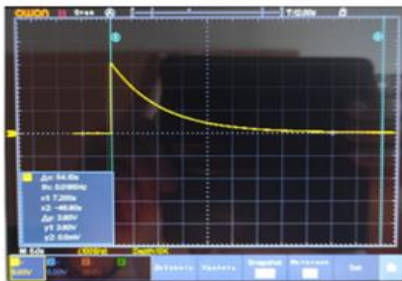


Fig. 8 – Graph of voltage change during capacitor C_1 discharge: $t_{disc4} = 5.7 \text{ sec}$; $\tau_{disc4} = 1.14 \text{ sec}$

The rate of change of the capacitor discharge time constant after the fourth period of AM operation:

$$V_{disc4} = \frac{20.9 - 1.14}{(10 + 30 + 80) \cdot 60 \cdot 60} = 4.07 \cdot 10^{-6}.$$

We adjust the remaining working time of AM is equal to:

$$T_{disc4} = \frac{10.82 - 1.5}{4.07 \cdot 10^{-6}} = 2.3 \cdot 10^6 = 0.0083 \text{ hours} \approx 0.$$

Thus, with an error of up to 1%, it can be stated that the dielectric properties of the AM stator winding insulation are exhausted, and the AM requires repair. The remaining service life of the electric motor in percent as:

$$Rr_{disc4} = \left(1 - \frac{30.5 - 1.14}{30.5 - 1.14}\right) \cdot 100\% = 0\%.$$

Prospects for the development of a non-destructive testing method for detecting a winding circuit using the energy that remained in the capacitors.

The analysis of expression (1) made it possible to consider the periodic process of reducing the voltage on the capacitor terminals for testing the winding circuit in the stator windings of AM.

Study of the transient process of the capacitor discharge on the resistance of the AM winding, the connection scheme of the stator windings «star with neutral point» is shown in Fig. 9.

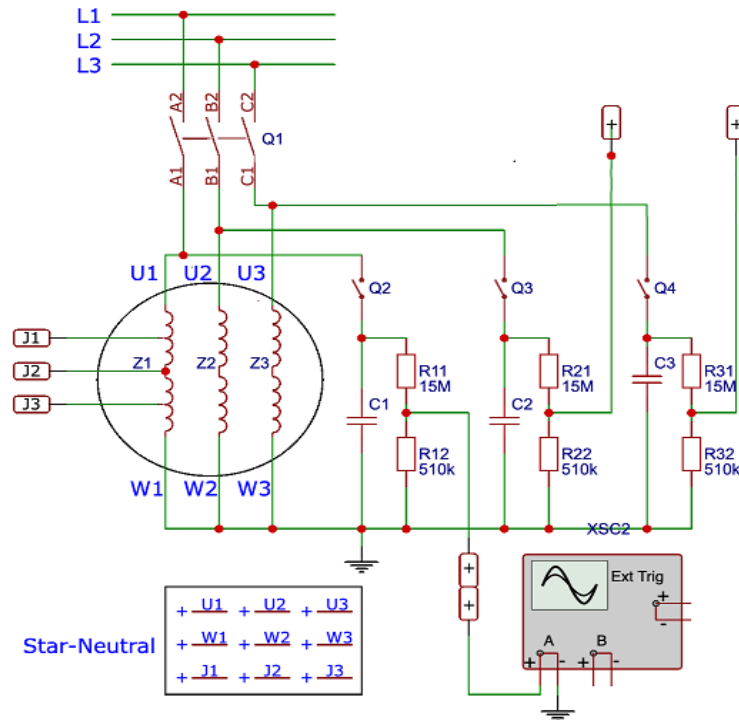


Fig. 9 – Single-line electrical circuit to investigate damage in AM with the winding connection as «star with neutral point»: u_1, u_2, u_3 – beginning of windings; w_1, w_2, w_3 – the end of the windings; j_1, j_2, j_3 – branching of the oscilloscope in the winding of phase «A»; Z_1, Z_2, Z_3 – complex winding supports

According to the differential equation (1), the nature of the transient process occurring in the circuit depends on the ratio of the parameters C, R_{Li}, L_i and has a periodically decaying character, and has a solution

$$q(t) = A_0 \cdot e^{-R_{Li}t/2L_i} \cdot \sin(\omega t + \alpha_0), \quad (6)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_i \cdot C_i} - \frac{R_{Li}^2}{4L_i^2}}, \quad (7)$$

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (8)$$

where ω – oscillation frequency of the contour, A_0 – amplitude of oscillations, α_0 – phase, τ – the time of the transition period, q – the electric charge on the capacitor plates, R_{Li} – the active component of the resistance of the AM winding and the power cable, L_i – inductance of AM winding, C_i – phase capacity of the capacitor bank.

The decrement of damping of oscillations in the circuit is determined by the formula:

$$\beta = \frac{R_{Li}}{2L_i}. \quad (9)$$

Instantaneous amplitudes of capacitor charge fluctuations:

$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{tR_{Li}}{2L_i}} = A_0 \cdot e^{-\beta t}. \quad (10)$$

The change in voltage over time at the capacitor terminals will be determined as:

$$U_{ci} = U_0 \cdot e^{-R_{Li}t/2L_i} \cdot \sin(\omega t + \alpha_0).$$

The initial phase of oscillations α_0 is determined by the expression

$$\alpha_0 = \text{arctg} \sqrt{\frac{4L_i}{C_i R_{Li}^2} - 1}. \tag{11}$$

The initial voltage amplitude U_0 corresponds to the value of the voltage at the terminals of the phase capacitor when it is turned off from the power supply, while $\alpha_0 = 90^\circ$.

The method of monitoring the state of inter-turn insulation, according to [22], is carried out as follows.

Before stopping AM with the switch Q_1 , according to the needs of the technology, the phase capacitors are turned off with the switches Q_2, Q_4, Q_3 (Fig. 9) provided that each phase capacitor is disconnected separately, when a positive amplitude value of the power supply network is reached at its terminals, thus the equation is fulfilled:

$$U_{c1} = U_{c2} = U_{c3}.$$

After the AM is completely stopped, the capacitors C_1, C_2, C_3 are alternately connected to the AM phase windings.

In fig. 10 presents oscillograms of voltage changes at the terminals of phase capacitors.

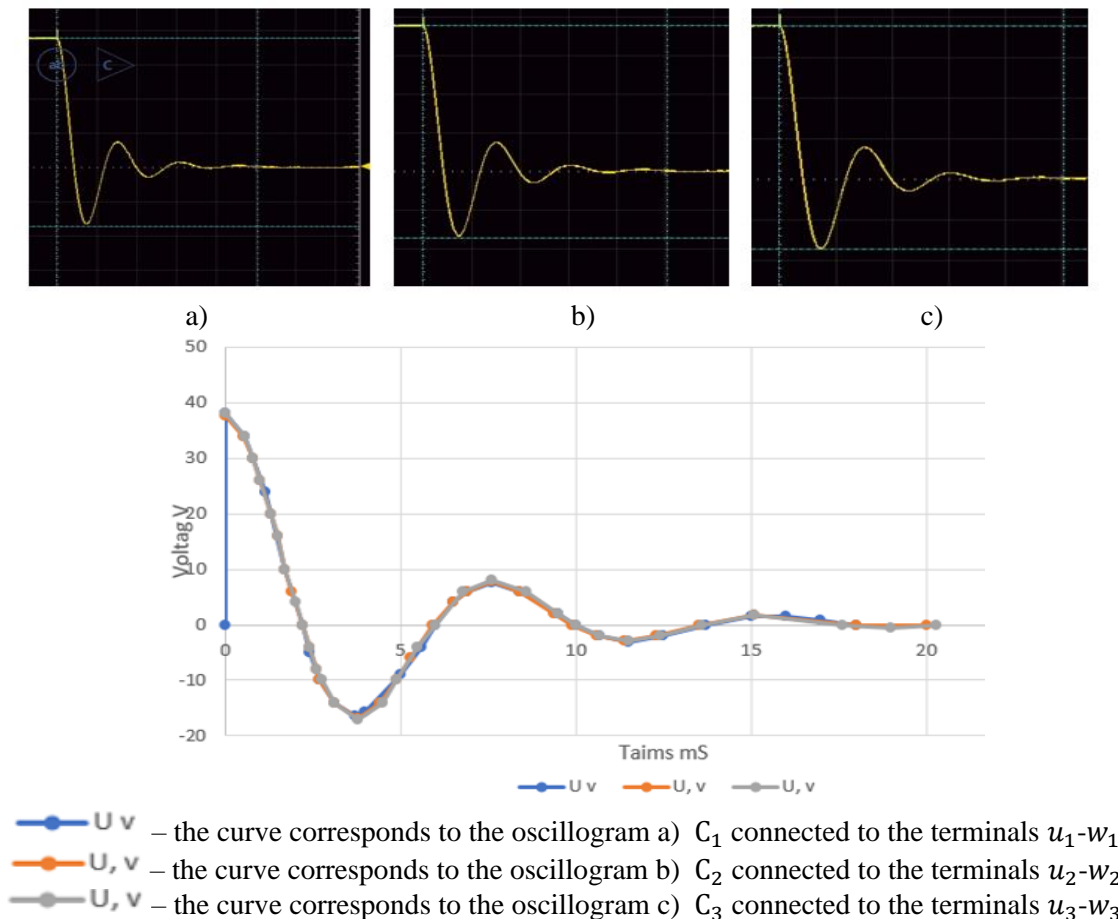


Fig. 10 – Oscillograms and graphs of voltage changes at the terminals of phase capacitors

Running of the curves on the graph of fig. 10, related to the discrepancy in the design parameters of the resistances of the phase windings. As a diagnostic criterion, it is possible to apply the integral coefficient K_{In} defined by the expression:

$$K_{In} = \int_0^{t_{fi}} (U_0 \cdot e^{-R_{Li}t/2L_i} \cdot \sin(\omega t + \alpha_0)) dt, \tag{12}$$

where t_{fi} – the transition time.

The error associated with the discrepancy in the design parameters of the resistances of the phase windings will be determined as:

$$\Delta K_{In} = K_{Ina} - K_{Inb}. \tag{13}$$

Fig. 11 shows graphs of the voltage changes at the capacitor terminals (u_1-w_1) when the ΔW windings are turned off. Connection scheme of windings «star with 0».

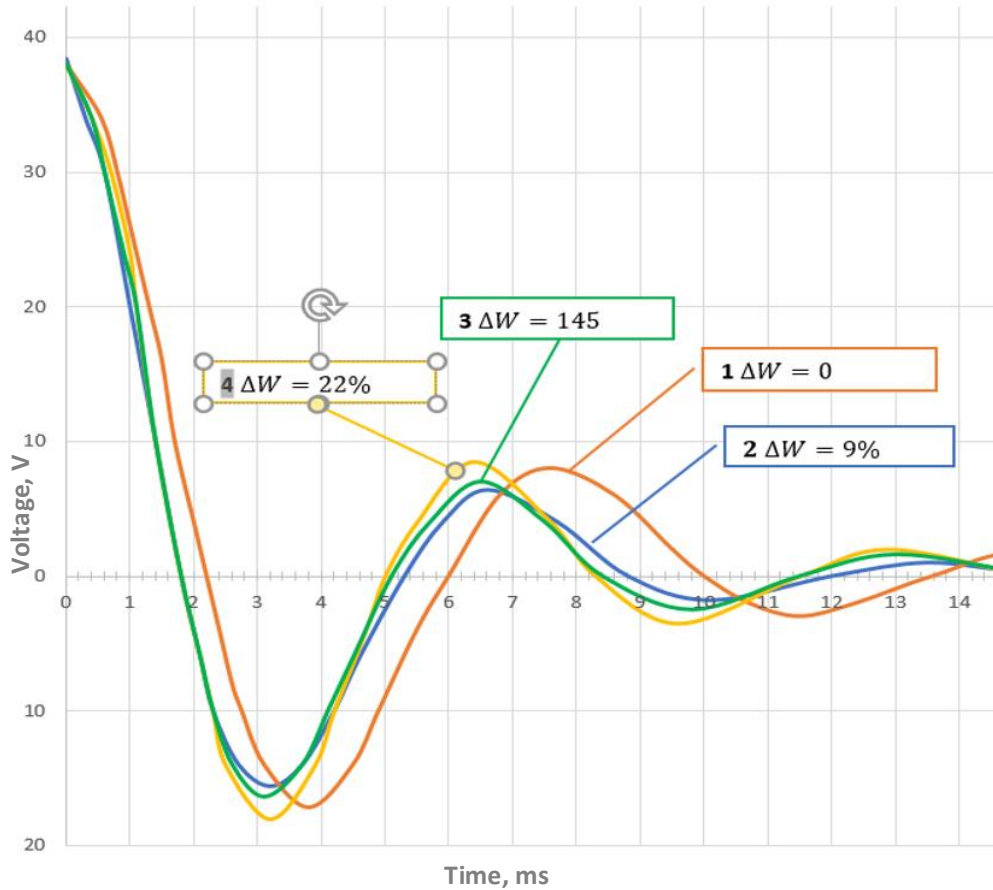


Fig. 11 – Graphs of voltage changes at the capacitor terminals when the ΔW windings are turned off, the connection diagram of the windings «star with neutral point»: curve 1 corresponds to the oscillogram of Fig. 10a, C_1 connected to terminals (u_1-w_1) of phase winding without damage; curve 2: C_3 connected to the terminals (u_1-w_1), j_2-j_3 – closed, which corresponds to 9% of the winding turns being out of order; curve 3: C_3 connected to the terminals (u_1-w_1), the terminals j_1-j_2 are closed, which corresponds to 14% of the winding turns being out of order; curve 4: C_3 connected to the terminals (u_1-w_1), the terminals j_1-j_3 are closed, which corresponds to 22% of the winding turns being out of order

Analysis of graphs (fig. 11) proves that reducing the number of turns in the winding changes both the amplitude and the time of the period of the transient process.

The time value of the period of transient processes is different and the inequality is fulfilled:

$$\Delta\tau_{baz} > \Delta\tau_{a1} > \Delta\tau_{a2} > \Delta\tau_{a3}, \tag{14}$$

where $\Delta\tau_{baz} = 11.6$ ms – the winding of the electric motor is working,

$\Delta\tau_{a1} = 8.7$ ms – closed ΔW 9%;

$\Delta\tau_{a2} = 8.1$ ms – closed ΔW 14%;

$\Delta\tau_{a3} = 7.4$ ms – closed ΔW 22%.

Discussion of research results. Methods of forecasting the residual resource of AM operation using both mathematical and natural thermal models are based on the expression:

$$T_{ok} = T_0 \cdot 2^{(-\theta/\Delta\theta)}. \tag{15}$$

It is assumed that T_0 – the service life of AM insulation at a constant temperature θ (°C) is 15-25 years. The spread of values T_0 in the range of (25-40)% and the influence of random factors that lead to additional thermal effects on the insulation determine the reliability of thermal forecasting methods in the range of 25-30%.

In the method of predicting the remaining service life of the AM, as the basic value of the dielectric state of the insulation of the AM windings, the constant value of the capacitor discharge time after the first disconnection of the AM from the network is taken. In the following shutdowns, the rate of reduction of the insulation properties is determined, due to any factors affecting it. The criterion that takes into account certain and uncertain factors that reduce the dielectric properties of insulation is the capacitor discharge time constant. The speed characteristics of the change of capacitor discharge time constants are given in relative units, which makes it possible to predict the residual service life of AM with an error of up to 3%, depending on the accuracy class of measuring and converting devices.

The analysis of the curve of the change in the insulation resistance of the AM windings shows that the time constant of the capacitor discharge depends on the intensity of the change in the dielectric properties of the insulation. The speed characteristic of the change in constant capacitor discharge time is a criterion parameter and allows to determine and adjust the remaining resource of AM operation in online mode.

In the method of detecting a turn short circuit in the stator windings of AM, it is advisable to use the time of the period of the transient process as a criterion parameter, which allowed to increase the reliability and sensitivity, compared to other methods, by 3-5%.

Conclusions

1. The energy that remains in the capacitor batteries after their disconnection from the power supply network allows for non-destructive test diagnostics of body and turn insulation at the time of disconnection of the AM from the power supply network.

2. A comprehensive approach to ETC energy saving due to the combination of the reactive power compensation method and the method of assessing the dynamic reduction of the dielectric properties of the insulation of the stator windings of the AM allows to reduce energy losses up to 8% and increase the reliability of the ETC due to the prevention of the residual resource of the AM.

3. The speed characteristics of the change in the constant time of capacitor discharge during local compensation of the reactive power consumed by the AM is a criterion for reducing the dielectric properties of the insulation, which allows predicting the residual resource of the AM with an error of no more than 3%.

4. The time of the transient process period when a turn short is detected is a criterion parameter that allowed to increase reliability and sensitivity by 3-5% in comparison with other methods.

References:

1. O.V. Tokariiev, D.O. Boriahyn, and O.I. Sheremet, «Analiz prychnyn poshkodzhennia asynkhronnykh dvyhuniv ta zasobiv diahnostuvannia yikh rezhymiv roboty» [«Analysis of the causes of damage to induction motors and means of diagnosing their operating modes»], *Nauchnii Vestnyk Donbasskoi hosudarstvennoi mashynostroytelnoi akademyy – Scientific Bulletin of the Donbass State Engineering Academy*, № 1 (25E), pp. 39-49, 2018. (Ukr.)
2. F. Bento, A. Adouni, A.C.P. Muxiri, D.S.B. Fonseca, and A.J.M. Cardoso, «On the risk of failure to prevent induction motors permanent damage, due to the short available time-to-diagnosis of inter-turn short-circuit faults», *IET Electrical Power Applications*, vol. 15, № 1, pp. 51-62, 2021. doi: **10.1049/elp2.12008**.
3. V.E. Krivonosov, and S.V. Vasilenko, «Vlyianyie zapilennoi sredi na srok sluzhbi obmotok statora asynkhronnykh dvyhatelei» [«Dusty Environment Impact on Lifespan of the Induction Motors Stator Winding»], *Enerhetyka. Yzvestiya visshykh uchebnykh zavedenyi y enerhetycheskykh obiedynenyi SNH – Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations: Energetika*, № 6, pp. 35-40, 2015. (Rus.)
4. Yu. Kovalova, V. Kovalov, and V. Feteev, «Asynchronous phase rotor motor in reactive power compensator mode», *Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka – Lighting Engineering & Power Engineering*, vol. 55, № 02, pp. 63-67, 2020. doi: **10.33042/2079-424X-2019-2-55-63-67**.

5. Yu.Yu. Pivniuk, and P.D. Lezhniuk, «Kompensatsiia reaktivnoi potuzhnosti v lokalnii elektrychnii systemi v umovakh balansuiuchoho rynku elektroenerhii» [«Reactive power compensation in local electric system in conditions of the balancing market of electric power»], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut». Seriiia «Hirnytstvo» – Bulletin of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute». Series «Mining»*, vol. 25, pp. 131-137, 2014. (Ukr.)
6. V.E. Krivonosov, «Statycheskye ystochnyky reaktivnoi moshchnosti pry dyahnostyke sostoiannya yzoliatsyy asynkhronnoho dvyhatelia y pytaiushcheho kabelia v uslovyakh lokalnoi kompensatsyy» [«Reactive power static sources in the diagnosis of insulation condition of the induction motor and the power supply cable in terms of local compensation»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Seriiia: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 33, pp. 123-130, 2016. (Rus.)
7. V.E. Krivonosov, «Dyahnostyka sostoiannya yzoliatsyy asynkhronnoho dvyhatelia y pytaiushcheho kabelia v uslovyakh lokalnoi kompensatsyy» [«Diagnostic of the insulation state of the asynchronous motor and the power supply cable under conditions of local compensation»], *Enerhetyka. Yzvestyia visshykh uchebnikh zavedenyi y enerhetycheskykh obiedyneni SNH – Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations: Energetika*, vol. 60, № 6, pp. 536-543, 2017. doi: **10.21122/1029-7448-2017-60-6-536-543**. (Rus.)
8. V.K. Garg, and S. Khanchi, «Power factor improvement of induction motor by using capacitors», *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 4, iss. 7, pp. 2967-2971, 2023.
9. S.A. Demishonkova, Ya.V. Demishonkov, and T.I. Kulik, «Funktsionalna diahnostyka parametriv tryfaznoho asynkhronnoho dvyhuna z korotkozamknemym rotorom» [«Functional diagnosis of the parameters of the three-phase asynchronous engine with a short-circuited rotor»], *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Seriiia Tekhnichni nauky – Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design. Technical Science Series*, № 4(136), pp. 66-76, 2019. doi: **10.30857/1813-6796.2019.4.7**. (Ukr.)
10. O. Gubarevych, S. Goolak, O. Daki, and Y. Yakusevych, «Determining an additional diagnostic parameter for improving the accuracy of assessment of the condition of stator windings in an induction motor», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5/5(113), pp. 21-29, 2021. doi: **10.15587/1729-4061.2021.239509**.
11. J. Zhao, and A.D. Brovont, «Modeling Common-Mode Current Due to Asymmetric Aging of Machine Winding Insulation», *Complex System Modeling and Simulation*, vol. 3(2), pp. 118-128, 2023. doi: **10.23919/CSMS.2023.0004**.
12. I.V. Zhezhelenko, V.E. Kryvonosov, and S.V. Vasilenko, «Kryteryi viavlenyia mezhvytkovykh zamikanyi v statornikh obmotkakh s yspolzovanyem vektornoho analiza faznykh tokov elektrovyhatelia» [«Criteria for Detecting Turn-To-Turn Short Circuit in Stator Windings Using Vector Analysis of Electric Motor Phase Currents»], *Enerhetyka. Yzvestyia visshykh uchebnikh zavedenyi y enerhetycheskykh obiedyneni SNH – Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations: Energetika*, vol. 64, № 3, pp. 202-218, 2021. doi: **10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218**. (Rus.)
13. I.V. Zhezhelenko, and V.E. Kryvonosov, «Ustroistvo dlia kontrolya y zashchyti elektrovyhatelia ot nepolnofaznykh rezhymov y vytkovykh zamikanyi» [«Device for monitoring and protecting an electric motor from phase-deficient modes and turn-to-turn short circuits»], *USSR Author's certificate № 4389543*, Aug. 07, 1990. (Rus.)
14. *Bezpechnist mashyn elektroobladnannia mashyn, chastyna 1. Zahalni vymohy (EN60204-1:2006; A1:2009; AS:2010, IDT)* [Safety of electrical equipment of machines, part 1. General requirements (EN60204-1:2006; A1:2009; AC:2010, IDT)], State standart EN 60204-1:2015, 2015. (Ukr.)
15. L.A. Trujillo Guajardo, L.H. Rodríguez Alfaro, J. Rodríguez Maldonado, M.A. González Vázquez, F. Salinas Salinas, and M.Y. Shih, «Prony method estimation as a new approach for surge comparison testing in turn insulation diagnostics for three phase stator windings», *Machines*, vol. 11(2), article 241, 2023. doi: **10.3390/machines11020241**.
16. K. Kim, J. Han, J. Chai, and W. Nah, «Quantitative Analysis of Insulator Degradation in a Single Layer Solenoid by Renormalization of the Transmission Parameter», *Electronics*, № 11, article 1984, 2020. doi: **10.3390/electronics9111984**.

17. V.S. Maliar, *Teoretychni osnovy elektrotekhniky. Elektrychni kola: navch. posibnyk* [Theoretical foundations of electrical engineering. Electrical circuits: textbook]. Lviv, Ukraine: Lviv Polytechnic Publishing House, 2012. (Ukr.)
18. V.E. Kryvonosov, «Sposib kontroliu zminy oporu izoliatsii elektrodvyhuna y zhyvylnoho kabeliu» [«Method for monitoring changes in insulation resistance of electric motor and power cable»], *UA Patent № 98353*, May 10, 2012. (Ukr.)
19. V.E. Kryvonosov, S.M. Zlepko, S.V. Pavlov, S.V. Tymchyk, and V.V. Kryvonosov, «Prystarii kontroliu stanu izoliatsii i zakhystu elektroustatkuvannia» [«Device for monitoring the condition of insulation and protection of electrical equipment»], *UA Patent № 120126*, Oct. 10, 2019. (Ukr.)
20. V. Kryvonosov, and A. Matviienko, «Studies of the change in the time constants of the discharge of the capacitor to predict the residual life of the operation of the electric motor», *Problems of the regional energetics*, vol. 3(59), pp. 147-159, 2023. doi: [10.52254/1857-0070.2023.3-59.13](https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.13).
21. V.E. Kryvonosov, A.M. Matviienko, and V.V. Kryvonosov, «Prohnozuvannia zalyshkovoho resursu izoliatsii obmotok elektrodvyhuna pry lokalnoi kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti» [«Forecasting the residual life of electric motor winding insulation with local reactive power compensation»], *UA Author's certificate for a computer program 122459*, Dec. 28, 2023. (Ukr.)
22. V.E. Kryvonosov, M.M. Zablodskyi, V.V. Kryvonosov, and O.M. Matviienko, «Sposib vyivlennia mizhvtytkovykh zamykan v obmotkakh elektrodvyhuna pry lokalnii kompensatsii reaktivnoi potuzhnosti» [«Method for detecting interturn faults in electric motor windings during local reactive power compensation»], *UA Patent № 156703*, July 24, 2024. (Ukr.)

Перелік використаних джерел:

1. Токарев О. В., Борягин Д. О., Шеремет О. І. Аналіз причин пошкодження асинхронних двигунів та засобів діагностування їх режимів роботи. *Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии*. 2018. № 1 (25Е). С. 39-49.
2. On the risk of failure to prevent induction motors permanent damage, due to the short available time-to-diagnosis of inter-turn short-circuit faults / F. Bento et al. *IET Electrical Power Applications*. 2021. Vol. 15. № 1. Pp. 51-62. DOI: <https://doi.org/10.1049/elp2.12008>.
3. Кривонос В.Е., Василенко С.В. Влияние запыленной среды на срок службы обмоток статора асинхронных двигателей. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2015. № 6. С. 35-40.
4. Kovalova Yu., Kovalov V., Feteev V. Asynchronous phase rotor motor in reactive power compensator mode. *Світлотехніка та електроенергетика*. 2020. Вип. 55. № 02. С. 63-67. DOI: <https://doi.org/10.33042/2079-424X-2019-2-55-63-67>.
5. Півнюк Ю. Ю., Лежнюк П. Д. Компенсація реактивної потужності в локальній електричній системі в умовах балануючого ринку електроенергії. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. Серія «Гірництво». 2014. Вип. 25. С. 131-137.
6. Кривонос В.Е. Статические источники реактивной мощности при диагностике состояния изоляции асинхронного двигателя и питающего кабеля в условиях локальной компенсации. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки. 2016. Вип. 33. С. 123-130.
7. Кривонос В. Диагностика состояния изоляции асинхронного двигателя и питающего кабеля в условиях локальной компенсации. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2017. Том 60. № 6. С. 536-543. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-6-536-543>.
8. Garg V. K., Khanchi S. Power factor improvement of induction motor by using capacitors. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. 2013. Vol. 4. Iss. 7. Pp. 2967-2971.
9. Демішонкова С. А., Демішонков Я. В., Кулік Т. І. Функціональна діагностика параметрів трифазного асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Серія Технічні науки. 2019. № 4(136). С. 66-76. DOI: <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.7>.
10. Determining an additional diagnostic parameter for improving the accuracy of assessment of the condition of stator windings in an induction motor / Gubarevych O., Goolak S., Daki O.,

- Yakusevych Y. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 5/5(113). Pp. 21-29. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239509>.
11. Zhao J., Brovont A. D. Modeling Common-Mode Current Due to Asymmetric Aging of Machine Winding Insulation. *Complex System Modeling and Simulation*. 2023. Vol. 3(2). Pp. 118-128. DOI: <https://doi.org/10.23919/CSMS.2023.0004>.
 12. Жежеленко И. В., Кривонос В. Е., Василенко С. В. Критерии выявления межвитковых замыканий в статорных обмотках с использованием векторного анализа фазных токов электродвигателя. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2021. Том 64. № 3. С. 202-218. DOI: <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-202-218>.
 13. Устройство для контроля и защиты электродвигателя от неполнофазных режимов и витковых замыканий : а.с. 1584028 СССР: МПК: H02H 7/08, H02H 7/085. № 4389543; заявл. 09.03.1988; опубл. 07.08.90, Бюл. № 29. 10 с.
 14. ДСТУ EN 60204-1:2015. Безпечність машин електрообладнання машин, частина 1. Загальні вимоги (EN60204-1:2006; A1:2009; AC:2010, IDT). [Чинний від 2017-01-01]. Київ : ДП «Укр-НДНЦ», 2017. 99 с.
 15. Prony method estimation as a new approach for surge comparison testing in turn insulation diagnostics for three phase stator windings / L.A. Trujillo Guajardo et al. *Machines*. 2023. Vol. 11(2). Article 241. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11020241>.
 16. Quantitative Analysis of Insulator Degradation in a Single Layer Solenoid by Renormalization of the Transmission Parameter / Kim K., Han J., Chai J., Nah W. *Electronics*. 2020. № 11. Article 1984. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics9111984>.
 17. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 312 с.
 18. Спосіб контролю зміни опору ізоляції електродвигуна й живильного кабелю: пат. 98353 Україна: МПК H02K15\12(2006.01), G01R31\34(2006.01). № а201005384; заявл. 05.05.2010; опубл. 10.05.2012, Бюл. № 9. 4 с.
 19. Пристрій контролю стану ізоляції і захисту електроустаткування: пат. 120126 Україна: МПК H02K 15/12 (2006.01), G01R 31/34 (2006.01). № а201712353; заявл. 13.12.2017; опуб. 10.10.2019; Бюл. № 19.
 20. Kryvonosov V., Matviienko A. Studies of the change in the time constants of the discharge of the capacitor to predict the residual life of the operation of the electric motor. *Problems of the regional energetics*. 2023. Vol. 3(59). Pp. 147-159. DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.3-59.13>.
 21. Прогнозування залишкового ресурсу ізоляції обмоток електродвигуна при локальній компенсації реактивної потужності: а.с. на комп'ютерну програму 122459 від 28.12.2023 р.
 22. Спосіб виявлення міжвиткових замикань в обмотках електродвигуна при локальній компенсації реактивної потужності: пат. на корисну модель 156703 Україна: МПК H02K15/12, № u202401080; заявл. 28.02.2024; опуб. 24.07.2024; Бюл. № 30.

Стаття надійшла 08.10.2024

Стаття прийнята 08.11.2024

144 ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321349

© Ялова А.М.¹, Бондар Н.В.²**ПРОБЛЕМА ПІДВИЩЕННЯ РОБОЧОГО РЕСУРСУ ДЕТАЛЕЙ
ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Мета дослідження. Підвищення експлуатаційних властивостей енергетичного обладнання, збільшення терміну служби деталей енергетичного обладнання за рахунок застосування вакуумних покриттів, що підвищують їхню зносостійкість та термостійкість. Матеріали і методи. Метод нанесення вакуумних покриттів, що підвищує зносостійкість та термостабільність машин енергетичного комплексу. Робоче колесо димососу ТЕЦ без нанесення та з нанесенням жаростійких та зміцнювальних багатоелементних та багатофазних покриттів. Під час експериментів використовувалось робоче колесо димососу, яке безпосередньо пропрацювало на ТЕЦ, яка працює на газоподібному паливі, а саме на суміщу газів природній газ+доменний газ+коковий газ. Виходячи з цього, маємо додаткову агресивність продуктів згоряння. Перед проведенням експерименту поверхня лопатки димососу проходила обробку спиртом. В експерименті було використано наступне обладнання: ультразвукова ванна з гарячим миючим розчином, вакуумна камера, створювалась заскнена мікродуга іоним розрядом. Результати. Наукова новизна полягає у розробці методики розрахунку термопружних напруг за експериментальним значенням мікротвердості при роботі в умовах високих температур та агресивних середовищ. Розроблено інноваційний метод оцінки життєвого циклу матеріалів енергетичного обладнання, які зазнають корозійних та термічних впливів. Практичне значення. На основі експериментальних та теоретичних досліджень розроблено багатошарове функціональне нанокристалічне покриття для теплоенергетичного обладнання, що працює в агресивному середовищі із заданими властивостями. Дане покриття використовують для збільшення міцності робочих поверхонь тягодуттьових машин ТЕС та ТЕЦ. Розроблені рекомендації по покращенню експлуатаційних характеристик обладнання на ТЕЦ.

Ключові слова: висока температура, сталь, термоцикли, покриття, термопружна напруга, лопатки димососа, міцність.

*A. Yalova, N. Bondar. **The problem of increasing the working resource of energy equipment details.** Purpose of the study. Improving the operational properties of power equipment, increasing the service life of power equipment parts through the use of vacuum coatings that increase their wear resistance and heat resistance. Materials and methods. Method of applying vacuum coatings that increases the wear resistance and thermal stability of energy complex machines. The impeller of the CHP smoke exhauster without application and with application of heat-resistant and strengthening multi-element and multi-phase coatings. During the experiments, the impeller of the smoke exhauster was used, which directly worked at a CHP operating on gaseous fuel, namely on a gas mixture of natural gas + blast furnace gas + coke oven gas. Based on this, we have additional aggressiveness of combustion products. Before conducting the experiment, the surface of the*

¹ канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0003-0926-542X, al.yalovaya@knu.edu.ua

² ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-8713-265X, bondar_nv@knu.edu.ua

*smoke exhauster blade was treated with alcohol. The following equipment was used in the experiment: an ultrasonic bath with a hot cleaning solution, a vacuum chamber, a microarc was created by an ion discharge. **Results.** The scientific novelty consists in developing a method for calculating thermoelastic stresses based on the experimental value of microhardness when operating in high temperatures and aggressive environments. An innovative method for assessing the life cycle of energy equipment materials that are subject to corrosive and thermal influences has been developed. **Practical significance.** Based on experimental and theoretical research, a multilayer functional nanocrystalline coating has been developed for heat and power equipment operating in an aggressive environment with specified properties. This coating is used to increase the strength of the working surfaces of thrust and blower machines of thermal power plants and CHPs. Recommendations have been developed to improve the operational characteristics of equipment at CHPs.*

Keywords: high temperature, steel, thermal cycles, coating, thermoelastic stress, smoke exhauster blades, strength.

Постановка проблеми. Завдання забезпечення ефективного та надійного функціонування підприємств енергетичного комплексу (ЕК) та гарантованого енергопостачання споживачів є необхідною умовою енергетичної безпеки та незалежності регіону та держави. Інтенсивне зношування деталей є однією з найгостріших проблем, з якою стикається сучасна теплоенергетична промисловість. У м. Кривий Ріг на підприємстві «АрселорМіттал Кривий Ріг» працюють три ТЕЦ. 90 років тому запрацювала найперша ТЕЦ №1, у 1974 р. почала роботу ТЕЦ №3, наймолодша з ТЕЦ заводу. Знос обладнання усіх ТЕЦ складає близько 85% з урахуванням реконструкцій, що проводиться. За умов обмежених ресурсів пошук ефективних методів боротьби зі зношуванням набуває особливої актуальності. Особливо гострою ця проблема є для галузей з інтенсивною експлуатацією техніки в складних умовах, таких як гірничодобувна, нафтогазова та енергетична. Металеві деталі основного та допоміжного обладнання ТЕС та ТЕЦ працюють в дуже важких умовах, оскільки вони піддаються впливу тиску та температури, нерівномірного розширення елементів. Про придатність конструкційних матеріалів до конкретних умов роботи судять за комплексом властивостей, отриманих в результаті дослідження зразків, а також за результатами натурних випробувань. Основна задача при експлуатації аеродинамічних трактів ТЕС та ТЕЦ полягає в забезпеченні заданого об'єму повітряного потоку з певним запасом. Для досягнення цього необхідно компенсувати втрати тиску, що виникають при русі повітря по каналах і приладах системи. Тому вентилятори, димососи та компресори відіграють роль «нагнітачів», створюючи необхідний тиск для подолання цих опорів і забезпечення безперебійної роботи системи. Придатність сталей і сплавів цього обладнання для роботи в складі теплових енергетичних установок оцінюють за комплексом характеристик, отриманих при дослідженні повзучості, довготривалої міцності та пластичності, а також релаксації напружень в інтервалі можливих робочих температур, корозійної стійкості та жаростійкості в робочих середовищах, втомі в умовах циклічних навантажень або тепломіни. Для виробництва деталей енергетичного обладнання, які в процесі експлуатації піддаються руйнівному впливу корозії при високих температурах, використовуються середньо- та високолеговані марки сталей: 15X5, 15X6CM, 40X9C2, 30X133N7C2, 12X18H10T та ін. Дані марки сталей в Україні не виробляються, більше того, енергомашинобудування в нашій країні мало розвинене. Обладнання для безперебійної роботи ТЕЦ та ТЕС, а також для модернізації станцій, наша країна змушена закуповувати за кордоном, що потім значно позначається на тарифах за тепло- та електроенергію. У зв'язку з цим проблема підвищення робочого ресурсу деталей енергетичного обладнання залишається актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У науковій літературі можна знайти кілька наукових досліджень по розгляду сучасного стану в теплоенергетиці та про модернізацію застарілого обладнання. Але при цьому розглядають більш глобальні питання та завдання енергетики, такі як модернізація та реконструкція теплових станцій, подовження терміну експлуатації атомних електростанцій, зниження рівня шкідливих викидів в атмосферу, впровадження інноваційних технологій, зменшення втрат енергії, а також розвиток малої енергетики [1], не зважаючи на економічні виклики сьогодення.

Розглядаються питання модернізації енергоблоків з контекстом на витрату палива, що дозволила знизити середні питомі витрати палива лише на 12,6 г у.п./кВт·год порівняно з немодернізованими блоками на тих самих ТЕС. При цьому чіткої залежності між обсягом інвестицій у модернізацію та отриманим ефектом економії палива не виявлено [2].

Існуючі підходи до моделювання та оптимізації роботи аеродинамічних систем мають суттєві обмеження. Хоча заміна нагнітачів на потужніші дозволяє збільшити подачу повітря та усунути «вузьке місце» у вигляді обмеженої потужності котлів, це призводить до непропорційного зростання споживання енергії нагнітачами, що суперечить прагненню до підвищення енергоефективності [3]. Кравченко О.В. у своїй науковій роботі розглядає підвищення продуктивності тягодуттьових трактів котлів на основі удосконалення моделей аеродинамічних систем. Зокрема, у роботі виявлено і проаналізовано протиріччя між потребою підвищення продуктивності тягодуттьових трактів котлів з забезпеченням вимог та енергозбереженням при експлуатації аеродинамічних систем. Удосконалення геометрії проточних частин тягодуттьового тракту димових газів з електрофільтрами енергоблоків 300МВт Криворізької ТЕС забезпечує збільшення ефективності динамічних процесів. Системний аналіз зміни параметрів роботи тракту дозволяє коректно обґрунтувати поліпшення енергетичних показників роботи аеродинамічної системи, а також окремих елементів – вхідних ділянок електрофільтрів. Однак в роботі не зазначено знос робочих органів тягодуттьових машин та вплив цього фактору на їх роботу. Також не розглянуто методи зменшення зносу лопаток димососів.

Враховуючи потребу зниження робочого ресурсу деталей енергетичного обладнання, виникає потреба у теоретичному розрахунку термопружних напруг за експериментальним значенням мікротвердості та практичному вирішенні проблеми нанесення зміцнювальних покриттів на деталі способом конденсації речовини у вакуумі з іонним бомбардуванням.

Метою даної роботи є підвищення експлуатаційних властивостей енергетичного обладнання.

Виклад основного матеріалу. Основою ТЕС та ТЕЦ є котельні агрегати з природньою циркуляцією та прямоточні агрегати, які складаються з наступних вузлів: каркас, барабани, пристрої сепарації, екрани, пароперегрівачі, економайзери, повітропідігрівачі, обмурівка, гарнітура, тягодуттьові пристрої.

Товщину стінок барабанів, колекторів та труб, розміри деталей каркасу тощо визначають залежно від величини сумарного навантаження та необхідного запасу міцності, що забезпечують тривалу працездатність деталей. Крім міцності, від металу вимагають пластичності, стійкості до корозії та хорошої зварюваності. Тому для виготовлення деталей котельних агрегатів застосовують високоякісні сорти сталі.

При виборі матеріалів для роботи в умовах високих температур та агресивних середовищ проводять комплексні дослідження, що дозволяють оцінити їхню поведінку під тривалими навантаженнями, стійкість до корозії та повзучості. Як відомо, при тривалій експлуатації в таких умовах матеріали зазнають значних змін: знижується міцність, підвищується крихкість, прискорюються корозійні процеси. Для запобігання цим змінам необхідно враховувати такі характеристики матеріалу, як довговічність, пластичність, корозійна стійкість та жаростійкість [4].

З вуглецевої сталі виготовляють економайзери, екрани та барабани котельних агрегатів, які працюють при температурі до 450°C. При температурі вище 450°C міцність вуглецевої сталі різко знижується. Тому для виготовлення деталей, що працюють при більш високих температурах, використовують спеціальну жаростійку сталь, до складу якої додають невелику кількість молібдену, хрому, нікелю та інших хімічних елементів для надання металу певних властивостей. Таку сталь називають низьколегованою.

З низьколегованої сталі марок 12ХМФ і 15ХМФ зазвичай виготовляють радіаційні поверхні нагріву прямоточних котельних агрегатів та пароперегрівачі, які працюють при температурі до 540°C.

Найвищою жаростійкістю володіє хромонікелева сталь марки 12Х18Н9Т аустенітного класу, яку також називають нержавіючою сталлю, у якої легуючі добавки нікелю та хрому досягають 30% маси металу. З цієї сталі виготовляють труби вихідної частини пароперегрівачів котельних агрегатів високого тиску, метал яких працює при температурах (570-650)°C. У складі сталі, крім хрому та нікелю, є невелика кількість титану, який стабілізує структуру сталі при

високій температурі. Основними перевагами аустенітної сталі є її висока жаростійкість та здатність протистояти корозії при високій температурі, завдяки високому вмісту хрому (18%) та нікелю (12%).

Аустенітна сталь значно дорожча за перлітну.

Для виготовлення поверхонь нагріву котельного агрегата, що працюють при температурі пари до 450°C, широко використовують вуглецеву сталь марки Ст.20 з вмістом вуглецю до 0,25%, а для виготовлення каркаса котлів – вуглецеву сталь марки Ст.3.

Повзучість металу – це явище, при якому метал під дією постійного навантаження при високій температурі деформується з часом. Особливо яскраво це проявляється при температурах вище 500°C. В результаті зовнішні розміри деталі, наприклад, труби, збільшуються і не відновлюються після зняття навантаження. Для боротьби з повзучістю в сталь додають легуючі елементи, такі як хром, молібден та ванадій. На промислових установках регулярно контролюють зміну розмірів труб, щоб запобігти аваріям. Для запобігання руйнування трубопроводів через повзучість при температурах вище 450°C проводять регулярний моніторинг їх діаметра та структури металу. Тривала дія високих температур призводить до зміни структури сталі, наприклад, до розпаду цементиту, що прискорює процес повзучості.

Масові обмеження споживання енергії свідчать про те, що існуючі моделі та методи розрахунку теплоенергетичних систем потребують перегляду. Невідповідність теоретичних розрахунків реальним результатам вказує на недосконалість наших уявлень про теплові процеси, які протікають всередині самого енергетичного обладнання та безпосередньо впливають на якість та довговічність його роботи. Зважаючи на великі експлуатаційні труднощі, довговічність теплоенергетичного обладнання зазвичай розглядають у зв'язку лише з якимось одним видом пошкодження: довготривалою міцністю, повзучістю, втомлюваністю або термічною втомлюваністю. Для оцінки пошкодження матеріалу тягодуттєвих машин при повзучості використовують такі характеристики пластичності (рис. 1).

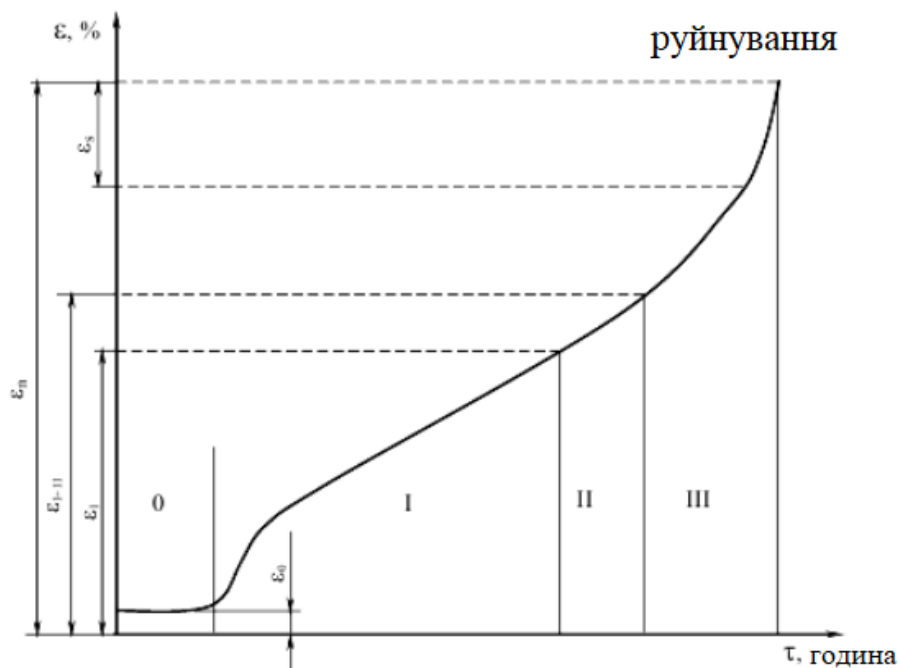


Рис. 1 – Схематична крива повзучості $\varepsilon = \Delta l/l_0$ [4]: 0 – Ділянка напруження; I – ділянка неусталеної повзучості; II – ділянка усталеної повзучості; III – ділянка перед руйнуванням. $\varepsilon_n - \varepsilon_0$ – деформація повзучості, накопичена перед руйнуванням; $\varepsilon_{I-II} - \varepsilon_0$ – деформація повзучості, накопичена до стадії прискореної повзучості; $\varepsilon_n - \varepsilon_0 - \varepsilon_s$ – деформація повзучості, накопичена перед руйнуванням за вирахуванням подовження на заключному етапі повзучості

Повторювані цикли нагрівання та охолодження (термоцикли) призводять до погіршення механічних властивостей лопаток нагнітальних машин. Це проявляється не тільки у зниженні міцності при короткочасних навантаженнях, але й у скороченні терміну служби при тривалій дії постійних навантажень (повзучість). При цьому характер руйнування матеріалу залежить від максимальної температури в циклі та його тривалості [5].

Швидкість поширення тріщини в матеріалі залежить від багатьох факторів, включаючи склад сплаву, умов експлуатації та особливості його внутрішньої будови. При аналізі причин руйнування деталей необхідно враховувати, як різні види навантаження та тривалість їх дії впливають на характер руйнування різних сталей та сплавів. Деталі турбін та енергетичного обладнання піддаються впливу агресивних середовищ, таких як продукти згоряння палива, забруднювачі з повітря та теплоносії, що значно ускладнює їх експлуатацію та вимагає ретельного аналізу причин можливих відмов.

У зв'язку з вищевикладеним, розрізняють такі види корозії:

- окислення на повітрі;
- в атмосфері топкових газів;
- у продуктах згоряння сірчистого палива;
- ванадієва корозія;
- сульфідна корозія в умовах контакту із солями морської води;
- за умов контакту з оксидами заліза;
- корозійне розтріскування.
- міжкристалітна та виразкова корозія;
- корозія за умов контакту з лужними металами.

Для проведення досліджень з метою підвищення корозійної та жаростійкості деталей, виготовлених з високолегованої сталі 2X18H10T, були обрані лопатки димососа (рисунок 2).

Руйнування робочих лопаток димососів при підведенні теплової енергії супроводжується накопиченням термомпружних напруг, що призводять до підвищення щільності дислокацій, різних дефектів (дилатонів, фрустронів тощо). Більшість існуючих у природі механічних систем при вільному русі розсіюють упорядковану кінетичну енергію свого руху і перетворюють її на хаотичний тепловий рух молекул. Такі системи прийнято назвати дисипативними системами. Іноді потік енергії, що підводиться до системи, може досягти такої інтенсивності, що старий механізм дисипації вже не може впоратися з ним. Системі загрожує руйнування. Тоді вона може проводити внутрішню перебудову своїх елементів таким чином, щоб процес розсіювання енергії пішов би більш інтенсивно [6].



Рис. 2 – Лопатки димососу ТЕЦ

При формуванні покриттів для робочих коліс димососів термічні напруги розподіляються по деякому періодичному (автохвильовому) закону [5]. Експериментально це проявляється в періодичній зміні мікротвердості покриття, вимірної вздовж і впоперек зразка.

Представлено методику розрахунку термопружних напруг за експериментальним значенням мікротвердості. Для цього скористаємося рішеннями рівняння теплопровідності для нескінченної пластини (покриття), отриманими у роботі [6] для радіальної μ_r та осьової μ_z складових мікротвердості:

$$\mu_r = A_r \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{2 A_r T_0}{z \sqrt{\pi}} I_1 \left(\frac{2r}{R} \right), \quad (1)$$

$$\mu_z = A_z \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{2 A_z T_0}{z \sqrt{\pi z^2}} I_0 \left(\frac{2r}{R} \right). \quad (2)$$

У цих виразах величина A є постійною при невеликих термічних напругах. У металевих тілах ефект пов'язаності поля деформації та температурного поля зазвичай мало впливає на термічне обурення та розподіл теплових напруг. У цьому випадку можна скористатися відомими рішеннями для круглої пластини постійної товщини та для компонентів напруги:

$$\sigma_r = -2G \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (3)$$

$$\sigma_z = -2G \frac{\partial T}{\partial z}. \quad (4)$$

Модуль G визначається рівнянням:

$$2G = \frac{E}{1+\nu}, \quad (5)$$

де E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона.

Для проведення досліджень на жаростійкість було обрано наступну деталь – лопатку димососа. Вибір ґрунтувався на тому, що робочі лопатки димососу в процесі експлуатації схильні до корозійного зносу при високій температурі. Лопатки виготовлені зі сталі марки 12X18Н10Т.

Наносимо на сталь покриття. Нанесення зміцнювальних покриттів на деталі способом конденсації речовини у вакуумі з іонним бомбардуванням проводилося на столі, що обертається, на відстані 25 сантиметрів від катодів.

Технологічний процес нанесення покриттів складався з наступних операцій:

1. Підготовка. Промивання в ультразвуковій ванні гарячим (60°C) миючим знежирювальним розчином; сушіння на спокійному повітрі (30-35 хвилин); обробка всієї поверхні спиртом.
2. Прогрівання у вакуумній камері до 70°C - 85°C протягом 15 хвилин, з метою видалення конденсату та створення вакууму.
3. Для видалення окисної плівки та вологи з поверхні лопатки – створення зникаючої мікродуги іоним розрядом (20 хвилин).
4. Іонне очищення та нагрівання.

Таблиця 1

Втрата маси покриття після термічної обробки при 550°C протягом 80 годин

Лопатка димососу з покриттям	Маса корозійного шару, мг
Лопатка без покриття (сталь 12X18Н10Т)	28,1
Лопатка з багатоступеневим покриттям	5,2
Лопатка з покриттям Fe-Al-Ti	11,6
Лопатка з покриттям Cr-Zn-Cu – Fe-Al-Ti	4,5
Лопатка двошарове покриття на основі ма- лолегованого сплаву хрому Cr-C	7,9

З таблиці 1 впливає, що найбільшу жаростійкість з досліджених нами покриттів має покриття Cr-Zn-Cu – Fe-Al-Ti, а найменшу – Fe-Al-Ti, але будь яке з дослідних покриттів значно збільшує жаростійкість деталей.

Висновки

Виконано порівняльний аналіз структури корозійних та жаростійких характеристик покриттів, нанесених на лопатки димососів зі сталі 35 та 12X18Н10Т. Встановлено, що застосування

азотування як фінішної обробки нанесених покриттів значно підвищує їх стійкість до корозії та високих температур.

Проведено дослідження технології багатошарового покриття. Встановлено, що жаростійкість шару Cr-Zn-Cu – Fe-Al-Ti в 6,3 разів вище сталі 12X18H10T, що використовується для виготовлення лопаток димососу, що працюють за високих температур. Дослідження проводилось на ТЕЦ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Перелік використаних джерел:

1. Халатов А. А. Энергетика України: сучасний стан і найближчі перспективи. *Вісник Національної академії наук України*. 2016. № 6. С. 53-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/visn2016.06.053>.
2. Черноусенко О. Ю. Стан енергетики України та результати модернізації енергоблоків ТЕС. *Проблеми загальної енергетики*. 2014. № 4. С. 20-28. URL: <http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0000297977>.
3. Державна цільова економічна програма енергоефективності і розвитку сфери виробництва енергоносіїв із відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010-2021 роки. URL: https://sae.gov.ua/sites/default/files/blocks/Otsinka_TK_14.06.2021.pdf (дата звернення 15.09.2024).
4. Lottermoser B. G. *Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Berlin : Springer-Verlag, 2010. 410 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>.
5. Удосконалення технології розбирання металоконструкцій механізованого шахтного кріплення / В. Боков та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. № 7(38). С. 22-29. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.7\(38\).1.22-29](https://doi.org/10.32515/2664-262x.2023.7(38).1.22-29).
6. Flink A., Larson T., Sjolen J. Influence of Si on the microstructure of are evaporated (Ti, Si) N thin films; evidence for cubic solid solutions and their thermal stability. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol.200. Pp. 1535-1542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.08.096>.

References:

1. A.A. Khalatov, «Enerhetyka Ukrainy: suchasnyi stan i naiblyzhchi perspektyvy» [«Energy Industry of Ukraine: Current State and Near-Term Prospects»], *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, № 6, pp. 53-61, 2016. doi: **10.15407/visn2016.06.053**. (Ukr.)
2. O.Yu. Chernousenko, «Stan enerhetyky Ukrainy ta rezultaty modernizatsii enerhoblokov TES» [«The state of Ukraine's energy industry and the results of modernization of TPP power units»], *Problemy zahalnoi enerhetyky – Problems of general energy*, № 4, pp. 20-28, 2014. (Ukr.)
3. Derzhavna tsilova ekonomichna prohrama enerhoefektyvnosti i rozvytku sfery vyrobnytstva enerhonosiiv iz vidnovliuvanykh dzherel enerhii ta alternatyvnykh vydiv palyva na 2010-2021 roky (State Targeted Economic Program for Energy Efficiency and Development of the Production of Energy Carriers from Renewable Energy Sources and Alternative Fuels for 2010-2021). [Online]. Available: https://sae.gov.ua/sites/default/files/blocks/Otsinka_TK_14.06.2021.pdf. Accessed on: September 15, 2024. (Ukr.)
4. B.G. Lottermoser, *Mine Wastes. Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Berlin, Germany: Springer-Verlag Publ., 2010. doi: **10.1007/978-3-642-12419-8**.
5. V. Bokov, V. Mirzak, V. Pukalov, R. Telyuta, and O. Sisa, «Udoskonalennia tekhnolohii rozbyrannia metalokonstrukttsii mekhanizovanoho shakhtnoho kriplennia» [«Improvement of the technology of dismantling metal structures of mechanized mine fastening»], *Tsentrálnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky – Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*, № 7(38), pp. 22-29, 2023. doi: **10.32515/2664-262x.2023.7(38).1.22-29**. (Ukr.)
6. A. Flink, T. Larson, and J. Sjolen, «Influence of Si on the microstructure of are evaporated (Ti, Si) N thin films; evidence for cubic solid solutions and their thermal stability», *Surface and Coatings Technology*, vol. 200, pp. 1535-1542, 2005. doi: **10.1016/j.surfcoat.2005.08.096**.

Стаття надійшла 13.11.2024

Стаття прийнята 29.11.2024

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 622.24

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321350

© Горбійчук М.І.¹, Василенчук М.З.², Когутяк М.І.³

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ НЕПРЯМОГО НАГРІВНИКА НАФТИ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Шляхові нагрівники з проміжним теплоносієм широко використовують для попереднього нагріву нафти та газу з метою зменшення в'язкості нафти при її транспортуванні магістральними трубопроводами або для підігріву газу перед пониженням тиску для запобігання утворення гідратів, які утворюються в результаті ефекту Джоуля-Томпсона. Одним із основних елементів шляхового нагрівника є ванна циліндричної або прямокутної форми, заповнена звичайною водою або з домішками, в якій розміщений зміювик, по якому протікає робоче тіло (нафта). Зазвичай в непрямих нагрівниках використовується звичайна вода. Ванна з водою нагрівається димовими газами, які проходять через жарові труби. Димові газу можуть мати різне походження, такі як спалювання продуктів нафтопереробки, а саме газів після перегонки нафти. Жарові труби конструктивно з'єднані з камерою згорання, де спалюється природний газ. Отже, шляховий нагрівник з проміжним теплоносієм є складною динамічною системою, в якій тепло передається до робочого тіла (нафти) через ряд проміжних ланок. Створена математична модель динаміки шляхового нагрівника з проміжним теплоносієм враховує процеси послідовної передачі тепла від одного елемента до іншого. Кожний елемент в ланцюгу теплопередачі описується нелінійним диференціальним рівнянням, яке отримано на основі закону збереження енергії (тепла). Такий спосіб опису динаміки шляхового нагрівника породжує систему диференціальних рівнянь, в якій крім вхідних і вихідних величин є проміжні змінні, такі як температура проміжного середовища, тобто води, температура стінок зміювика тощо. Після лінеаризації системи диференціальних рівнянь були вилучені проміжні змінні, що дало змогу отримати лінеаризовану математичну модель нагрівника, яка є придатною для синтезу багатоконтурної системи автоматичного керування непрямим нагрівником.

Ключові слова: шляховий нагрівник нафти, математична модель, система автоматичного керування, лінеаризація, структурна схема.

M. Horbiichuk, M. Vasylenchuk, M. Kohutyak. Study of dynamic properties of an indirect oil heater as an object of automatic control. Intermediate heat transfer heaters are widely used for the preheating of oil and gas to reduce the viscosity of oil during its transportation through main pipelines or for heating gas before pressure reduction to prevent the formation of hydrates, which occur because of the Joule-Thomson effect. One of the main components of a heat transfer heater is a cylindrical or rectangular bath filled with plain water or water with additives, inside which a coil is placed, through which the

¹ д-р техн. наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: 0000-0002-8586-1883, mi_profgorb@ukr.net

² аспірант, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: 0009-0008-9725-052X, mischa.blaster@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, ORCID: 0000-0003-0026-7744, atp_kohutyak@ukr.net

working fluid (oil) flows. Typically, indirect heaters use plain water. The water bath is heated by flue gases passing through fire tubes. The flue gases may originate from various sources, such as the combustion of oil refining by-products, specifically gases after oil distillation. The fire tubes are structurally connected to the combustion chamber, where natural gas is burned. Thus, an intermediate heat transfer heater is a complex dynamic system in which heat is transferred to the working fluid (oil) through several intermediate stages. The created mathematical model of the dynamics of the heat transfer heater considers the sequential heat transfer processes from one element to another. Each element in the heat transfer chain is described by a nonlinear differential equation derived based on the law of energy (heat) conservation. This approach to describing the dynamics of the heat transfer heater generates a system of differential equations, which, in addition to input and output variables, also includes intermediate variables such as the temperature of the intermediate medium (water), the temperature of the coil walls, and so on. After linearizing the system of differential equations, the intermediate variables were eliminated, which made it possible to obtain a linearized mathematical model of the heater suitable for the synthesis of a multi-loop automatic control system for the indirect heater.

Keywords: road oil heater, mathematical model, automatic control system, linearization, structural diagram.

Постановка проблеми. Для зменшення в'язкості нафти перед її транспортуванням, її попередньо нагрівають. На сьогодні для нагріву нафти використовують непрямі нагрівники нафти, які, на відміну від прямого нагріву нафти, забезпечують рівномірний нагрів робочого продукту, що значно знижує ризики аварій.

Характерною особливістю непрямого нагрівника нафти є наявність ванни циліндричної або прямокутної форми, заповненої водою, у яку занурений змійовик, через який протікає робочий продукт (нафта). До ванни підводиться тепло, яке утворюється у результаті спалювання природного газу. Оскільки ванна має значні розміри, то нагрівник як об'єкт автоматичного керування має значну інерційність, що ускладнює автоматичне керування таким об'єктом у випадку застосування одноконтурної системи автоматичного керування.

Якість процесу керування можна значно покращити, якщо застосувати нові схемотехнічні рішення при синтезі системи автоматичного керування процесом нагріву нафти в непрямому нагрівнику нафти. Для вирішення поставленої задачі необхідно створити адекватну математичну модель шляхового нагрівника нафти, придатну для синтезу багатоконтурної системи автоматичного керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Публікації за темою дослідження можна розділити на дві групи – «технологічні» і моделювання процесу нагріву в непрямих нагрівниках з метою синтезу систем автоматичного керування.

Непрямі нагрівники нафти і газу мають значну теплову інерцію, що спричиняє великі енергетичні затрати при виводі об'єкта на здатний тепловий режим. У роботі [1] досліджується вплив нанотрубок на коефіцієнт теплопередачі. Ефективність процесу додавання нанотрубок до води була перевірена при об'ємних частках 0,025, 0,05, 0,1, 0,2 і 0,3 і діаметром 20-30 нм. Результати досліджень показали, що коефіцієнт теплопередачі нанофлюїду зростає з температурою, але не показує істотних змін зі збільшенням об'ємної частки нанотрубок в рідині. Однак збільшення об'ємної частки нанотрубок збільшило коефіцієнт теплопередачі та коефіцієнт в'язкості. При об'ємній частці нанотрубок 0,025 ефективність процесу теплопередачі збільшилась на 48%.

У роботі [2] досліджено вплив ультразвуку на теплопередачу у шляховому нагрівнику газу. З цією метою випробування проводились у двох режимах – без вібрації та з вібрацією на різних рівнях потужності ультразвуку. Результати досліджень показали позитивний тепловий вплив ультразвукової вібрації на збільшення швидкості теплопередачі, який мав місце при менших витратах рідини та нижчих рівнях потужності нагрівника.

Непрямі нагрівники газу мають низький коефіцієнт корисної дії (ККД), який не перевищує 52% [3]. Для підвищення ККД авторами роботи [3] запропонована сонячна система для часткової компенсації тепловитрат. Така система має у своєму складі сонячні колектори з накопичувальним баком, яка була доповнена циклом нагрівання повітря для горіння димовими газами.

Удосконалена система непрямого нагріву газу здатна заощадити до 39000 нм³ природного газу на рік.

У статті [4] отримана математична модель статичного режиму непрямого нагрівника для станції зниження тиску природного газу. За допомогою рівнянь збереження маси та енергії були оцінені ККД та витрата паливного газу в залежності від температури навколишнього середовища, геометрії нагрівника та характеристик природного газу, включаючи тиск, температуру та його склад. З використанням математичної моделі автори роботи [4] провели розрахунки, які дали змогу виявити, що зниження температури і підвищення тиску вхідного газу, потовщення ізоляції зі скловати і збільшення радіусу жарової труби призвели до збільшення теплового ККД нагрівника з 20 до 60% і, як наслідок, зменшилася витрата палива нагрівника.

У транспортному трубопроводі перед зниженням тиску природного газу необхідний попередній підігрів, щоб запобігти утворенню гідратів [5]. Для цієї мети використовується непрямий нагрівник з водяною банею. Результати термодинамічного моделювання [5] показують, що використання вихлопних продуктів згоряння для попереднього підігріву повітря для горіння може підвищити термічний ККД системи з 46,36% (для базового варіанту) до 73,84%.

Таким чином, у роботах [1-5] досліджувались різні аспекти підвищення ККД шляхових нагрівників природного газу, що пояснюється використанням комерційного газу для нагріву водяної ванни нагрівника. При нагріванні нафти шляховими нагрівниками на газових промислах використовують попутний газ, який не обліковується, що і зумовлює відсутність публікацій за тематикою підвищення ККД непрямих нагрівників нафти.

Один з підходів оптимізації водяних банних нагрівачів представлено у статті [6], де пропонується використання закручених труб, що дозволяє скоротити довжину газової труби на 12,5-25% порівняно з прямими конфігураціями, залежно від ступеня закрутки. Це рішення також сприяє збільшенню коефіцієнта теплопередачі та тиску в системі.

Дослідження [7] зосереджене на аналізі корозійних процесів у непрямих нагрівачах. За допомогою оцінки механічних характеристик, сканувальної електронної мікроскопії та рентгенівської дифракції автори виявили основні причини корозії стінок труб і корпусу нагрівача. Результати підкреслюють важливість підтримання оптимального рівня робочої рідини у ванні нагрівача для запобігання корозії.

У роботі [8] досліджується вплив застосування турбуленторів у водяних нагрівачах. Встановлено, що їх використання покращує теплопередачу на 20%, підвищує швидкість потоку рідини в котушці та збільшує середнє число Нуссельта. Завдяки цьому можна зменшити габарити нагрівача або знизити кількість використовуваного палива для підігріву основного продукту. Однак у дослідженні не враховано вплив зовнішніх факторів, які можуть змінювати температуру рідини, що в свою чергу вплине на ефективність турбуленторів.

Статті [9, 10] присвячені аналізу індуктивному нагріванню сировини та оцінці ефективності такого нагрівання. Недоліком даних досліджень є відсутність врахування використання газів, які виділяються при перегонці сировини.

Другий напрямок досліджень присвячений математичному моделюванню і синтезу систем автоматичного керування процесом нагрівання нафти в шляхових нагрівниках.

У роботі [11] на основі законів збереження кількості речовини і енергії отримана математична модель динаміки шляхового нагрівника нафти у термінах «вхід-вихід», яка придатна для синтезу автоматичної системи керування. Недоліком отриманої моделі є те, що однією із її вихідних координат є температура води, яка, по суті, є проміжною координатою в моделі динаміки.

Спалювання природного газу на газових станціях, оснащених непрямими нагрівниками, створює проблеми, пов'язані з забрудненням навколишнього середовища [12]. Зменшити шкідливі викиди можна впровадженням ефективних систем керування процесом нагрівання нафти і газу в шляхових нагрівниках. Так, у роботі [12] процедура автоматичного керування здійснюється шляхом проектування системи керування для отримання прийнятної температури на виході нагрівника на основі умов входу газу до міської станції. Контролер розраховує температуру гідратуутворення в перерахунку на тиск газу на вході нагрівника і передає цю інформацію на факел горілки нагрівника для регулювання витрати палива. Аналіз результатів показує, що використання запропонованої системи призводить до максимального відносного приросту ефективності нагрівника на 28,54% порівняно зі звичайною системою.

Проведений аналіз літературних джерел показує, що актуальною науковою задачею є створення математичних моделей шляхових нагрівників нафти, придатних для створення ефективних систем автоматичного керування.

Мета роботи – математичне моделювання динаміки шляхового нагрівника нафти з проміжним теплоносієм в координатах «вхід-вихід» для отримання лінеаризованої моделі, придатної для синтезу ефективної системи керування тепловим процесом у шляховому нагрівнику нафти.

Виклад основного матеріалу. При транспортуванні нафти і природного газу їх попередньо підігрівають у нагрівниках з проміжним теплоносієм (непрямої дії) для зменшення в'язкості і запобігання гідратуутворення.

На рис. 1 зображена спрощена функціональна схема нагрівника нафти [12], який має циліндричну або прямокутну форму. Проміжним теплоносієм є вода, яка заповнює ванну 1. У водяну ванну занурені теплообмінні труби 2, по яких протікає робоче середовище (нафта). Нижня частина корпусу 1 нагрівника містить жарові труби 5, які також омиваються водою.

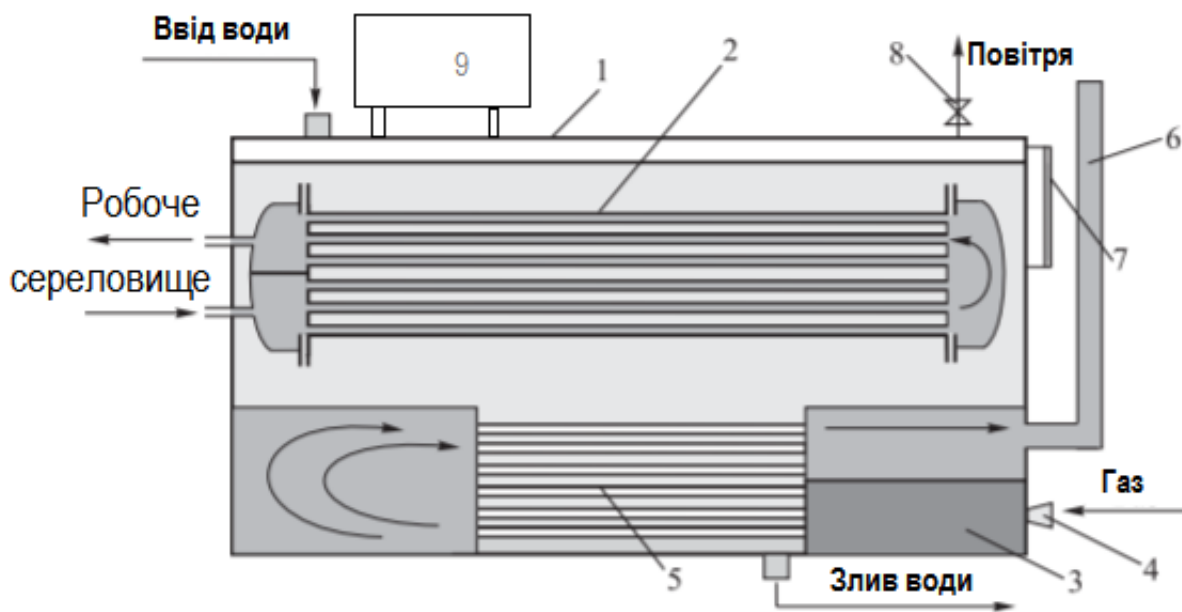


Рис. 1 – Функціональна схема нагрівника

Жарові труби з'єднані з камерою згорання 3, в якій розміщені форсунки 4 для спалювання природного газу. До камери згорання примикає вихлопна труба 6, по якій відводяться продукти згорання. По жаровим трубам рухаються гарячі продукти згорання, тепло від яких через стінки передається воді, яка нагрівається до температури не більше ніж 95°C. Контроль за рівнем води у ванні здійснюється візуально за допомогою мірного скла 7. До корпусу 1 може кріпитись розширювальний бачок 9.

На основі аналізу роботи нагрівника (рис. 1) з проміжним теплоносієм [12], як об'єкта автоматичного керування, створена його структурно-параметрична схема (рис. 2).

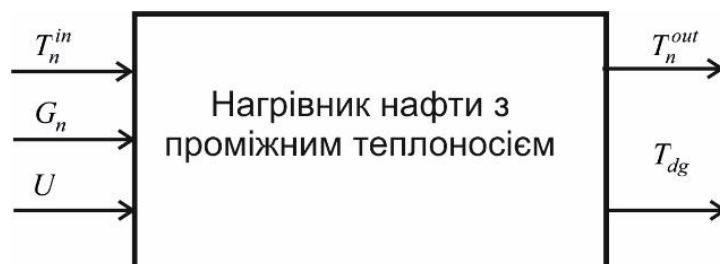


Рис. 2 – Структурно-параметрична схема нагрівника як об'єкта керування

Групу вхідних величин утворюють – температура нафти T_n^{in} на вході в нагрівник, масова витрата нафти G_n та керуюча дія U , сигнал який поступає на виконавчий пристрій, що подачу палива до форсунок нагрівника. Вихідними величинами об’єкта є температура нафти T_n^{out} на виході нагрівника та температура димових газів T_{dg} .

Математичну модель нагрівника з проміжним теплоносієм створена на основі аналізу руху теплових потоків у технологічному апараті (рис. 3).

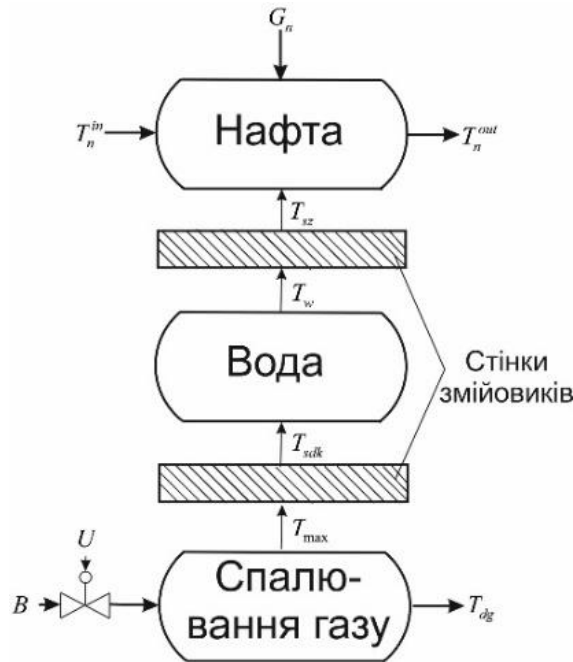


Рис. 3 – Схема теплових потоків нагрівника

Математична модель нагрівника [11, 13] отримана при таких допущеннях:

- продуктовий теплообмінник і газохід замінюється зосередженою ланкою, у якій поверхні обміну, товщина і маса металу стінок відповідають цим же параметрам реальних елементів підігрівника;

- температура середовищ у продуктовому змійовику та газоході дорівнює середній температурі середовищ на вході і виході даних елементів, а у ванні з теплоносієм – середньому значенню діапазону паспортних робочих температур;

- передача тепла через поверхні теплообміну продуктового змійовика та від стінки газоходу до теплоносія відбувається шляхом конвекції, а від димових газів до стінки газоходу – радіантним та конвекційним способами;

- тепловий опір теплообмінних стінок дуже малий, тому їх температура в усіх точках однакова;

- густина середовищ і матеріалу стінок є постійною і не залежить від температури.

З використанням рівняння теплового балансу в роботах [11, 13-14] отримані математичні моделі основних потоків тепла та стінок змійовиків (рис. 3).

Математична модель продукту (нафти) є такою:

$$\tau_n \frac{dT_{ncp}}{dt} + T_{ncp} = -k_{n,1} G_n (T_n^{out} - T_n^{in}) + k_{n,2} T_{sz}, \quad (1)$$

де $\tau_n = \frac{M_n \cdot c_n}{c_{sz,n} \cdot F_z}$ – постійна часу; $k_{n,1} = \frac{c_n}{c_{sz,n} \cdot F_z}$,

$T_{ncp} = \frac{1}{2} (T_n^{in} + T_n^{out})$ – середня температура робочого середовища (нафти),

M_n – маса продукту (нафти) у змійовику; G_n – масова витрата продукту на вході в змійовик; c_n – середня теплоємність продукту.

T_{sz} – середня температура стінки змійовика підігріву;

C_{sz_n} – коефіцієнт теплопередачі від стінки до середовища, що нагрівається;

F_z – площа поверхні обміну змійовика.

Тепло від теплоносія (води) передається через стінку змійовика (рис. 3), яка є акумулятором теплової енергії, робочому середовищу (нафті). На основі закону збереження кількості тепла для стінки змійовика отримана така математична модель:

$$\tau_{sz} \frac{dT_{sz}}{dt} + T_{sz} = k_{wep} T_w + k_{nep} T_{ncp}, \quad (2)$$

де

$$\tau_{sz} = \frac{M_z \cdot c_z}{(C_{w,sz} + C_{sz_n})}; \quad k_{wep} = \frac{C_{w,sz}}{C_{w,sz} + C_{sz_n}}; \quad k_{nep} = \frac{C_{sz_n}}{C_{w,sz} + C_{sz_n}};$$

T_w – температура проміжного теплоносія (води);

$C_{w,sz}$ – коефіцієнт теплопередачі від води до стінки змійовика.

Вода, яка заповнює ванну нагрівника, передає тепло від жарових труб до продукту (рис. 3), який заповнює змійовик, розміщений у воді. Рівняння теплового балансу для води дає змогу отримати таку математичну модель:

$$\tau_w \frac{dT_w}{dt} + T_w = k_{sdk} T_{sdk} + k_{sz} T_{sz}, \quad (3)$$

де $\tau_w = \frac{M_w \cdot c_w}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + F_z \cdot C_{w,sz}}$ – постійна часу;

$$k_{sdk} = \frac{C_{sdk_w} \cdot F_{dk}}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + F_z \cdot C_{w,sz}}; \quad k_{sz} = \frac{C_{w,sz} \cdot F_z}{C_{sdk_w} \cdot F_{dk} + F_z \cdot C_{w,sz}}.$$

M_w – маса води у підігрівачі (у робочій точці при середній температурі 82,5°C);

c_w – теплоємність води;

T_{sdk} – температура стінки димового каналу

F_{dk} – площа поверхні димового каналу

C_{sdk_w} – коефіцієнт теплопередачі від стінки димового каналу до води.

Рівняння теплового балансу для продуктів згорання є таким:

$$\frac{dT_{dg}}{dt} = \frac{1}{0,5L_1} \left((-k_1 \cdot T_{dg} + k_5) \cdot G(U) - k_2 \left(0,5(T_{max} + T_{dg}) \right)^4 + k_3 (T_{sdk})^4 - k_4 (0,5(T_{max} + T_{dg}) - T_{sdk})^{5/4} \right), \quad (4)$$

де $L_1 = V_{zdg} \rho_{cpdg} c_{cpdg}$; V_{zdg} – об'єм димового каналу нагрівника; ρ_{cpdg} – середня густина димових газів; c_{cpdg} – середня теплоємність димових газів; T_{dg} – температура димових газів;

$k_1 = c_{dg} B_{max} (1 + \alpha L_0)$; $k_2 = 0,5 \cdot 10^{-8} (\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \epsilon_{dg}$; $k_3 = 0,5 \cdot 10^{-8} (\epsilon_c + 1) C_0 F_{dk} A_{dg}$;

$k_4 = 2,1 \cdot F_{dk}$; $k_5 = B_{max} \cdot \eta_T \cdot q_g^H$; c_{dg} – теплоємність димових газів на виході із камери згорання; $\beta(U)$ – витратна характеристика регулюючого клапана (прийmemo її лінійною);

$B_{max} = \frac{1}{\beta(U^0)} B_0$ – максимальна витрата паливного газу; $\beta(U^0) = 0,6$ – ступінь відкриття клапана в робочій точці; U – керуюча дія на клапан подачі паливного газу; $B_0 = \frac{G_{no} \cdot c_n (T_{no}^{out} - T_{no}^{in})}{q_g^H \cdot \eta_n}$; q_g^H – те-

плота згорання паливного газу; η_n – коефіцієнт корисної дії підігрівника (індекси «0» при відповідних змінних вказують на їх значення в усталеному режимі); α – коефіцієнт співвідношення паливо/повітря; L_0 – кількість повітря, що витрачається на спалювання одиниці маси природного газу; ϵ_c – ступінь чорноти поверхні стінки газоходу; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла; ϵ_{dk} – ступінь чорноти димових газів при середній температурі газу; A_{dg} – ступінь чорноти димових газів при середній температурі газу та поглинаюча спроможність газу при тем-

пературі T_{sdk} поверхні каналу димових газів; η_T – коефіцієнт корисної дії топки.

Тепло, яке виділилось у результаті згорання природного газу через стінки жарової труби передається проміжному теплоносію (воді). Оскільки стінка має масу і кінцеву товщину, то її динамічні властивості будуть характеризуватись таким диференціальним рівнянням:

$$\frac{d}{dt} T_{sdk} = \frac{1}{M_{dk} c_{dk}} \left(0,5 \cdot \psi \cdot (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left[\varepsilon_{dg} \left(\frac{T_{max} + T_{dg}^\uparrow}{200} \right)^4 - A_{dg} \left(\frac{T_{sdk}}{100} \right)^4 \right] + 2,1 \cdot F_{dk} \cdot \sqrt[4]{(0,5(T_{max} + T_{dg}^\uparrow) - T_{sdk}) \cdot (0,5(T_{max} + T_{dg}^\uparrow) - T_{sdk}) - C_{sdk-w} \cdot F_{dk} \cdot (T_{sdk} - T_w)} \right), \quad (5)$$

де M_{dk} – маса димового каналу; ψ – коефіцієнт, який враховує розподіл тепла в топці за довжиною факелу; T_{max} – максимальна розрахункова температура горіння.

Рівняння (1)-(5) розіб'ємо на дві групи: у першу групу включимо рівняння, ліві частини яких вміщують основні змінні (вихідні величини), а другу групу утворимо із рівнянь, права частина яких – допоміжні змінні (рис. 2). Отже,

$$\tau_n \frac{dT_{ncp}}{dt} + T_{ncp} = -k_{n,1} G_n (T_n^{out} - T_n^{in}) + k_{n,2} T_{sz}, \quad (6)$$

$$\frac{dT_{dg}}{dt} = \frac{1}{0,5L_1} \left((-k_1 \cdot T_{dg} + k_5) \cdot G(U) - k_2 \left(0,5(T_{max} + T_{dg}) \right)^4 + k_3 (T_{sdk})^4 - k_4 (0,5(T_{max} + T_{dg}) - T_{sdk})^{5/4} \right), \quad (7)$$

$$\tau_{sz} \frac{dT_{sz}}{dt} + T_{sz} = k_{wep} T_w + k_{nep} T_{ncp}, \quad (8)$$

$$\tau_w \frac{dT_w}{dt} + T_w = k_{sdk} T_{sdk} + k_{sz} T_{sz}, \quad (9)$$

$$\frac{d}{dt} T_{sdk} = \frac{1}{M_{dk} c_{dk}} \left(0,5 \cdot \psi \cdot (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left[\varepsilon_{dg} \left(\frac{T_{max} + T_{dg}^\uparrow}{200} \right)^4 - A_{dg} \left(\frac{T_{sdk}}{100} \right)^4 \right] + 2,1 \cdot F_{dk} \cdot \sqrt[4]{(0,5(T_{max} + T_{dg}^\uparrow) - T_{sdk}) \cdot (0,5(T_{max} + T_{dg}^\uparrow) - T_{sdk}) - C_{sdk-w} \cdot F_{dk} \cdot (T_{sdk} - T_w)} \right). \quad (10)$$

Для диференціальних рівнянь (6)-(10) початковими умовами будуть усталені значення як вхідних, так і вихідних величин (рис. 2), які будемо позначати рядом з існуючими індексами додатковим індексом «0».

Відмітимо, рівняння (8) і (9) – лінійні відносно своїх змінних.

Рівняння (6), (9) і (10) лінеаризуємо: позначимо через θ (з відповідними індексами) відхилення вхідних і вихідних температур від своїх усталених значень. Інші позначення є такими: $u = \Delta U$, $g_n = \Delta G_n$, де $\Delta U = U - U_0$, $\Delta G_n = G_n - G_{n0}$.

Після проведення операції лінеаризації [2, 3] отримаємо таку систему диференціальних рівнянь:

$$(\tau_n s + 1 + k_{\theta n}) \theta_n^{out}(s) = (k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) \theta_n^{in}(s) + 2\theta_{sz}(s) + k_g g_n(s), \quad (11)$$

$$(\tau_{\theta 1} s + 1) \theta_{dg}^\uparrow(s) = K_{\theta 1} \theta_{sdk}(s) + K_u u(s), \quad (12)$$

$$(\tau_{sz} s + 1) \theta_{sz}(s) = k_{wep} \theta_w(s) + 0,5 k_{nep} (\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s)), \quad (13)$$

$$(\tau_w s + 1) \theta_w(s) = k_{sdk} \theta_{sdk}(s) + k_{sz} \theta_s(s), \quad (14)$$

$$(\tau_{t,1} s + 1) \theta_{sdk}(s) = K_{t,1} \theta_{dg}(s) + K_{t,2} \theta_w(s), \quad (15)$$

де $\tau_{\theta 1} = \frac{0,5L_1}{k_{\theta,1}}$; $K_{\theta,1} = \frac{k_{\theta,2}}{k_{\theta,1}}$; $K_u = \frac{k_u}{k_{\theta,1}}$; $\tau_{t,1} = \frac{M_{dk} \cdot c_{dk}}{k_{t,1}}$; $K_{t,1} = \frac{k_{t,2}}{k_{t,1}}$; $K_{t,2} = \frac{k_{t,3}}{k_{t,1}}$; $k_g = \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial G_n} \right)_0$;

$k_{\theta n} = \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial T_n^{out}} \right)_0 = - \left(\frac{\partial \varphi_0}{\partial T_n^{in}} \right)_0$; $k_{\theta,1} = - \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial T_{dg}^\uparrow} \right)_0$; $k_{\theta,2} = \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial T_{sdk}} \right)_0$; $k_u = \left(\frac{\partial \varphi_1}{\partial U} \right)_0$; $k_{t,1} = - \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T_{dg}^\uparrow} \right)_0$;

$k_{t,2} = \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T_{sdk}} \right)_0$; $k_{t,2} = \left(\frac{\partial \varphi_2}{\partial T_w} \right)_0$; $\varphi_0 = -2k_{n,1} G_n (T_n^{out} - T_n^{in})$;

$\varphi_1 = -k_1 \cdot \beta(U) \cdot (T_{dg}^\uparrow - 273) - k_2 \left(0,5(T_{max} + T_{dg}^\uparrow) \right)^4 + k_3 (T_{sdk})^4 - k_4 \cdot \left(0,5(T_{max} + T_{dg}^\uparrow) - T_{sdk} \right)^{5/4} + k_5 \cdot \beta(U)$,

$\varphi_2 = 0,5 \cdot \psi \cdot (\varepsilon_c + 1) C_0 F_{dk} \left[\varepsilon_{dg} \left(\frac{T_{max} + T_{dg}^\uparrow}{200} \right)^4 - A_{dg} \left(\frac{T_{sdk}}{100} \right)^4 \right] + 2,1 \cdot F_{dk} \cdot$

$\sqrt[4]{(0,5(T_{max} + T_{dg}^\uparrow) - T_{sdk}) \cdot (0,5(T_{max} + T_{dg}^\uparrow) - T_{sdk}) - C_{sdk-w} \cdot F_{dk} \cdot (T_{sdk} - T_w)}$.

Три останні рівняння (13)-(15) вміщують проміжні змінні θ_{sdk} , θ_w і θ_{sz} . Для їх визначення скористаємося системою рівнянь, яку утворимо із (13)-(15). Отже,

$$-k_{wep}\theta_w(s) + (\tau_{sz}s + 1)\theta_{sz}(s) = 0,5k_{nep}(\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s)), \quad (16)$$

$$-k_{sdk}\theta_{sdk}(s) + (\tau_ws + 1)\theta_w(s) - k_{sz}\theta_{sz}(s) = 0, \quad (17)$$

$$(\tau_{t,1}s + 1)\theta_{sdk}(s) - K_{t,2}\theta_w(s) = K_{t,1}\theta_{dg}(s). \quad (18)$$

Після введення позначень:

$$\alpha_{12} = -k_{wcp}; \alpha_{13} = \tau_{sz}s + 1;$$

$$\alpha_{21} = -k_{sdk}; \alpha_{22} = \tau_ws + 1; \alpha_{23} = -k_{sz};$$

$$\alpha_{31} = \tau_{t,1}s + 1; \alpha_{32} = -K_{t,2};$$

$$\alpha_{11} = 0; \alpha_{33} = 0; \pi_2 = 0;$$

$$\pi_1 = 0,5k_{nep}(\theta_n^{in}(s) + \theta_n^{out}(s));$$

$$\pi_3 = K_{t,1}\theta_{dg}(s)$$

система рівнянь (16)-(18) буде такою:

$$\alpha_{11}\theta_{sdk}(s) + \alpha_{12}\theta_w(s) + \alpha_{13}\theta_{sz}(s) = \pi_1,$$

$$\alpha_{21}\theta_{sdk}(s) + \alpha_{22}\theta_w(s) + \alpha_{23}\theta_{sz}(s) = \pi_2,$$

$$\alpha_{31}\theta_{sdk}(s) + \alpha_{32}\theta_w(s) + \alpha_{33}\theta_{sz}(s) = \pi_3.$$

Отриману систему рівнянь подамо у векторно-матричній формі

$$A\bar{\theta} = \bar{\pi}, \quad (19)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}; \quad \bar{\theta} = \begin{bmatrix} \theta_{sdk} \\ \theta_w \\ \theta_{sz} \end{bmatrix}; \quad \bar{\pi} = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \end{bmatrix}.$$

Із рівняння (19) знаходимо

$$\bar{\theta} = A^{-1}\bar{\pi}. \quad (20)$$

Після виконання відповідних дій, рівняння (20) дає такий результат:

$$\theta_{sdk} = \frac{1}{\Delta}(\pi_3(\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22}) - \pi_1\alpha_{23}\alpha_{32});$$

$$\theta_w = \frac{1}{\Delta}(\pi_3\alpha_{13}\alpha_{21} + \pi_1\alpha_{23}\alpha_{31});$$

$$\theta_{sz}(s) = \frac{1}{\Delta}(\pi_1(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31}) - \pi_3\alpha_{12}\alpha_{21}),$$

де

$$\Delta = \alpha_{12}\alpha_{23}\alpha_{31} + \alpha_{13}\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{13}\alpha_{22}\alpha_{31}.$$

Отримані значення θ_{sdk} і $\theta_{sz}(s)$ підставимо у вирази (11) і (12). Якщо врахувати значення π_1 і π_3 , то отримаємо

$$\begin{aligned} & \left((\tau_n s + 1 + k_{\theta n}) - \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta} \right) \theta_n^{out}(s) + \frac{2}{\Delta} \alpha_{12}\alpha_{21}K_{t,1}\theta_{dg}(s) = \\ & = \left((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) + \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta} \right) \theta_n^{in}(s) + k_g g_n(s), \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2\Delta} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} \theta_n^{out}(s) + \left((\tau_{\theta 1} s + 1) - \frac{K_{\theta 1} K_{t,1}}{\Delta} (\alpha_{12} \alpha_{23} - \alpha_{13} \alpha_{22}) \right) \theta_{dg}(s) = \\ & = -\frac{1}{2\Delta} k_{nep} K_{\theta 1} \alpha_{23} \alpha_{32} \theta_n^{in}(s) + K_u u(s). \end{aligned} \quad (22)$$

Систему рівнянь (21) і (22) об'єднаємо в одне векторно-матричне рівняння, тобто

$$A\bar{Y}(s) = \bar{b}, \quad (23)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}; \quad \bar{Y}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{out} \\ \theta_n \end{bmatrix}; \quad \bar{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix};$$

$$A_{11}(s) = \tau_n s + 1 + k_{\theta n} - \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta}; \quad A_{12}(s) = \frac{2}{\Delta}\alpha_{12}\alpha_{21}K_{t,1};$$

$$A_{21}(s) = \frac{1}{2\Delta}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32}; \quad A_{22}(s) = (\tau_{\theta 1}s + 1) - \frac{K_{\theta 1}K_{t,1}}{\Delta}(\alpha_{12}\alpha_{23} - \alpha_{13}\alpha_{22}).$$

$$b_1 = \left((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s) + \frac{k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})}{\Delta} \right) \theta_n^{in}(s) + k_g g_n(s),$$

$$b_2 = -\frac{1}{2\Delta}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32}\theta_n^{in}(s) + K_u u(s).$$

Оскільки виходами об'єкта (нагрівника) є величини θ_n^{out} і $\theta_{dg}(s)$, то із рівняння (23) знаходимо

$$\bar{Y}(s) = A^{-1}\bar{b}. \quad (24)$$

Рівняння (24) подамо у розгорнутому вигляді:

$$\theta_n^{out} = \frac{1}{\Delta_{out}}(A_{22}b_1 - A_{12}b_2);$$

$$\theta_{dg} = \frac{1}{\Delta_{out}}(A_{11}b_2 - A_{21}b_1),$$

де $\Delta_{out} = A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}$.

Якщо врахувати значення b_1 і b_2 , то прийдемо до такого результату:

$$\theta_n^{out} = \frac{1}{\Delta \cdot \Delta_{out}} \left(((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s)\Delta + k_{nep}A_{22}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})) + \frac{A_{12}}{2}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32} \right) \theta_n^{in}(s) +$$

$$+ \frac{k_g A_{22}}{\Delta_{out}}g_n(s) - \frac{K_u A_{12}}{\Delta_{out}}u(s); \quad (25)$$

$$\theta_{dg} = -\frac{1}{\Delta} \cdot \frac{1}{\Delta_{out}} \left(\frac{A_{11}}{2}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32} + A_{21}((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s)\Delta) + k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31}) \right) \theta_n^{in}(s) -$$

$$- \frac{k_g A_{21}}{\Delta_{out}}g_n(s) + \frac{A_{11}K_u}{\Delta_{out}}u(s). \quad (26)$$

Отримані рівняння (25) і (26) дають змогу визначити шість передавальних функцій, які характеризують динаміку непрямого нагрівника нафти. Отже,

$$w_{11}(s) = \frac{1}{\Delta \cdot \Delta_{out}} \left(A_{22}((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s)\Delta + k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31})) + \frac{A_{12}}{2}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32} \right);$$

$$w_{12}(s) = \frac{k_g A_{22}}{\Delta_{out}}; \quad w_{13}(s) = -\frac{K_u A_{12}}{\Delta_{out}};$$

$$w_{21}(s) = -\frac{1}{\Delta} \cdot \frac{1}{\Delta_{out}} \left(\frac{A_{11}}{2}k_{nep}K_{\theta 1}\alpha_{23}\alpha_{32} + A_{21}((k_{\theta n} - 1 - \tau_n s)\Delta) + k_{nep}(\alpha_{21}\alpha_{32} - \alpha_{22}\alpha_{31}) \right);$$

$$w_{22}(s) = -\frac{k_g A_{21}}{\Delta_{out}}; \quad w_{23}(s) = \frac{A_{11}K_u}{\Delta_{out}}.$$

Рівняння (25) і (26) об'єднаємо в одне векторно-матричне рівняння

$$\bar{Y}(s) = W(s)\bar{F}(s), \quad (27)$$

де

$$W(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) & w_{13}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) & w_{23}(s) \end{bmatrix}; \quad \bar{F}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{in} \\ g_n \\ u \end{bmatrix}.$$

Матричну передавальну функцію $W(s)$ розіб'ємо на два блоки. Тоді

$$Y(s) = [W_1(s) \quad W_2(s)] \begin{bmatrix} u(s) \\ \bar{f}(s) \end{bmatrix},$$

де

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} w_{13}(s) \\ w_{23}(s) \end{bmatrix}; \quad W_2(s) = \begin{bmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) \end{bmatrix}; \quad \bar{f}(s) = \begin{bmatrix} \theta_n^{in} \\ g_n \end{bmatrix}.$$

Після зроблених позначень векторно-матричне рівняння (27) набуде такого вигляду:

$$Y(s) = W_1(s)u(s) + W_2(s)\bar{f}(s). \quad (28)$$

У рівнянні (28) $\bar{f}(s)$ – вектор зовнішніх збурень, які діють на об'єкт.

Використовуючи рівняння (28), створимо структурну схему нагрівника як об'єкта автоматичного керування (рис. 4).

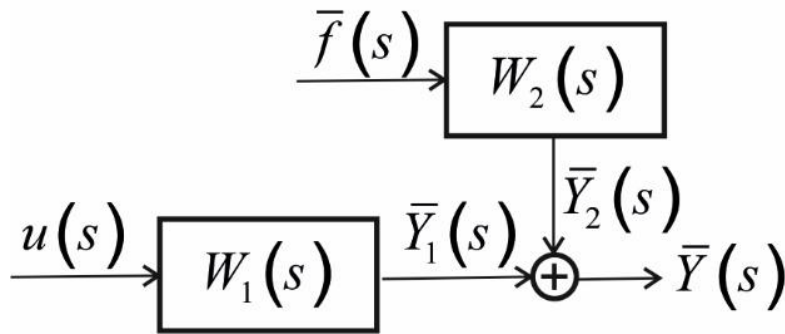


Рис. 4 – Структурна векторно-матрична схема нагрівника як об'єкта керування

На основі системи рівнянь (25) і (26) створена деталізована структурна схема нагрівника як об'єкта автоматичного керування (рис. 5).

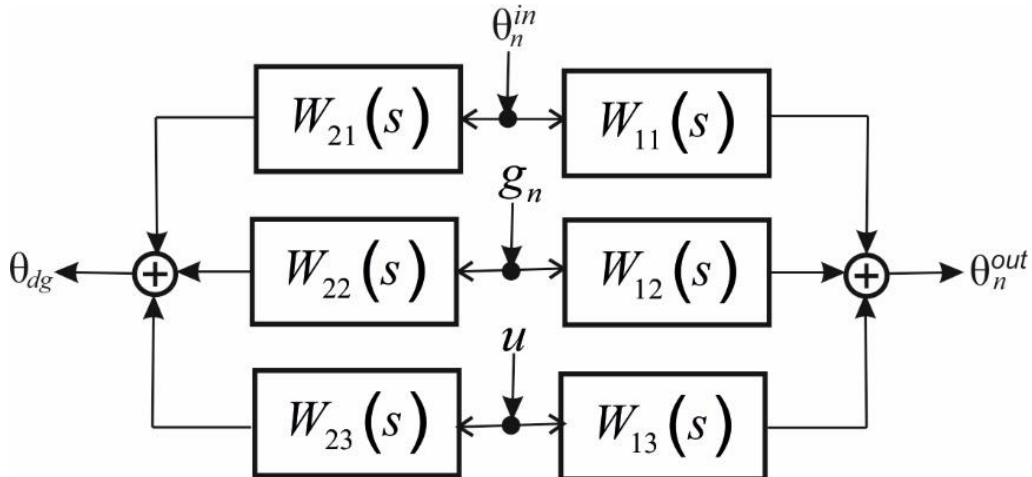


Рис. 5 – Структурна схема нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування

Отримана лінеаризована математична модель нагрівника та його структурна схема (рис. 5) є основою для створення ефективної системи автоматичного керування процесом нагрівання нафти перед її транспортуванням або подачею споживачам.

Висновки

1. На основі законів збереження енергії отримані диференціальні рівняння динаміки шляхового нагнітача, які придатні для синтезу автоматичного керування і, які на відміну від роботи [11], температура води водяної бані є проміжною координатою. Встановлено, що вихідними координатами нагрівника з проміжним теплоносієм є температура робочого продукту (нафти) на виході нагрівника та температура димових газів, які функціонально залежать від витрати паливного газу.

2. Вперше отримана лінеаризована математична модель шляхового нагрівника нафти з проміжним теплоносієм у вигляді шести передавальних функцій як по каналам керуючих впливів, так і по каналам збурень, що дало змогу синтезувати структурну схему нагрівника як об'єкта автоматичного керування, яка буде основою для синтезу ефективної системи автоматичного керування процесом нагріву нафти в нагрівнику.

Перелік використаних джерел:

1. Rahmati A. R., Reiszadeh M. An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations. *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 134. Pp. 107-117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.111>.
2. An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling / A. Amiri Delouei et al. *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 237. Article 121795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121795>.
3. Rashidmardani A., Hamzei M. Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters' Efficiency to Reduce Energy Losses. *Science and Engineering Investigations*. 2013. Vol. 2. Iss. 12. Pp. 17-24.
4. Mostafavi S.A., Shirazi M. Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption. *Energy*. 2020. № 212. Article 118390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118390>.
5. Khanmohammadi S., Shahsavari A. Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study). *Energy Equipment and Systems*. 2020. Vol. 8. No. 4. Pp. 349-365. DOI: <https://doi.org/10.22059/ees.2020.241292>.
6. Performance enhancement of water bath heater at natural gas city gate station using twisted tubes / Soleimani P., Khoshvaght-Aliabadi M., Rashidi H., Bahmanpour H. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2020. Vol. 28(1). Pp. 165-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.03.018>.
7. Failure analysis of carbon steel components in a water bath heater and the influence of ethylene glycol concentration / Shabanian S., Ashrafizadeh F., Saeidi N., Ashrafi A. *Engineering Failure Analysis*. 2016. Vol. 66. Pp. 533-543. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2016.05.015>.
8. Improving thermal performance of water bath heaters in natural gas pressure drop stations / Khosravi M., Arabkoohsar A., Alsagri A.S., Sheikholeslami M. *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 159. Article 113829. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113829>.
9. Design of a simple temperature transmitter circuit of an electric heater operated water bath / Chakraborty S., Bera S. K., Bera S. C., Mandal N. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18(8). Pp. 3140-3151. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2809465>.
10. Induction heating of petroleum products as an efficient technological process / A. I. Nikitin et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 950. Article 012030.
11. Горбійчук М. І., Когутяк М. І., Гарасимів В. М. Математична модель підігрівника з проміжним теплоносієм. *Методи та прилади контролю якості*. 2021. № 2(47). С. 83-95. DOI: [https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-2\(47\)-83-95](https://doi.org/10.31471/1993-9981-2021-2(47)-83-95).
12. Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations / Ebrahimi-Moghadam A., Deymi-Dashtebayaz M., Jafari H., Niazmand A. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2020. Vol. 141. Pp. 2573-2588. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09413-4>.
13. Горбійчук М. І., Василенчук М. З., Когутяк М. І. Синтез лінеаризованих математичних моделей нагрівника з проміжним теплоносієм. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*. 2023. Вип. 3. С. 144-153. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-17>.
14. Горбійчук М. І., Василенчук М. З. Синтез структурної схеми нагрівника нафти як об'єкта автоматичного керування. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 4(87). С. 44-52. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5>.

References:

1. A.R. Rahmati, and M. Reiszadeh, «An experimental study on the effects of the use of multi-walled carbon nanotubes in ethylene glycol/water-based fluid with indirect heaters in gas pressure reducing stations», *Applied Thermal Engineering*, vol. 134, pp. 107-117, 2018. doi: [10.1016/j.applthermaleng.2018.01.111](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.01.111).
2. A. Amiri Delouei, H. Naeimi, H. Sajjadi, M. Atashafrooz, M. Imanparast, and A.J. Chamkha, «An active approach to heat transfer enhancement in indirect heaters of city gate stations: An experimental modeling», *Applied Thermal Engineering*, vol. 237, article 121795, 2024. doi:

- 10.1016/j.applthermaleng.2023.121795.**
3. A. Rashidmardani, and M. Hamzei, «Effect of Various Parameters on Indirect Fired Water Bath Heaters' Efficiency to Reduce Energy Losses», *Science and Engineering Investigations*, vol. 2, iss. 12, pp. 17-24, 2013.
 4. S.A. Mostafavi, and M. Shirazi, «Thermal modeling of indirect water heater in city gate station of natural gas to evaluate efficiency and fuel consumption», *Energy*, № 212, 2020, article 118390. **doi: 10.1016/j.energy.2020.118390.**
 5. S. Khanmohammadi, and A. Shahsavari, «Thermodynamic assessment and proposal of new configurations of an indirect water bath heater for a City Gate Station (a case study)», *Energy Equipment and Systems*, vol. 8, no. 4, pp. 349-365, 2020. **doi: 10.22059/ees.2020.241292.**
 6. P. Soleimani, M. Khoshvaght-Aliabadi, H. Rashidi, and H. Bahmanpour, «Performance enhancement of water bath heater at natural gas city gate station using twisted tubes», *Chinese Journal of Chemical Engineering*, vol. 28(1), pp. 165-179, 2020. **doi: 10.1016/j.cjche.2019.03.018.**
 7. S. Shabanian, F. Ashrafizadeh, N. Saeidi, and A. Ashrafi, «Failure analysis of carbon steel components in a water bath heater and the influence of ethylene glycol concentration», *Engineering Failure Analysis*, vol. 66, pp. 533-543, 2016. **doi: 10.1016/j.engfailanal.2016.05.015.**
 8. M. Khosravi, A. Arabkoohsar, A.S. Alsagri, and M. Sheikholeslami, «Improving thermal performance of water bath heaters in natural gas pressure drop stations», *Applied Thermal Engineering*, vol. 159, article 113829, 2019. **doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.113829.**
 9. S. Chakraborty, S.K. Bera, S.C. Bera, and N. Mandal, «Design of a simple temperature transmitter circuit of an electric heater operated water bath», *IEEE Sensors Journal*, vol. 18(8), pp. 3140-3151, 2018. **doi: 10.1109/JSEN.2018.2809465.**
 10. A.I. Nikitin, N.A. Pavlova, N.G. Bereslavskaya, S.I. Kolesnikov, and V.V. Yagov, «Induction heating of petroleum products as an efficient technological process», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 950, article 012030, 2020.
 11. M.I. Horbiichuk, M.I. Kohutyak, and V.M. Harasymiv, «Matematychna model pidhrivnyka z promizhnym teplonosiiem» [«Mathematical model of the heater with intermediate heat»], *Metody ta prylady kontroliu yakosti – Methods and devices of quality control*, vol. 2(47), pp. 83-95, 2021. **doi: 10.31471/1993-9981-2021-2(47)-83-95.** (Ukr.)
 12. A. Ebrahimi-Moghadam, M. Deymi-Dashtebayaz, H. Jafari, and A. Niazmand, «Energetic, exergetic, environmental and economic assessment of a novel control system for indirect heaters in natural gas city gate stations», *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 141, pp. 2573-2588, 2020. **doi: 10.1007/s10973-020-09413-4.**
 13. M. Vasylenchuk, M. Horbiichuk, and M. Kohutyak, «Syntez linearyzovanykh matematychnykh modelei nahrivnyka z promizhnym teplonosiiem» [«Synthesis of linearized mathematical models of the heater with intermediate heat carrier»], *Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh – Measuring and computing devices in technological processes*, vol. 3, pp. 144-153, 2023. **doi: 10.31891/2219-9365-2023-75-17.**
 14. M. Horbiichuk, and M. Vasylenchuk, «Syntez strukturnoi skhemy nahrivnyka nafty yak obiekta avtomatychnoho keruvannia» [«Synthesis of the structural diagram of the oil heater as an object of automatic control»], *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Visnyk of Kherson National Technical University*, no. 4(87), pp. 44-52, 2023. **doi: 10.35546/kntu2078-4481.2023.4.5.**

Стаття надійшла 01.10.2024

Стаття прийнята 15.10.2024

163 БІОМЕДИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.414.2

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321352

© Зайцев Д.В.¹, Азархов О.Ю.², Сілі І.І.³, Єфременко Б.В.⁴

ПРИЛАД ПРОСТОРОВОЇ НАВІГАЦІЇ ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ОБМЕЖЕНИМИ МОЖЛИВОСТЯМИ

У статті представлено прототип приладу для просторової навігації, розроблений для людей із важкими порушеннями зору або сліпотою. Апаратна реалізація здійснена за допомогою сервісу TinkerCAD, а програмне забезпечення розроблено в середовищі Arduino IDE. Прилад забезпечує визначення безпечних дистанцій до перешкод та розпізнавання кольорів. Основними компонентами є Arduino UNO, ультразвукові далекоміри HC-SR04, датчик APDS-9960 і п'єзоелементи. Система враховує анатомічні особливості користувача завдяки функції калібрування. Інтеграція сучасних технологій сприяє підвищенню мобільності, впевненості та соціальної активності осіб із вадами зору.

Ключові слова: порушення зору, допоміжні пристрої, просторова навігація, Arduino UNO, далекомір, APDS-9960, TinkerCAD, Arduino IDE, C++.

D.V. Zaitsev, O.Yu. Azarkhov, I.I. Sili, B.V. Efremenko. Spatial navigation device for people with disabilities. The article discusses the creation of a prototype of a spatial navigation device for people with disabilities, namely severe visual impairment or blindness. Hardware implementation of the prototype was carried out using TinkerCAD automated design and 3D modelling. The software is created in the Arduino IDE development environment. The publications considered in the work showed that people with visual impairments can get autonomous access to important information thanks to the integration of modern technologies, which contributes to increasing their confidence, mobility and social activity. Providing easy access to texts, educational materials and digital information about the environment helps build a sense of independence and empowerment. Advances in assistive technology provide visually impaired people with up-to-date information about their surroundings, which helps improve navigation and increase safety. Some of the existing systems take into account social aspects, in particular the problems associated with the recognition of familiar faces without the use of auditory or tactile signals. This comprehensive approach not only improves navigational capabilities, but also contributes to enriching the social well-being and safety of visually impaired communities. Therefore, the development of a system capable of helping people with visual impairments in spatial navigation is an urgent topic and an important step in creating social equality. The main components of the developed device are the Arduino UNO hardware platform, HC-SR04 ultrasonic rangefinders, APDS-9960 digital sensor and active piezo elements. The control program created in the Arduino IDE ensures high efficiency of the interaction of sensors with the microcontroller. This prototype is capable of working in two modes: mainly – when safe distances to obstacles are determined and the mode of determining colors based on the RGB component. The device takes into account anatomical features, such as height -

¹ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, daniil.zaytsev.ne@gmail.com

² д-р мед. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-0062-0616, azarhov_a_v@pstu.edu

³ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-6603-2174, sili_i_i@pstu.edu

⁴ канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-0438-6433, efremenko_b_v@pstu.edu

for this, a calibration button is placed on the body. Thanks to piezo elements, interaction with the user is carried out in the form of a sound signal with a certain height, frequency and duration.

Keywords: *visual impairment, assistive devices, spatial navigation, Arduino UNO, range-finder, APDS-9960, Tinkercad, Arduino IDE, C++.*

Постановка проблеми. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) за останніми даними станом на 10 серпня 2023 року у світі налічується щонайменше 2,2 мільярда людей з різними типами порушення зору. Майже половину з цієї кількості випадків можна було запобігти або вилікувати. Дана проблема створює значний ефект як на життя самих людей, так і на економіку – збитки через інвалідність по зору оцінюються у 411 мільярдів доларів США. До основних причин порушення зору відносять неправильну рефракцію, катаракту, діабетичну ретинопатію, глаукому, пресбіопію та вікову макулярну дегенерацію [1]. Глобальне старіння і зростання населення, а також тенденція поширеності сліпоти та порушень зору у молодих людей призводять до суттєвого збільшення кількості людей, які стикаються з цими проблемами. Особливо значний вплив має невивражена пресбіопія [2]. У 2020 році групою вчених з Інституту дослідження зору та очей (Університет Англії Раскін, Кембридж, Велика Британія), Медичної школи Duke-NUS (Сінгапур, Сінгапур), Інституту показників і оцінки здоров'я (Університет Вашингтона, Сіетл, Вашингтон, США) методами систематичного огляду і мета-аналізу було зроблено оцінку глобальної тенденції до втрати зору завдяки простеженню її динаміки з 1990 до 2020 року [3]. Це дослідження надало змогу зробити прогнози росту важких порушень зору до 2050 року. Згідно даних, у 2020 році вже налічувалося 43,3 мільйони сліпих людей, з яких 55% (23,9 мільйони) – жінки. До 2050 року кількість людей зі сліпотою має зрости в середньому до 61 мільйона.

Порушення зору та вікові захворювання очей не лише спричиняють численні труднощі у повсякденному житті, такі як неможливість читати друкований текст, орієнтуватися у просторі чи займатися фізичною активністю (зокрема танцями, спортом або фітнесом), але й знижують економічні та освітні можливості і навіть підвищують ризик смертності [2, 4, 5]. Як наслідок, люди з важкими порушеннями зору або сліпотою мають більшу схильність до тривоги, депресії та соціальної ізоляції [1]. В багатьох дослідженнях увага переважно зосереджується на сліпоті, а також на помірних і тяжких порушеннях зору, з мінімальним висвітленням легкої форми порушень через обмеженість даних. Цей тип порушення зору визначається гостротою менше 6/12. Незважаючи на класифікацію як «легкий», такий ступінь зниження зору також суттєво впливає на повсякденне життя. У багатьох країнах з таким рівнем зору людині заборонено керувати транспортними засобами [2].

З 2022 року в Україні було зафіксовано зростання кількості людей із порушеннями зору. Згідно з даними Національного інституту охорони здоров'я, у 2021 році було зареєстровано 17478 випадків втрати чи зниження зору, тоді як у 2022 році цей показник зріс до 19551 випадків. Водночас за перші 7 місяців 2023 року вже діагностовано понад 19000 подібних випадків, що перевищує загальний показник за весь попередній рік [6]. Саме тому постає питання у застосуванні допоміжних пристроїв [7].

Поняття «допоміжні пристрої» охоплює як технічні засоби, так і програмне забезпечення, які сприяють використанню технологій людьми з інвалідністю, підвищуючи їхню якість життя [8]. Завдяки таким технологіям можна підтримувати функціональні можливості людини. Багато людей із порушеннями здоров'я застосовують ці пристрої для виконання повсякденних завдань і повноцінної інтеграції у суспільство. Допоміжні технології здатні забезпечити підтримку людей із вадами зору чи сліпотою у виявленні перешкод, навігації, розпізнаванні об'єктів, візуалізації та відстеженні їхнього положення чи руху в реальних умовах. Такі пристрої зазвичай оснащені сенсорами, які збирають інформацію, що надалі обробляється центральним процесором (CPU) або мікроконтролером. Інформація передається користувачу у формі звуку, вібрації або їх комбінації, залежно від особливостей пристрою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день над проблемою створення нових прототипів допоміжних пристроїв активно працюють багато авторів. Нові пристрої і

системи охоплюють такі сфери як мікропроцесорна техніка, сенсори, програмування, Інтернет речей (далі IoT), комп'ютерний зір та глибоке навчання [7, 9-20].

В роботі [9] представлений прототип системи, що здатний надавати підтримку в навігації з похибкою менше 0,5 метра як на відкритому повітрі, так і в приміщенні. Розроблюваний пристрій надає користувачу 2 важливі функції. По-перше, система визначає локалізації, по-друге – забезпечує безперервний моніторинг траєкторії. Для функціонування пристрій використовує монокулярну камеру, що розташовується на грудях у користувача. У порівнянні з традиційним GPS на мобільних пристроях, похибка якого складає в умовах міста до 20 м, цей прототип демонструє високу точність та ефективність.

Наступний підхід до вирішення проблеми навігації запропонований в іншому дослідженні [10], яке базується на інтеграції IoT в електронний допоміжний засіб для подорожей. Запропонований прототип, як і попередній, здатен працювати як у приміщенні, так і у відкритих місцях. Окрім цього, для детектування вибоїн та бар'єрів на відстані до 1 метра використано ультразвукові далекоміри. Система також підтримує GPS, може підключатися до Wi-Fi за допомогою ESP8266, що має вбудований інтерфейс бездротового зв'язку. Окремими опціями є можливість виявлення вологих поверхонь і виклику на мобільний телефон. Центральним керуючим елементом виступає апаратна плата Arduino UNO. Представлений у роботі прототип демонструє, як датчики з підтримкою Інтернету речей можуть сприяти покращенню повсякденного життя людей із вадами зору, забезпечуючи їм можливість самостійно орієнтуватися.

Автори інших публікації [11-19] розглядають створення мобільних додатків та систем, що базуються на технологіях оптичного розпізнавання символів (OCR), алгоритмах локалізації, алгоритмах Дейкстри, датчиків часу польоту (ToF), концепції інтеграції OCR з IoT та бездротовими сенсорними мережами (WSN), комп'ютерного зору, машинного та глибокого навчання, нейронних мереж (таких як YOLO). Варто відзначити, що всі описані в статтях системи демонструють високу ефективність. Зокрема, у роботі [16] представлено систему для виявлення об'єктів і розпізнавання обличчя у реальному часі, яка здатна ідентифікувати 20 видів харчових продуктів, а також розпізнавати обличчя з точністю 83,27% і 95,64% відповідно. Окрім точності, одним з важливих параметрів систем є сигналізація про наявність можливих небезпек або відстані до них. Автори дослідження [18] застосовують бібліотеку Python перетворення тексту в мову для оповіщення. У даній публікації також звернено увагу на перспективи розвитку, а саме зменшення ваги і застосуванні більш сучасних компонентів.

Огляд сучасних досліджень у галузі допоміжних технологій показує, що завдяки впровадженню інноваційних рішень люди з вадами зору здобувають можливість самостійно отримувати важливу інформацію. Це, у свою чергу, сприяє зростанню їхньої впевненості, активній участі в суспільному житті [8, 15, 16]. Тому розробка системи, що здатна допомагати людям з вадами зору у просторовій навігації, є важливим кроком в створенні соціальної рівності.

Метою даної роботи є проектування і створення діючого прототипу приладу просторової навігації для людей з обмеженими можливостями, а саме з порушеннями зору чи повною сліпотою. Апаратна реалізація прототипу здійснена за допомогою сервісу автоматизованого проектування і 3D моделювання TinkerCAD. Програмне забезпечення створене у середовищі розробки Arduino IDE.

Виклад основного матеріалу. Як показав аналіз останніх досліджень, у якості керуючого елементу системи доцільно використати апаратну платформу Arduino UNO, що поєднує в собі чудові технічні характеристики [20], надійність та низьку вартість. Широкий спектр застосувань [10, 20, 21] показує, що Arduino UNO є гнучкою та універсальною апаратною платформою, що може бути адаптована під велику кількість завдань. Тому на основі даного мікроконтролера можна побудувати незалежний від зовнішніх підключень прилад, що дозволить полегшити навігацію людям з вадами зору.

Нижче наведено перелік компонентів системи з їх характеристиками та функціональним призначенням.

Ультразвуковий далекомір HC-SR04 – модуль, який конструктивно розрахований для визначення відстані до об'єктів у радіусі до двох метрів від нього. Цього параметру достатньо для реалізації проекту. Ще однією перевагою є його ціна – це дуже доступний датчик. Робота даного модуля заснована на принципі ультразвукової ехолокації. Далекімір HC-SR04 посилає

ультразвуковий сигнал (імпульс частотою 40 кГц) та приймає його відображення від об'єкта. Відстань до цілі визначається шляхом вимірювання часу між відправкою та отриманням імпульсу сигналу. Цей датчик забезпечує чудовий діапазон, точність, стабільність показань і кучність сигналу, поєднуючи це з зручною компоновкою на платі та малими габаритами. Вбудований штифтовий роз'єм із кроком 2,54 мм дозволяє підключати датчик до макетної плати для легкого створення прототипу. У проекті буде використано два HC-SR04: перший буде слугувати задля аналізу перешкод попереду людини (це може бути стіна, шафа, припаркований автомобіль), другий – для вчасного виявлення перешкод під ногами (бордюр, стілець, домашні тварини, велике каміння). Дане рішення зумовлено тим, що здорова людина бачить одразу центральним і периферійним зором, а отже аналізує картину попереду себе і на землі.

Цифровий датчик для безконтактного визначення жестів, наближення, RGB складових кольору та рівня освітленості навколишнього простору на чіпі APDS-9960 буде застосовано для розширення функціоналу приладу. Його використання дозволить сліпій людині використовувати прилад не тільки як далекомір, а і для визначення кольору об'єкту, що є немало важливо для людини, яка має не вроджену, а здобуту сліпоту. Окрім того, використання функції відстеження простих рухів угору-вниз, вправо-вліво, а також відстеження більш складних динамічних переміщень дасть змогу на перспективі розвитку функціоналу приладу.

Для звукового відображення небезпечної відстані і кольору слугуватимуть три активних п'єзодинаміка. Вибір п'єзодинаміків у якості звукових сигналізаторів зумовлений широким діапазоном частоти звука (до 2500 Гц), порівняно малими розмірами ($d = 12$ мм, $h = 9,6$ мм), високою інтенсивністю звукового сповіщення (75-85 дБ) та великим діапазоном робочих температур (від -20°C до $+70^{\circ}\text{C}$), що є важливим, оскільки експлуатація приладу передбачає його використання переважним чином на вулиці.

Кнопки керування. Кнопка перемикача слугуватиме для калібрування приладу просторової навігації на певну дистанцію. Резистор номінальним опором 1 кОм буде використано для прибирання шумів. Кнопка живлення необхідна для відключення апаратної частини приладу від батареї. Так як людина з вадами зору буде спиратися на тактильні відчуття, кнопки керування мають різну форму та розміри.

На конструктивній схемі розроблюваного приладу просторової навігації (рис. 1) детально представлено взаємозв'язок компонентів та архітектуру приладу згідно концепту прототипу.

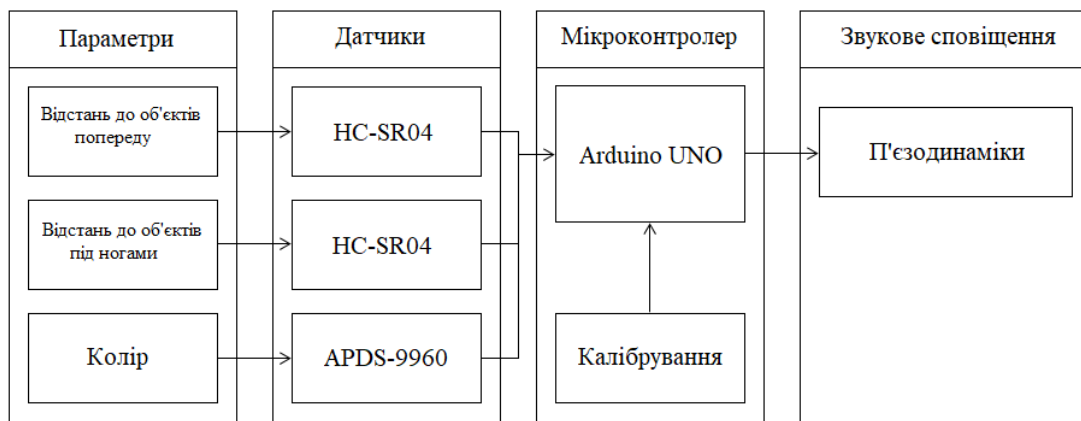


Рис. 1 – Конструктивна схема приладу просторової навігації для людей з обмеженими можливостями

Для створення та розробки принципової електричної схеми (рис. 2) підключення компонентів приладу для просторової навігації було використано середовище для роботи з 3D об'єктами та електронними схемами TinkerCAD [22]. Симуляція роботи системи проведена за допомогою функціональної схеми (рис. 3).

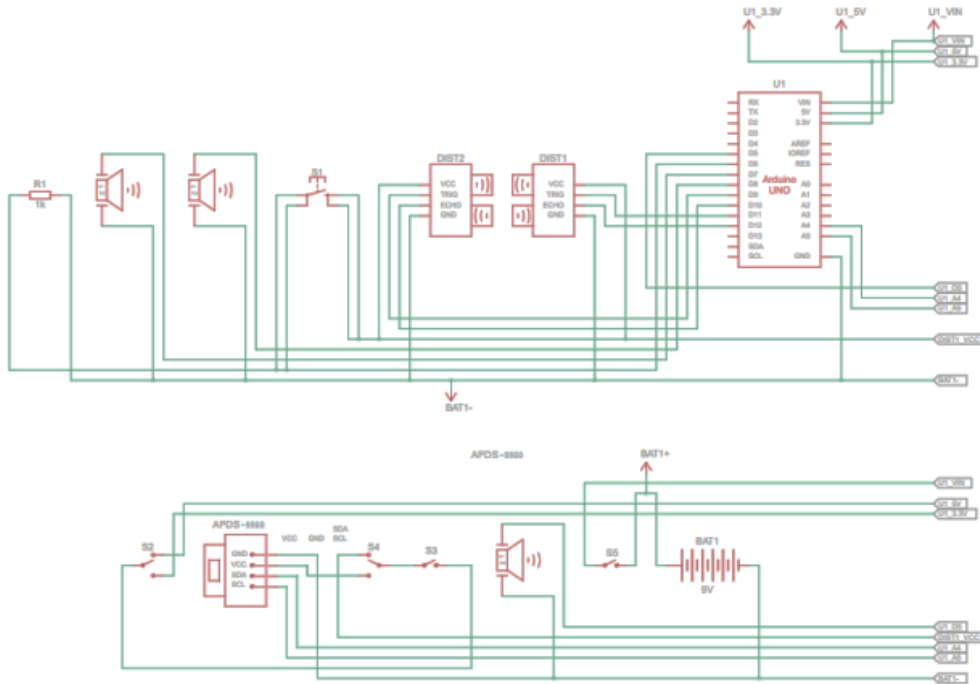


Рис. 2 – Принципова електрична схема підключення компонентів

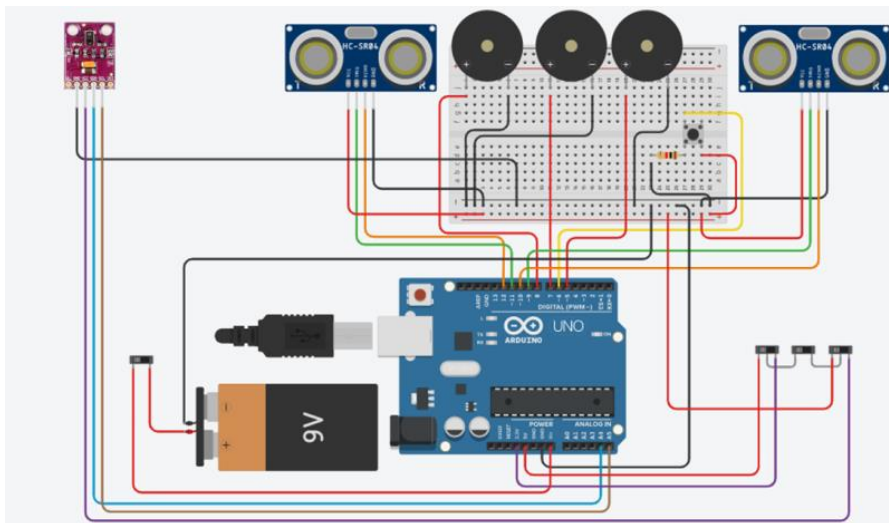


Рис. 3 – Функціональна схема підключення компонентів приладу просторової навігації

Ультразвукові далекоміри контактами TRIG та ECHO згідно специфікації підключено до цифрових портів апаратної платформи (9, 10, 11 та 12 порти відповідно). Датчик APDS-9960 з'єднано лініями зв'язку SDA і SCL з Arduino UNO, оскільки для передачі даних використовується протокол I2C. Живлення компонентів здійснено напругою в 5V за виключенням APDS-9960 – робоча напруга для нього складає 3,3V.

За допомогою середовища розробки Arduino IDE було реалізовано програмний код приладу. На блок-схемі (рис. 4) представлено алгоритм роботи одного циклу вимірювання відстаней та одного циклу визначення кольорів.

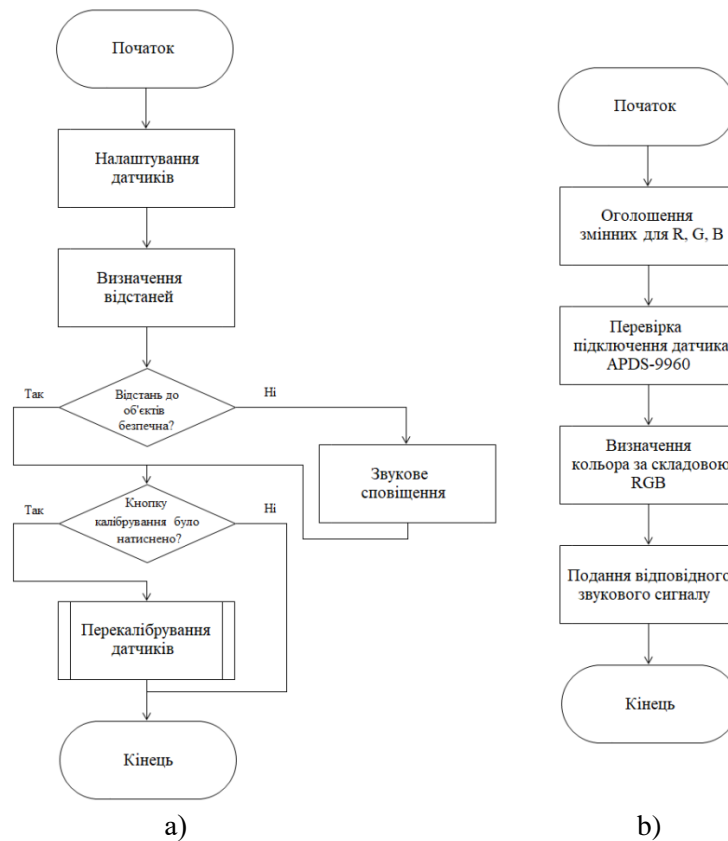


Рис. 4 – Блок-схема алгоритмів роботи: а – алгоритм вимірювання відстаней; б – алгоритм визначення кольору

Мовою програмування слугувала адаптована версія C++ для Arduino UNO, особливістю якої є швидке виконання. Програма завантажується через спеціальний порт апаратної платформи та працює наступним чином. При включенні живлення, датчики автоматично калібруються на відстані до найближчих об'єктів. Якщо значення первинних вимірів більші або дорівнюють 2 м, значення калібрування буде дорівнювати 2 м. Якщо відстань до об'єкта, до якого наблизиться людина, буде менша від каліброваного значення, спрацює звуковий сигнал відповідного ультразвукового датчика. Якщо значення на далекомірі DIST2 (рис. 2) буде більше від каліброваного ніж на 4 см, також спрацює сигнал. Це зроблено з метою визначення різного роду ям, через які людина може отримати травми. Також прилад можна перекалібрувати у процесі роботи, за необхідністю, кнопкою при її натисненні протягом 1 секунди на нове значення відстаней. Універсальний датчик APDS-9960 виконує згідно програми допоміжну функцію визначення кольору об'єкта, за перевагою одного з трьох кольорів – червоного, зеленого чи синього. Сигналізація про кольорову складову відбувається відповідним для неї звуковим сигналом. Для червоного кольору це повторення ноти «мі» (частота 330 Гц) 2 рази із запрограмованою затримкою 400 мсек. Для зеленого кольору це нота «ля» (частота 440 Гц) 3 рази із затримкою 250 мсек. Для синього кольору це нота «до» (частота 587 Гц) із затримкою 400 мсек. Під час отримання інформації стосовно кольору об'єкта датчик необхідно піднести безпосередньо до його поверхні. Перемикання між режимами роботи (вимірювання відстаней, визначення кольорів) здійснено кнопкою живлення.

Виходячи з розмірів електронних компонентів, було змодельовано у Fusion360 [23] та надруковано на FDM принтері корпус (він складається з відсіку для плати, ультразвукових датчиків, елементу живлення 9V) та кільце для кріплення APDS-9960. П'єзодинаміки змонтовано на самому корпусі. Готову модель приладу просторової навігації для людей з обмеженими можливостями показано на рисунку 5.

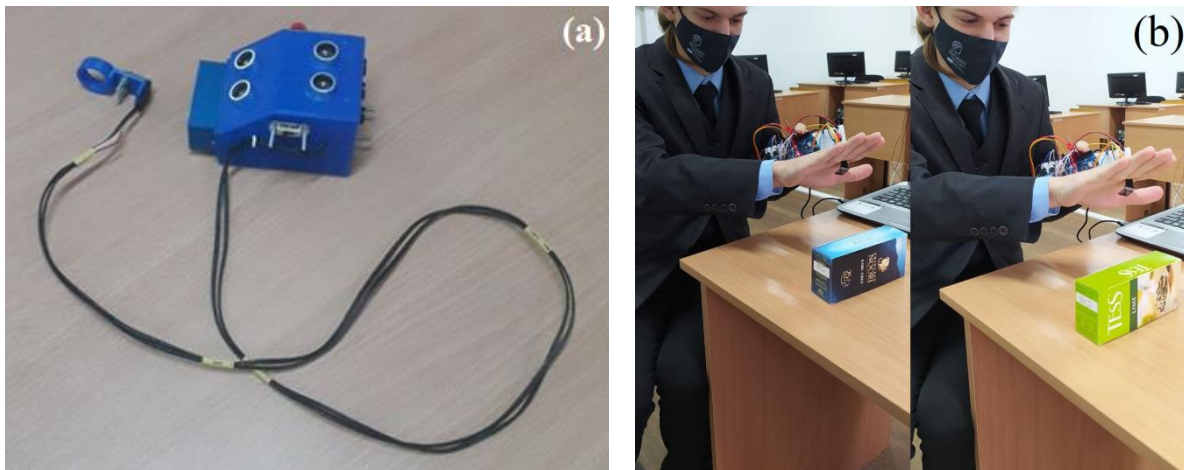


Рис. 5 – Готовий прототип приладу (а) просторової навігації для людей з обмеженими можливостями та тестування розпізнавання кольору (б) датчиком APDS-9960

Під час проведення тестування прилад мав високі показники точності. Відхилення при вимірюванні відстаней становили від 0,6 см до 1,7 см при кутності сигналу в 15° . У режимі визначення кольорів відхилень зафіксовано не було.

Висновки

Апаратна платформа Arduino UNO є потужним засобом обчислення, що знаходить широке застосування в приладобудуванні завдяки можливості підключення широкого асортименту датчиків. Завдяки своїм характеристиками, надійності та низькій ціні, апаратну платформу доцільно використовувати як центральний компонент допоміжних пристроїв для людей з інвалідністю, такою як сліпота. Проте незважаючи на переваги, основним недоліком Arduino UNO є відсутність модулів Wi-Fi та Bluetooth, що унеможливує пряме підключення розроблених пристроїв до IoT.

В даній роботі було проаналізовано ряд інформаційних та літературних джерел з метою виявлення основних конструктивних аспектів для майбутнього приладу просторової навігації. На основі проведеного аналізу останніх досліджень і публікацій розроблено готовий прототип, основними компонентами якого є пара ультразвукових датчиків HC-SR04 та апаратна платформа Arduino UNO на основі мікроконтролера ATmega328P-AU. Мовою для програмування послугувала адаптована для мікроконтролерів C++. Для розширення функціоналу приладу використано цифровий універсальний датчик APDS-9960, що робить можливим визначення кольору об'єктів. Для інформаційного зв'язку з користувачем встановлено три активних п'єзоелемента, кожен з яких відповідає за свій датчик та сигналізує про наявність перешкод чи колір об'єкта. Проведені тести з орієнтування та визначення кольорової складової речей підтверджують високу ефективність розробленого прототипу. Окрім функціональності, важливим аспектом є економічна доцільність, яка досягається завдяки використанню недорогих і надійних компонентів. Це робить прилад доступним за ціною для широкого кола користувачів.

Перелік використаних джерел:

1. Vision impairment and blindness. World Health Organization (WHO). URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment> (дата звернення: 10.08.2024).
2. Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis / R. R. A. Bourne et al. *The Lancet Global Health*. 2017. Vol. 5. Iss. 9. Pp. e888-e897. DOI: [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(17\)30293-0](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(17)30293-0).

3. Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study / R. Bourne et al. *The Lancet Global Health*. 2020. Vol. 9. Iss. 2. Pp. e130-e143. DOI: [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(20\)30425-3](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(20)30425-3).
4. Understanding Challenges and Opportunities in Body Movement Education of People who are Blind or have Low Vision / M. De Silva et al. *ASSETS '23 : Proceedings of the 25th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility*, New York, USA, 22-25 October 2023. Pp. 1-19. DOI: <https://doi.org/10.1145/3597638.3608409>.
5. Visual challenges in the everyday lives of blind people / E. Brady et al. *CHI'13: Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Paris, France, 27 April - 2 May 2013. Pp. 2117-2126. DOI: <https://doi.org/10.1145/2470654.2481291>.
6. Кількість людей з порушенням зору в Україні зростає: як ініціативи UNDP сприяють якісній реабілітації. UNDP. URL: https://www.undp.org/uk/ukraine/news/kilkist-lyudey-z-porushennyam-zoru-v-ukrayini-zrostaye-yak-initsiatyvy-undp-spryyayut-yakisniy-reabilitationi?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 25.06.2024).
7. Mixture reality-based assistive system for visually impaired people / J. Song et al. *Displays*. 2023. Vol. 78. Article 102449. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.displa.2023.102449>.
8. Towards assisting visually impaired individuals: A review on current status and future prospects / M. Mashiata et al. *Biosensors and Bioelectronics: X*. 2022. Vol. 12. Article 100265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosx.2022.100265>.
9. Detect and Approach: Close-Range Navigation Support for People with Blindness and Low Vision / Y. Hao et al. *Computer Vision – ECCV 2022 Workshops. Lecture Notes in Computer Science*. 2023. Vol. 13806. Pp. 607-622. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-25075-0_41.
10. Roy M., Shah P. Internet of Things (IoT) Enabled Smart Navigation Aid for Visually Impaired. *Advanced Information Networking and Applications*. 2022. Pp. 232-244. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-99619-2_23.
11. Commute Booster: A Mobile Application for First/Last Mile and Middle Mile Navigation Support for People with Blindness and Low Vision / J. Feng et al. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*. 2023. Vol. 11. Pp. 523-535. DOI: <https://doi.org/10.1109/jtehm.2023.3293450>.
12. Floor Plan Based Active Global Localization and Navigation Aid for Persons with Blindness and Low Vision / R. G. Goswami et al. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2024. Vol. 9, Iss. 12. Pp. 11058-11065. DOI: <https://doi.org/10.1109/lra.2024.3486208>.
13. UNav: An Infrastructure-Independent Vision-Based Navigation System for People with Blindness and Low Vision / A. Yang et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22. Iss. 22. Article 8894. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228894>.
14. Use of ToF sensors to develop Assistive Technology for visually impaired people / A. A. Ferreira et al. *ENSUS 2024 - XII Encontro de Sustentabilidade em Projeto*. 2024. Pp. 1004-1011. DOI: <https://doi.org/10.29183/2596-237x.ensus2024.v12.n1.p1004-1011>.
15. IoT-Driven Accessibility: A Refreshable OCR-Braille Solution for Visually Impaired and Deaf-Blind Users through WSN / K. K. Reddy et al. *Journal of Economy and Technology*. 2024. Vol. 2. Pp. 128-137. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ject.2024.04.007>.
16. Real-Time Object Detection and Face Recognition Application for the Visually Impaired / K. Sanjar et al. *Computers, Materials & Continua*. 2024. Vol. 79(3). Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2024.048312>.
17. Sivan Sh., Darsan G. Computer Vision based Assistive Technology for Blind and Visually Impaired People. *ICCCNT'16: Proceedings of the 7th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies*, Dallas TX, USA, 6-8 July 2016. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1145/2967878.2967923>.
18. Mohammed Fayiz Ferosh. Assistive Technology for Navigation of Visually Impaired People. *Journal of Electrical Systems*. 2024. Vol. 20. Iss. 7s. Pp. 989-996. DOI: <https://doi.org/10.52783/jes.3479>.
19. Kiruthika Devi S., Subalalitha C. Deep Learning Based Audio Assistive System for Visually Impaired People. *Computers, Materials & Continua*. 2021. Vol. 71. Iss. 1. Pp. 1205-1219. DOI: <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.020827>.

20. Сілі І. І., Азархов О. Ю., Єфременко Б. В. Тензосенсорна рукавиця для людей з порушенням мовлення. *Наука та виробництво*. 2023. Вип. 25. Рр. 159-167. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990252023286737>.
21. Євсеєнко О. Синтез системи виміру параметрів повітря у приміщеннях торговельного центру. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. 2022. Вип. 1(7). С. 28-34. DOI: <https://doi.org/10.20998/2079-0023.2022.01.05>.
22. Tinkercad: From mind to design in minutes. Tinkercad. URL: <https://www.tinkercad.com/> (дата звернення: 10.08.2024).
23. Autodesk Fusion: More than CAD, it's the future of design and manufacturing. URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview> (дата звернення: 12.08.2024).

References:

1. Vision impairment and blindness. World Health Organization (WHO). [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>. Accessed on: August 10, 2024.
2. R.R.A. Bourne et al., «Magnitude, temporal trends, and projections of the global prevalence of blindness and distance and near vision impairment: a systematic review and meta-analysis», *The Lancet Global Health*, vol. 5, iss. 9, pp. e888-e897, 2017. doi: **10.1016/s2214-109x(17)30293-0**.
3. R. Bourne et al., «Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study», *The Lancet Global Health*, vol. 9, iss. 2, pp. e130-e143, 2020. doi: **10.1016/s2214-109x(20)30425-3**.
4. M. De Silva, S. Goodwin, L. Holloway, and M. Butler, «Understanding Challenges and Opportunities in Body Movement Education of People who are Blind or have Low Vision», in Proc. 25th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility, New York, USA, 2023, pp. 1-19. doi: **10.1145/3597638.3608409**.
5. E. Brady, M. Ringel Morris, Yu Zhong, S. White, and J.P. Bigham, «Visual challenges in the everyday lives of blind people», in Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paris, France, pp. 2117-2126, 2013. doi: **10.1145/2470654.2481291**.
6. Кількість людей з порушенням зору в Україні зростає: як ініціативи UNDP сприяють якісній реабілітації. UNDP. [Online]. Available: https://www.undp.org/uk/ukraine/news/kilkist-lyudey-z-porushennyam-zoru-v-ukrayini-zrostaye-yak-initsiatyvy-undp-spryyayut-yakisniy-reabilitatsiyi?utm_source=chatgpt.com. Accessed on: June 06, 2024.
7. J. Song et al., «Mixture reality-based assistive system for visually impaired people», *Displays*, vol. 78, article 102449, 2023. doi: **10.1016/j.displa.2023.102449**.
8. M. Mashiata et al., «Towards assisting visually impaired individuals: A review on current status and future prospects», *Biosensors and Bioelectronics: X*, vol. 12, article 100265, 2022. doi: **10.1016/j.biosx.2022.100265**.
9. Y. Hao, J. Feng, J.-R. Rizzo, Y. Wang, and Yi Fang, «Detect and Approach: Close-Range Navigation Support for People with Blindness and Low Vision», *Computer Vision – ECCV 2022 Workshops. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 13806, pp. 607-622, 2023. doi: **10.1007/978-3-031-25075-0_41**.
10. M. Roy, and P. Shah, «Internet of Things (IoT) Enabled Smart Navigation Aid for Visually Impaired», *Advanced Information Networking and Applications*, pp. 232-244, 2022. doi: **10.1007/978-3-030-99619-2_23**.
11. J. Feng, M. Beheshti, M. Philipson, Y. Ramsaywack, M. Porfiri, J.-R. Rizzo, «Commute Booster: A Mobile Application for First/Last Mile and Middle Mile Navigation Support for People with Blindness and Low Vision», *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, vol. 11, pp. 523-535, 2023. doi: **10.1109/jtehm.2023.3293450**.
12. R.G. Goswami et al., «Floor Plan Based Active Global Localization and Navigation Aid for Persons with Blindness and Low Vision», *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, iss. 12, pp. 11058-11065, 2024. doi: **10.1109/lra.2024.3486208**.

13. A. Yang et al., «UNav: An Infrastructure-Independent Vision-Based Navigation System for People with Blindness and Low Vision», *Sensors*, vol. 22, iss. 22, article 8894, 2022. doi: **10.3390/s22228894**.
14. A.A. Ferreira et al., «Use of ToF sensors to develop Assistive Technology for visually impaired people», *ENSUS 2024 – XII Encontro de Sustentabilidade em Projeto*, pp. 1004-1011, 2024. doi: **10.29183/2596-237x.ensus2024.v12.n1.p1004-1011**.
15. K.K. Reddy, R. Badam, S. Alam, and M. Shuaib, «IoT-Driven Accessibility: A Refreshable OCR-Braille Solution for Visually Impaired and Deaf-Blind Users through WSN», *Journal of Economy and Technology*, vol. 2, pp. 128-137, 2024. doi: **10.1016/j.ject.2024.04.007**.
16. K. Sanjar, S. Bang, S. Ryue, and H. Jung, «Real-Time Object Detection and Face Recognition Application for the Visually Impaired», *Computers, Materials & Continua*, vol. 79(3), pp. 1-10, 2024. doi: **10.32604/cmc.2024.048312**.
17. Sh. Sivan, and G. Darsan, «Computer Vision based Assistive Technology for Blind and Visually Impaired People», in Proc. 7th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies, Dallas TX, USA, 2016, pp. 1-8. doi: **10.1145/2967878.2967923**.
18. M. Fayiz Ferosh, «Assistive Technology for Navigation of Visually Impaired People», *Journal of Electrical Systems*, vol. 20, iss. 7s, pp. 989-996, 2024. doi: **10.52783/jes.3479**.
19. S. Kiruthika Devi, and C. Subalalitha, «Deep Learning Based Audio Assistive System for Visually Impaired People», *Computers, Materials & Continua*, vol. 71, iss. 1, pp. 1205-1219, 2021. doi: **10.32604/cmc.2022.020827**.
20. I.I. Sili, O.Yu. Azarkhov, and B.V. Yefremenko, «Tenzosensorna rukavitsia dlia liudei z porusheniam movlennia» [«Tensosensory glove for the speech impaired people»], *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, vol. 25, pp. 159-167, 2023. doi: **10.31498/2522-9990252023286737**. (Ukr.)
21. O. Yevseienko, «Syntez systemy vymiru parametriv povitria u prymishchenniakh torhovelnoho tsentru» [«Shopping mall air parameters measurement system synthesis»], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriya: Systemnyi analiz, upravlinnia ta informatsiini tekhnolohii – Bulletin of National Technical University «KhPI». Series: System Analysis, Control and Information Technologies*, vol. 1(7), pp. 28-34, 2022. doi: **10.20998/2079-0023.2022.01.05**. (Ukr.)
22. Tinkercad: From mind to design in minutes. Tinkercad. [Online]. Available: <https://www.tinkercad.com/>. Accessed on: August 10, 2024.
23. Autodesk Fusion: More than CAD, it's the future of design and manufacturing. [Online]. Available: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview>. Accessed on: August 12, 2024.

Стаття надійшла 14.09.2024

Стаття прийнята 01.10.2024

UDC 004.93:616.12:618.3

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321353

© Franchevska H.¹, Yavorska E.²

MATHEMATICAL MODELING OF THE FETAL ELECTROCARDIOSIGNAL FOR THE DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR RELIABLE EXTRACTION IN COMPUTER CARDIODIAGNOSTIC SYSTEMS

Fetal electrocardiogram (FECG) signal extraction is a critical component of modern perinatal care, enabling continuous, non-invasive monitoring of fetal health. This approach is

¹ postgraduate student, Ternopil National Ivan Puluj Technical University, Ternopil, ORCID: 0009-0001-8702-2821, franchevska.halynaa@gmail.com

² PhD, associate professor, Ternopil National Ivan Puluj Technical University, Ternopil, ORCID: 0000-0001-6341-1710, yavorska_eb@yahoo.com

essential for the early detection of complications such as fetal hypoxia, arrhythmias, and other potentially life-threatening conditions. Traditional methods of fetal monitoring, including Doppler and intermittent auscultation, often do not provide the resolution and continuity required for timely intervention, especially in resource-limited settings where access to advanced technology is limited. To address these challenges, this study presents an innovative algorithm to extract FECS signals with improved accuracy and reliability. The algorithm uses a structured sequence of processing steps, including noise filtering, R-peak detection, and advanced filtering techniques to isolate fetal ECS from maternal signals and environmental noise. High-pass and low-pass filters and normalization ensure signal clarity and consistency in various conditions. Adaptive filtering dynamically adjusts to fluctuations in noise levels, increasing stability while preserving critical waveform characteristics such as the P-wave, QRS complex, and T-wave. These improvements are key to accurately assessing fetal heart rate and variability, enabling healthcare providers to detect early signs of fetal distress. Quantitative analysis demonstrates significant improvements in signal-to-noise ratio (SNR), supporting reliable and accurate diagnosis. The continuous, real-time monitoring capabilities align with the World Health Organisation's goal of reducing perinatal mortality to less than 12 per 1,000 births by 2030. In addition, its scalability and cost-effectiveness make it a promising solution for addressing disparities in antenatal care, especially in low- and middle-income countries. This study highlights the transformative potential of fetal echocardiography to improve maternal and fetal health globally, increase diagnostic accuracy, and promote health equity through innovative, affordable technology.

Keywords: fetal cardio diagnostic systems, fetal ECG signal, maternal ECG signals, method and algorithm for detecting, normalizing, band-pass filter, adaptive filter, low-pass filter, high-pass filter, MATLAB.

Франчевська Г., Яворська Є. Математичне моделювання електрокардіосигналу плода для розробки програмного забезпечення для його достовірного виділення в комп'ютерних кардіодіагностичних системах. Виділення сигналів електрокардіограми плода (фЕКС) є критично важливим компонентом сучасної перинатальної допомоги, що дозволяє здійснювати безперервний, неінвазивний моніторинг здоров'я плода. Такий підхід має важливе значення для раннього виявлення ускладнень, таких як гіпоксія плода, аритмії та інші потенційно небезпечні для життя стани. Традиційні методи моніторингу стану плода, включаючи доплерометрію та переривчасту аускультацию, часто не забезпечують достатньої роздільної здатності та безперервності, необхідних для своєчасного втручання, особливо в умовах обмежених ресурсів, де доступ до передових технологій є обмеженим. Для вирішення цих проблем у цьому дослідженні представлено інноваційний алгоритм для вилучення сигналів фЕКС з підвищеною точністю та надійністю. Алгоритм використовує структуровану послідовність кроків обробки, включаючи фільтрацію шуму, виявлення R-піків та вдосконалені методи фільтрації для ізоляції ЕКС плода від сигналів матері та шуму навколишнього середовища. Високочастотні та низькочастотні фільтри в поєднанні з нормалізацією забезпечують чіткість та узгодженість сигналу в різних умовах. Адаптивна фільтрація динамічно підлаштовується до коливань рівня шуму, підвищуючи стабільність, зберігаючи при цьому критичні характеристики форми хвилі, такі як зубець Р, комплекс QRS і зубець Т. Ці покращення є ключовими для точної оцінки частоти та варіабельності серцебиття плода, що дозволяє медичним працівникам виявляти ранні ознаки дистресу плода. Кількісний аналіз демонструє значне покращення співвідношення сигнал/шум (SNR), що підтримує надійну і точну діагностику. Можливості безперервного моніторингу в режимі реального часу відповідають меті Всесвітньої організації охорони здоров'я щодо зниження перинатальної смертності до менш ніж 12 на 1000 пологів до 2030 року. Крім того, його масштабованість та економічна ефективність роблять його перспективним рішенням для усунення диспропорцій у сфері пренатальної допомоги, особливо в

країнах з низьким та середнім рівнем доходу. Це дослідження висвітлює трансформаційний потенціал вилучення фетального ехографа для покращення здоров'я матері та плоду в усьому світі, підвищення точності діагностики та сприяння рівності у сфері охорони здоров'я за допомогою інноваційних, доступних технологій.

Ключові слова: системи кардіодіагностики плода, сигнал ЕКГ плода, сигнали ЕКГ матері, метод та алгоритм виявлення, нормалізація, смуговий фільтр, адаптивний фільтр, фільтр низьких частот, фільтр високих частот, MATLAB.

Description of the problem. Fetal electrocardiogram (FECG) signal extraction is an important component of perinatal care, widely recognized for its ability to support early detection and continuous monitoring of fetal health. According to the World Health Organization (WHO), approximately 2.6 million stillbirths occur worldwide each year [1]. Many of these tragic outcomes can be prevented through timely and accurate fetal monitoring, which allows for early detection of conditions such as fetal hypoxia, arrhythmias, and other life-threatening complications. Effective monitoring is crucial during high-risk pregnancies and plays a key role in reducing the global stillbirth rate [2, 3]. The non-invasive, modern nature of FET extraction meets these goals by offering a technologically advanced solution for continuous fetal health assessment.

In today's world, efficient processing of large amounts of information is essential in various fields, including healthcare.

Traditional approaches to fetal monitoring, such as Doppler ultrasound, are limited in providing continuous, high-resolution data. With advances in technology, fetal electrocardiogram extraction has become a noninvasive, scalable solution that not only improves the quality of monitoring but also supports the WHO's goals of ensuring equity in maternal and child health. By offering continuous, real-time fetal well-being data, fetal electrocardiogram extraction provides critical information to detect subtle signs of fetal distress.

This research is significant because it can improve prenatal care by reducing the number of stillbirths, improving diagnostic accuracy, and making advanced monitoring technologies more widely available.

Its practical applications include significant improvements in maternal and fetal health outcomes, cost savings, and the potential to eliminate perinatal mortality in health care.

Despite advances in prenatal medicine, traditional fetal monitoring methods have significant limitations, including the inability to provide continuous, high-resolution data and the difficulty of detecting subtle cardiac anomalies. These limitations are particularly pronounced in resource-limited settings where state-of-the-art monitoring systems are not readily available. The challenge is to develop scalable, cost-effective FECG technologies that can overcome these barriers while ensuring equal access to advanced prenatal care.

Analysis of the latest research and publications. Recent studies have highlighted the profound implications of limited access to quality fetal monitoring in low- and middle-income countries, where health systems may lack the resources and advanced technology required for continuous fetal monitoring [4]. Traditional approaches, such as intermittent auscultation and fetal heart rate (FHR) monitoring using Doppler, provide only periodic assessments and lack the continuity needed to detect subtle, critical signs of fetal distress. This limitation can delay medical intervention in the event of adverse events that could have been prevented with continuous real-time monitoring. In contrast, extracting ECGs from abdominal records provides a continuous understanding of fetal cardiac function, allowing for rapid response to any abnormalities, supporting the WHO's mission to reduce the stillbirth rate to less than 12 per 1,000 births by 2030 [5].

The advantages of extracting the ECS for fetal monitoring are significant and can be viewed from three main perspectives:

- Non-invasive, continuous monitoring: Unlike traditional monitoring methods, ECS extraction uses non-invasive abdominal sensors, shown in Figure 1, that continuously capture fetal ECS signals, minimizing risks to both mother and fetus. This real-time data is particularly important during labor, as it allows healthcare providers to immediately recognize signs of fetal distress, such as abnormal heart rhythms or reduced heart rate variability (HRV), which are early indicators of hypoxia or cord problems.

Studies have shown that continuous monitoring is associated with improved perinatal outcomes, as it allows for early intervention [1].

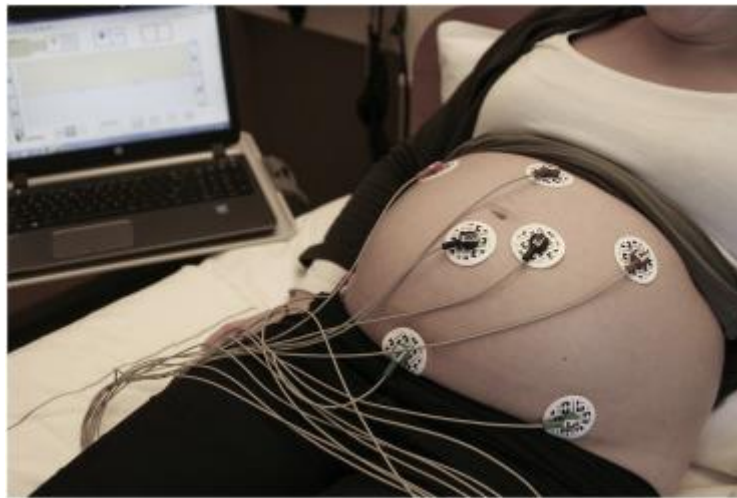


Fig. 1 – Example of electrode positioning

- Improved detection of subtle cardiac anomalies: ECS extraction offers more accurate measurements of fetal cardiac health than standard methods. By continuously assessing key cardiac characteristics such as QRS complexes, fetal heart rate (FHR), and HRV, patterns can be detected that indicate major complications. Among them, HRV is particularly important, as it gives an idea of how the autonomic nervous system regulates the fetal heart, serving as a sensitive indicator of fetal health. Continuous high-resolution monitoring is especially useful in high-risk pregnancies when a quick response to fetal distress is essential [6, 7].

- Promoting the WHO Goals for Equity in Maternal and Child Health: WHO advocates for universal access to high-quality prenatal care. However, inequalities in monitoring capacity remain, especially in low- and middle-income countries. The development of cost-effective, non-invasive FETS systems integrated into standard antenatal care practices can bridge these gaps by offering equal access to advanced monitoring technologies. By supporting continuous and accurate assessment of fetal health, FETS extraction directly contributes to reducing the number of preventable stillbirths and neonatal complications, thus contributing to the WHO's goals of achieving health equity worldwide [5].

Modern methods used to identify fetal ECS include both traditional approaches and the latest innovations.

Classical methods: often based on the use of fetal monitoring and electrocardiographic technologies. Although they are well established, their sensitivity can be significantly reduced due to the presence of artifacts.

Adaptive algorithms: Recent work has introduced new adaptive algorithms that use mathematics to improve signal extraction with additional noise. They allow to automatically adjust signal processing parameters to each specific situation, which is extremely important in clinical practice, where differences can be significant.

The use of artificial intelligence (AI) in fetal ECS extraction has become a significant step forward. AI technologies can analyze large amounts of data, applying machine learning to improve diagnostic accuracy.

Studies using deep neural networks have demonstrated a significant increase in sensitivity in detecting severe cases of EBV. For example, systems trained to recognize patterns in fetal electrocardiograms can achieve a sensitivity of up to 90% combined with high specificity [8].

Algorithms can automate the process of detecting abnormalities, allowing doctors to focus on treatment rather than the analysis process. This is important in cases where time is of the essence, such as when serious birth defects are suspected.

Recent studies further emphasize both the obstacles and progress in reducing the stillbirth rate. A 2023 study analyzing facility-based stillbirths found that the introduction of early detection systems can

significantly reduce adverse outcomes [7]. In addition, a study by the Collaborative Group for Stillbirths confirms that continuous and accurate fetal monitoring is vital to preventing stillbirths associated with conditions such as preterm birth complications or fetal growth retardation [2]. As the WHO continues to advocate for more advanced prenatal monitoring technologies, non-invasive fetal electrocardiogram extraction is emerging as a highly effective solution. Research shows how the integration of hybrid algorithms combining adaptive filtering with state-of-the-art machine learning improves the quality of fetal heart rate estimation, even in environments prone to strong interference from maternal movements. Moreover, studies of multimodal datasets show that the inclusion of various physiological recordings, including Doppler ultrasound data, provides a complete picture of fetal health, thereby improving clinical applications and training.

By providing an accurate assessment of fetal health in real-time, fetal echocardiography is closely aligned with the WHO's goals of reducing perinatal mortality and promoting health equity. If adapted to resource-limited settings where high-quality monitoring is less readily available, this technology can be transformative in addressing current maternal and fetal health challenges around the world.

Future advances are expected to focus on real-time processing capabilities and the introduction of new signal processing techniques, such as wavelet transforms, to improve extraction methodologies further and increase diagnostic accuracy [8, 9]. An additional promising area is the validation of non-invasive methods using publicly available datasets, such as the Noninvasive Fetal ECS Arrhythmia Database (NIFEA DB), which plays a key role in the comparative analysis of algorithms for comparative evaluation [6].

The article focuses on creating a mathematical model and an innovative algorithm for the reliable extraction of fetal electrocardiogram (FECG) signals. This will improve diagnostic accuracy and allow continuous, non-invasive fetal monitoring, especially in resource-limited settings. **The goal is** to enhance the early detection of fetal distress and other complications, thereby contributing to global efforts to reduce perinatal mortality and promote equitable access to advanced prenatal care.

Summary of the main material. The additive-multiplicative model is the most appropriate approach when there is a significant interaction between signals - for example, when fetal heart signals modulate maternal signals, or vice versa [10]. This model reflects the complex physiological processes occurring in the mother-fetus system, taking into account both the independent components of the signals and their interaction, which allows for a more accurate separation of the signals [11].

Let $s_{obs}(t)$ be the observed maternal ECS, $s_f(t)$ the fetal ECS, $n(t)$, and the noise component. Thus, the observed signal $s_{obs}(t)$, recorded by the fetal electrodes is modeled as [12]:

$$s_{obs}(t) = A_m s_m(t) + A_f s_f(t) + B_m s_m(t) s_f(t) + n(t), \quad (1)$$

where:

- A_m – scaling factors representing the relative strength of the maternal and fetal signals. Because the mother's heart is usually closer to the electrodes, A_m is usually larger than A_f , reflecting the greater amplitude of the maternal ECS;
- B_m models the multiplicative interaction between the maternal and fetal signals, representing the nonlinear coupling between the two cardiovascular systems due to their physiological proximity or recording artifacts;
- $n(t)$ represents the noise component, which may include electrical interference, muscle artifacts, or random disturbances.

The additive terms $A_m s_m(t)$ and $A_f s_f(t)$ account for the independent contributions of the maternal and fetal signals to the observed signal, while the multiplicative term $B_m s_m(t) s_f(t)$ introduces the nonlinear interaction between these signals, making it difficult to separate them.

The electrocardiograms of both the mother and the fetus are quasi-periodic, i.e., they consist of repeating cycles with little variability. This quasi-periodicity allows each signal to be represented as a sum of sinusoidal components through a Fourier series expansion. For example, the mother $s_m(t)$ can be expressed as [28]:

$$s_m(t) = \sum_{k=1}^K A_k \cos(\omega_k t + \phi_k), \quad (2)$$

where:

- A_k is the amplitude of the k th harmonic;
- $\omega_k = 2\pi f_k$ is the angular frequency of the k th harmonic, where f_k is the corresponding frequency;

- ϕ_k is the phase shift of the k -th harmonic.

Similarly, the fetal ECS $s_f(t)$ can be represented as:

$$s_f(t) = \sum_{l=1}^L B_l \cos(\omega_l t + \psi_l), \quad (3)$$

where B_l , $\omega_l = 2\pi f_l$, and ψ_l are the amplitude, angular frequency, and phase shift of the l th harmonic, respectively.

The noise component $n(t)$ is usually modeled as a Gaussian process with zero mean and variance σ_n^2 :

$$n(t) \sim N(0, \sigma_n^2), \quad (4)$$

Thus, the total observed signal in the time domain consists of additive and multiplicative terms, as well as noise.

The additive-multiplicative time-domain representation of the model emphasizes how the mother and fetal signals interact to produce the observed signal. The multiplicative term $B_m S_m(t) s_f(t)$ is particularly important because it introduces a cross-frequency interaction between the mother and fetal harmonics.

To understand this effect, we can expand the product $s_m(t)s_f(t)$, by plugging in the Fourier series for both signals and applying trigonometric identities for products of cosines. This expansion gives:

$$s_m(t)s_f(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \frac{A_k B_l}{2} \cos((\omega_k + \omega_c)t + (\phi_k + \psi_l)) + \cos((\omega_k - \omega_c)t + (\phi_k - \psi_l)), \quad (5)$$

This extension shows that the multiplicative interaction introduces new frequency components at $\omega_k + \omega_c$ and $\omega_k - \omega_c$. These additional frequencies create inter-frequency interactions that complicate the spectral structure of the observed signal, making it difficult to separate the maternal and fetal electrocardiograms using simple filtering techniques because their frequency components now overlap.

The complex spectral structure of the observed signal requires advanced filtering techniques to effectively separate fetal ECS. Traditional linear filters, such as simple bandpass filters, are inadequate due to the overlap of maternal and fetal frequencies. Therefore, more sophisticated methods such as Wiener filtering and wavelet filtering are used.

The Wiener filter is an optimal linear filter designed to minimize the mean square error (MSE) between the estimated and actual signal, which in this case is the fetal ECS. The transfer function of the Wiener filter in the frequency domain is as follows:

$$H_f(\omega) = \frac{P_{s_f}(\omega)}{P_{s_f}(\omega) + A_m^2 P_{s_m}(\omega) + B_m^2 (P_{s_m}(\omega) \cdot P_{s_f}(\omega)) + P_N(\omega)}, \quad (6)$$

where:

- $P_{s_f}(\omega)$ and $P_{s_m}(\omega)$ are the spectral power density of the fetal and maternal ECS, respectively;
- $B_m^2 (P_{s_m}(\omega) \cdot P_{s_f}(\omega))$ is the PSD of the multiplicative interaction;
- $P_N(\omega)$ is the PSD of the noise.

By balancing these components, the Wiener filter suppresses the maternal ECS and noise, while enhancing the fetal ECS.

Due to the non-stationary nature of the signals, a time-frequency representation such as the continuous wavelet transform (CWT) may be even more suitable. CWT decomposes the signal into time-frequency components, which allows for separation based on different time-frequency characteristics of maternal and fetal ECS.

In addition to filtering, statistical methods such as independent component analysis (ICA) are valuable for separating maternal and fetal ECS. ICA assumes that the observed signals are linear mixtures of independent sources and attempts to separate them based on statistical independence.

Let $s_{obs}(t)$ represent the vector of observed signals from multiple electrodes, and $s(t) = [s_m(t), s_f(t)]^T$ be the vector of output signals. The observed signals can be expressed as:

$$s_{obs}(t) = As(t) + n(t), \quad (7)$$

where A is the mixing matrix and $n(t)$ is the noise vector. ICA calculates the mixing matrix W to separate the maternal signal from the fetal signal:

$$\hat{s}(t) = Ws_{obs}(t), \quad (8)$$

where $\hat{s}(t)$ is the estimated source vector that approximates the true signals $s(t)$. The ICA iteratively updates W to maximize statistical independence between the separated signals, effectively isolating the fetal ECS.

The negentropy $J(\omega)$ is a key metric in independent component analysis (ICA), quantifying the deviation of a random variable from Gaussianity. This measure is particularly useful for separating inherently non-Gaussian signals, such as fetal and maternal electrocardiograms. Since independent sources are typically less Gaussian than their mixtures, maximizing non-Gaussianity allows ICA algorithms to effectively separate these sources in complex signal environments, such as abdominal ECG recordings.

In the context of ICA, negentropy is used as a cost function to optimize the mixing matrix ω . This matrix, when applied to the observed signals, helps to isolate individual source signals by maximizing their statistical independence. The negentropy-based cost function can be expressed as:

$$J(\omega) = |E[G(\omega^T s_{obs})] - E[c(z)]|, \quad (9)$$

where:

- $G(\cdot)$ – is a contrast function that quantifies non-Gaussianity; the most common choice is $G(u) = u^4$, which emphasizes the peakiness of non-Gaussian signals;
- z is a Gaussian random variable with the same variance as the observed signal;
- E denotes the expected value operator that captures the average impact of $G(\cdot)$ on the distribution of the observed signal.

Using this value function, ICA iteratively updates the mixing matrix ω to maximize the negentropy, thereby increasing the statistical independence of the extracted components. In practice, this process helps the algorithm distinguish between maternal and fetal signals that have different non-Gaussian characteristics. By separating these signals based on their unique statistical properties, rather than relying solely on frequency or amplitude, ICA can more accurately isolate fetal ECS, even when the signals overlap in the time or frequency domain.

Maximizing negentropy is particularly beneficial in fetal ECS isolation, where the maternal signal is typically stronger and has a different statistical distribution than the fetal signal. By utilizing negentropy, ICA provides a more efficient approach to signal separation than traditional filtering methods, which often try to differentiate between signals with overlapping spectral content. Thus, this approach significantly increases the reliability of fetal ECS extraction, improving the diagnostic accuracy in maternal-fetal monitoring systems.

The proposed algorithm for fetal ECG extraction illustrated in Fig. 2.

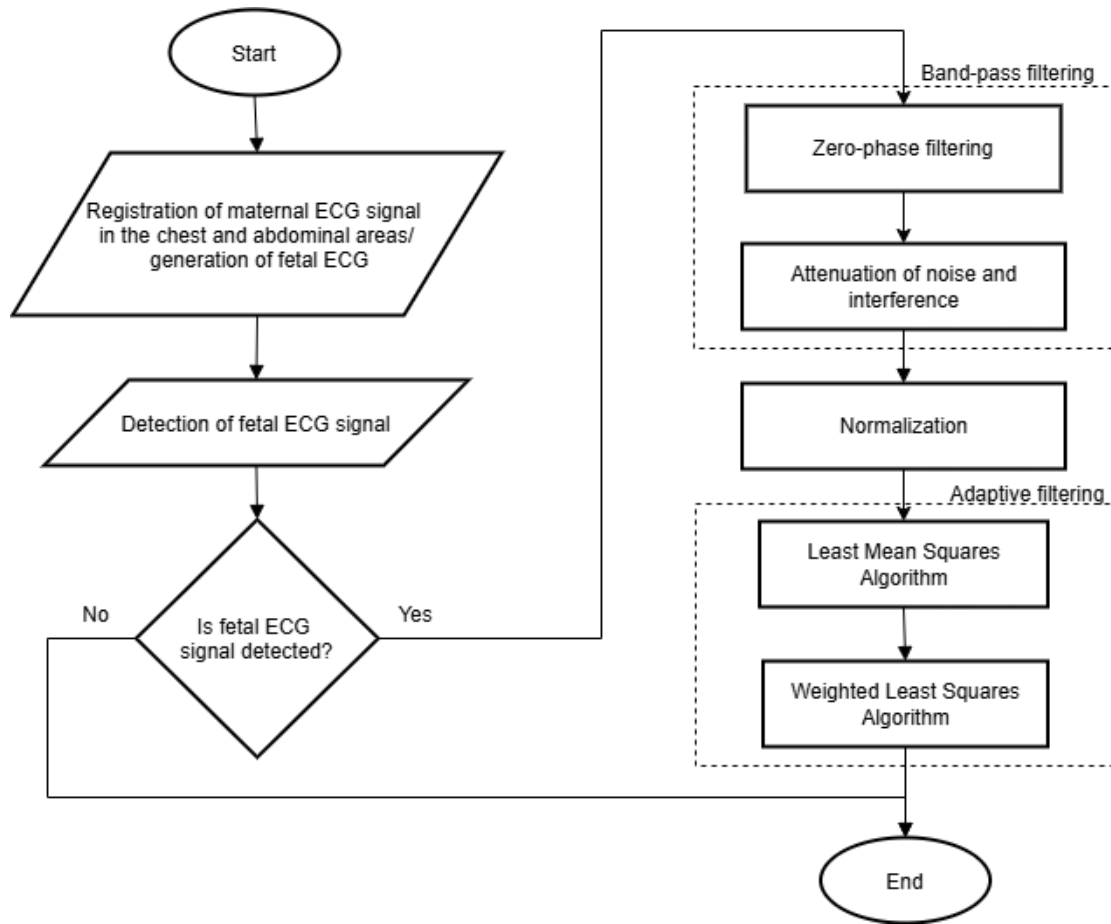


Fig. 2 – Algorithm for extracting fetal ECG signal

The first step in the proposed fetal ECS extraction algorithm, shown in Figure 1, involves recording the mother's electrocardiograms from both the chest and abdominal regions. Non-invasive electrodes are carefully placed on the mother's chest and abdomen to record these signals. After recording, the signals are filtered to remove high-frequency noise caused by electrical sources, muscle movements, and other environmental factors. After noise reduction, the signals are amplified to improve the signal-to-noise ratio, resulting in a clearer electrocardiogram. This amplified signal is then processed to detect the R-peaks in the ECS waveform that correspond to each heartbeat. A peak detection algorithm is used to accurately identify these R-peaks, providing clear markers to distinguish the maternal ECS signal, which will help separate fetal components in subsequent stages [13].

The second step of the algorithm focuses on fetal ECS detection. This is achieved by analyzing the morphological differences between the maternal and fetal signals. As a rule, fetal ECS signals are weaker and contain lower-frequency components than maternal signals. To isolate these low-frequency fetal components, the algorithm applies a low-pass filter that removes high-frequency content associated with the maternal ECS, while a high-pass filter is used to suppress low-frequency noise. This two-layer filtering effectively isolates the fetal signal, allowing the algorithm to focus on it without interference from maternal and ambient noise.

Once the fetal ECS is detected, the algorithm proceeds to the third step, which applies a bandpass filter to further process the fetal signal. The band-pass filter is tuned to a specific frequency range specific to the fetal ECS, enhancing the clarity of the signal and removing any remaining noise or non-essential frequency components. This step is important to preserve the integrity of the fetal signal by minimizing interference from maternal artifacts or environmental noise that may remain after the initial filtering.

The fourth step is normalization, during which the algorithm adjusts the fetal signal amplitude to a standardized scale. Normalization ensures that signal levels are consistent across recordings, which is

crucial for accurate analysis and comparison. By scaling the fetal ECS, normalization reduces the variability that can result from different recording conditions or electrode placement, making the fetal ECS more suitable for interpretation for diagnostic purposes.

Finally, the fifth step involves adaptive filtering to further improve fetal ECS by dynamically adjusting the filter parameters based on changing noise conditions. Adaptive filtering is particularly useful in real-world settings where noise levels can change due to maternal movements, breathing, or slight changes in electrode position. By continuously adjusting to these changes, the adaptive filter fine-tunes the extraction process, ensuring a clear and stable fetal electrocardiogram. This final stage is crucial in creating a reliable and valid fetal ECS suitable for continuous monitoring and clinical diagnosis [14].

The results of the proposed algorithm demonstrate a clear and successfully extracted fetal ECG signal, with a marked improvement in signal clarity, reliability, and diagnostic accuracy. The sequential approach, starting with maternal ECS identification, followed by targeted filtering, normalization, and adaptive enhancement, effectively isolates the fetal signal from mixed maternal, fetal, and noise components.

The isolated electrocardiogram shown in Fig. 3 displays prominent and distinguishable waveforms, including P waves, QRS complex, and T waves, which are important for assessing fetal heart health. These features appear consistently throughout the signal, indicating that the algorithm steps, especially the combination of high-pass and low-pass filters followed by adaptive filtering, have effectively reduced interference from maternal ECS artifacts and ambient noise. Preserving these key waveforms supports accurate monitoring of fetal heart rate, rhythm, and variability-critical parameters for detecting potential fetal distress, arrhythmias, or other heart-related problems.

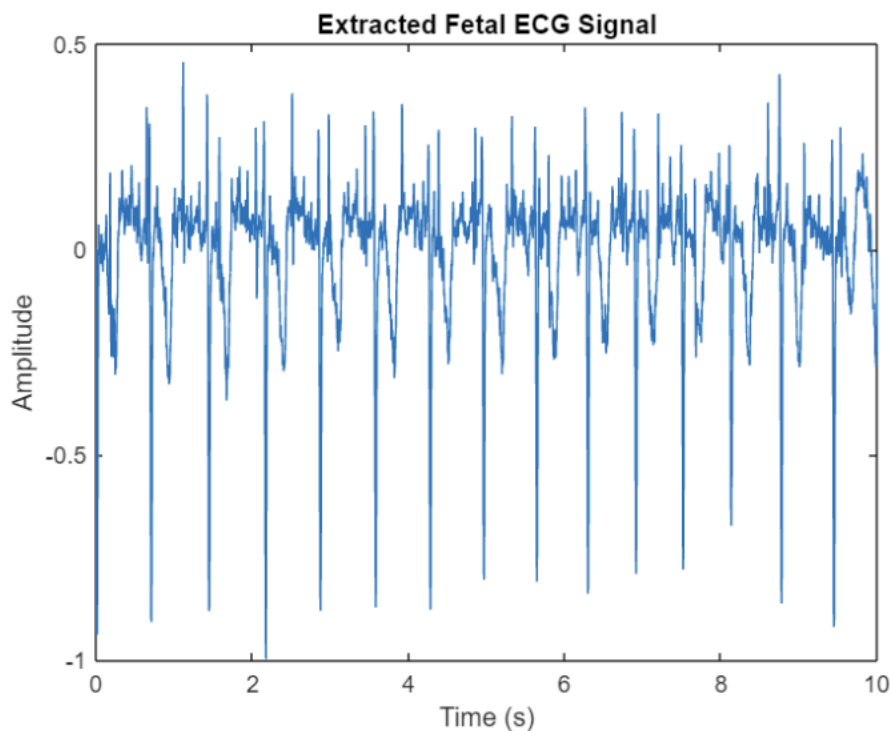


Fig. 3 – Extracted fetal ECG signal

Quantitative analysis further confirms the effectiveness of the algorithm, showing a high signal-to-noise ratio (SNR) and reduced crosstalk from maternal signals. Compared to traditional methods, this approach significantly improves the accuracy of fetal ECS by ensuring that the extracted signal maintains a stable amplitude and clear waveform morphology under different noise conditions. In addition, the normalization step results in a constant amplitude, making fetal ECS more interpretable and ready for comparison between different time points or sessions.

Conclusions

The proposed methodology for fetal ECG signal extraction demonstrates significant advantages over existing methods and has several innovative aspects that expand the possibilities of its application in clinical and research settings. Unlike traditional methods, this approach uses an additive-multiplicative model that takes into account both the independent contributions of maternal and fetal ECG signals and their interaction. This model provides a more accurate representation of the physiological processes occurring in the mother-fetus system, eliminating the limitations of simpler linear models that cannot account for nonlinear dynamics.

The key advantage of the methodology is its advanced noise reduction capabilities. Adaptive filtering techniques dynamically adjust to changes in noise caused by maternal movements or environmental interference, ensuring reliable signal clarity even in challenging conditions. By utilizing spectral techniques such as Wiener filtering and wavelet transforms, the methodology effectively isolates fetal ECS even in the presence of strong maternal signals or noise. Innovative aspects of the methodology include the integration of independent component analysis (ICA) with non-Gaussian optimization, which exploits the statistical independence and non-Gaussian properties of the maternal and fetal signals for better separation. The combination of bandpass filtering and adaptive wavelet transforms improves fetal signal extraction, while normalization ensures signal consistency across different recording conditions. These innovations increase diagnostic reliability and signal accuracy, which distinguishes this methodology from traditional approaches.

The methodology also has the potential to be integrated with artificial intelligence-based systems, such as machine learning algorithms, to further optimize signal processing and improve diagnostic accuracy. Its adaptability makes it suitable for a variety of clinical and non-clinical settings, providing a scalable solution for continuous and reliable fetal monitoring. Overall, this approach represents a transformational advance in prenatal medicine that has the potential to significantly improve maternal and fetal health outcomes through more accurate and reliable signal extraction methods.

References:

1. World Health Organization, Birth defects, 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/birth-defects>. Accessed on: October 24, 2024.
2. N.A. Mensah et al., Global Stillbirth Policy Review - Outcomes And Implications Ahead of the 2030 Sustainable Development Goal Agenda, *International Journal of Health Policy and Management*, vol. 12, iss. 1, pp. 1-11, 2023. doi: **10.34172/ijhpm.2023.7391**.
3. M. Aminu, and N. van den Broek, Stillbirth in low- and middle-income countries: addressing the «silent epidemic», *International Health*, vol. 11, № 4, pp. 237-239, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1093/inthealth/ihz015>.
4. Y.Y. Boo et al., Facility-based stillbirth review processes used in different countries across the world: a systematic review, *EclinicalMedicine*, vol. 59, pp. 1-17, 2023. doi: **10.1016/j.eclinm.2023.101976**.
5. Y. B. Okwaraji et al., «Stillbirths: Contribution of preterm birth and size-for-gestational age for 125.4 million total births from nationwide records in 13 countries, 2000-2020», *BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology*, pp. 1-12, 2023. doi: **10.1111/1471-0528.17653**.
6. J.A. Behar, L. Bonnemains, V. Shulgin, J. Oster, O. Ostras, and I. Lakhno, «Noninvasive fetal electrocardiography for the detection of fetal arrhythmias», *Prenatal Diagnosis*, vol. 39, no. 3, pp. 178-187, 2019. doi: **10.1002/pd.5412**.
7. World Health Organization, Stillbirth, 2019. [Online]. Available: <https://www.who.int/health-topics/stillbirth>. Accessed on: October 20, 2024.
8. W. Maisam et al., «A Deep Learning Framework for Noninvasive Fetal ECG Signal Extraction», *Frontiers in Physiology*, vol. 15, pp. 01-13, 2024. doi: **10.3389/fphys.2024.1329313**.
9. R. Jaros, E. Tomicova, and R. Martinek, «Template subtraction based methods for non-invasive fetal electrocardiography extraction», *Scientific Reports*, vol. 15, pp. 01-13, 2024. doi: **10.1038/s41598-024-51213-5**.
10. R. Vilimkova Kahankova, R. Martinek, and P. Bilik, «Non-invasive Fetal ECG Extraction from Maternal Abdominal ECG Using LMS and RLS Adaptive Algorithms», in Proc. of the Third Int.

- Afro-European Conf. for Industrial Advancement – AECIA 2016, Marrakesh, Morocco, 2016, pp. 258-271. doi: 10.1007/978-3-319-60834-1_27.
11. World Health Organization, WHO recommendations: intrapartum care for a positive childbirth experience, 2018. [Online]. Available: <https://academic.oup.com/inthealth/article/11/4/237/5488741>. Accessed on: October 20, 2024.
 12. K. Prasanth, B. Paul, and A.A. Balakrishnan, «Fetal ECG Extraction Using Adaptive Filters», *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Energy*, vol. 2, № 4, pp. 1483-1487, 2013.
 13. H. Franchevska, M. Khvostivsky, and V. Dozorsky, «Zastosuvannia adaptivnoi filtratsii dlia vydilennia elektrokardiosyhnalu plodu na foni zavrad» [«Applying an Adaptive Filtration for the Fetal Electrocardiographic Signal Selection on the Obstruction Background»], in Proc. 11th Int. Sci. and Pract. Conf. of Young Researchers and Students «Current Issues in Modern Technologies», Ternopil, Ukraine, 2022, pp. 172-173. (Ukr.)
 14. H. Franchevska, «Kompiuteryzovana systema rozpoznavannia fetalnoi elektrokardiohramy: mahisterska robota» [«Computerized fetal electrocardiogram recognition system»], M.S. thesis, Ternopil National Ivan Puluji Technical University, Ternopil, Ukraine, 2020. [Online]. Available: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/33262/1/Master_Thesis_Franchevska.pdf. Accessed on: September 05, 2024. (Ukr.)

Перелік використаних джерел:

1. World Health Organization. Birth defects. 2021. URL: <https://www.who.int/news-room/factsheets/detail/birth-defects> (дата звернення: 24.10.2024).
2. Global Stillbirth Policy Review – Outcomes And Implications Ahead of the 2030 Sustainable Development Goal Agenda / N. A. Mensah Abrampah et al. *International Journal of Health Policy and Management*. 2023. Vol. 12. Iss. 1. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.34172/ijhpm.2023.7391>.
3. Aminu M., van den Broek N. Stillbirth in low- and middle-income countries: addressing the «silent epidemic». *International Health*. 2019. Vol. 11. № 4. Pp. 237-239. DOI: <https://doi.org/10.1093/inthealth/ihz015>.
4. Facility-based stillbirth review processes used in different countries across the world: a systematic review / Y. Y. Boo et al. *eClinicalMedicine*. 2023. Vol. 59. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eclinm.2023.101976>.
5. Stillbirths: Contribution of preterm birth and size-for-gestational age for 125.4 million total births from nationwide records in 13 countries, 2000-2020 / Y. B. Okwaraji et al. *BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology*. 2023. Pp. 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1111/1471-0528.17653>.
6. Noninvasive fetal electrocardiography for the detection of fetal arrhythmias / J. A. Behar et al. *Prenatal Diagnosis*. 2019. Vol. 39. № 3. Pp. 178-187. DOI: <https://doi.org/10.1002/pd.5412>.
7. World Health Organization. Stillbirth. 2019. URL: <https://www.who.int/health-topics/stillbirth> (дата звернення: 20.10.2024).
8. A deep learning framework for noninvasive fetal ECG signal extraction / M. Wahbah et al. *Frontiers in Physiology*. 2024. Vol. 15. Pp. 01-13. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphys.2024.1329313>.
9. Jaros R., Tomicova E., Martinek R. Template subtraction based methods for non-invasive fetal electrocardiography extraction. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. № 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-51213-5>.
10. Vilimkova Kahankova R., Martinek R., Bilik P. Non-invasive Fetal ECG Extraction from Maternal Abdominal ECG Using LMS and RLS Adaptive Algorithms. *AECIA 2016 : Proceedings of the Third International Afro-European Conference for Industrial Advancement – AECIA 2016, Marrakesh, Morocco, 21-23 November 2016*, pp. 258-271. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-60834-1_27.
11. World Health Organization. WHO recommendations: intrapartum care for a positive childbirth experience. 2018. URL: <https://academic.oup.com/inthealth/article/11/4/237/5488741> (дата звернення: 20.10.2024).

12. Prasanth K., Paul B., Balakrishnan A. A. Fetal ECG Extraction Using Adaptive Filters. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2012. Vol. 2. № 4. Pp. 1483-1487.
13. Франчевська Г., Хвостівський М., Дозорський В. Застосування адаптивної фільтрації для виділення електрокардіосигналу плоду на фоні завад. *Актуальні проблеми сучасних технологій* : зб. тез доповідей XI Міжн. наук.-практ. конф. молодих вчених та студентів, м. Тернопіль, 7-8 грудня 2022 р. С. 172-173.
14. Франчевська Г. Комп'ютеризована система розпізнавання фетальної електрокардіограми: магістерська робота. Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет ім. І. Пулюя, 2020. 84 с. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/33262/1/Master_Thesis_Franchevska.pdf.

Стаття надійшла 22.11.2024

Стаття прийнята 05.12.2024

УДК 681.32

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321357

© Котик М.В.*

ДОСТУПНЕ ЛІКУВАННЯ ДІАБЕТУ: СТРАТЕГІЯ РОЗРОБКИ ЕКОНОМІЧНО ЕФЕКТИВНИХ НЕІНВАЗИВНИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ РІВНЯ ГЛЮКОЗИ

У статті розглядається розробка оптичних неінвазивних методів для визначення рівня глюкози в крові у пацієнтів з діабетом. Основна мета дослідження полягає у вивченні різних методик вимірювання концентрації глюкози, включаючи традиційні техніки, такі як хімічний аналіз крові, яка забирається шляхом проколювання пальця або з вени на передпліччі, а також альтернативні неінвазивні підходи. Дослідження спрямоване на виявлення переваг неінвазивного моніторингу, які включають уникнення болю та ризиків, пов'язаних із використанням гострих предметів, можливість збільшення частоти тестів, що забезпечує більш жорсткий контроль за рівнем глюкози. Робота також зосереджена на описі потенційних комерційних переваг неінвазивних пристроїв для моніторингу глюкози. Методи дослідження включають оптичні технології та аналіз наукової літератури. Отримані результати включають розгляд можливостей створення неінвазивних оптоелектронних пристроїв та методик підвищення точності вимірювання кров'яних компонентів. Запропонована техніка та оптичний датчик можуть значно підвищити точність неінвазивного вимірювання кров'яних компонентів, враховуючи внутрішню структуру капілярів та стан шкіри. Рекомендується комбінувати цей метод з іншими визнаними методами неінвазивного визначення кров'яних компонентів *in vivo*, такими як глюкоза, білірубін та кисень, адже він сам по собі не може повністю вирішити проблему неінвазивного аналізу крові у діабетичних пацієнтів. Висновки дослідження підкреслюють значимість основних оптичних технологій для неінвазивного моніторингу глюкози та їх економічну ефективність у порівнянні з перевагами та недоліками.

Ключові слова: діабет, аутоімунне захворювання, глюкоза, неінвазивні методи, оптичні методи.

* канд. техн. наук, ст. викладач, Прикарпатський національний університет ім. Василя Стефаника, м. Івано-Франківськ, ORCID: 0000-0001-6149-0734, mykhaylo.kotyk@pnu.edu.ua

M. Kotyk. Affordable diabetes treatment: strategies for the development of cost-effective non-invasive glucose monitoring systems. The article examines the development of optical non-invasive methods for determining blood glucose levels in diabetic patients. The primary aim of the study is to explore various techniques for measuring glucose concentration, including traditional methods such as chemical blood analysis, obtained through finger pricks or venous sampling from the forearm, as well as alternative non-invasive approaches. The research focuses on identifying the advantages of non-invasive monitoring, which include avoiding pain and risks associated with sharp objects and enabling more frequent testing, thus ensuring tighter glucose control. The work also highlights the potential commercial benefits of non-invasive glucose monitoring devices. Research methods include optical technologies and a review of scientific literature. The results outline the feasibility of developing non-invasive optoelectronic devices and techniques to improve the accuracy of measuring blood components. The proposed technique and optical sensor are expected to significantly enhance the precision of non-invasive blood component measurements by considering the internal structure of capillaries and the condition of the skin. It is recommended to combine this method with other recognized non-invasive techniques for determining blood components in vivo, such as glucose, bilirubin, and oxygen, as this approach alone cannot fully address the challenges of non-invasive blood analysis in diabetic patients. The conclusions emphasize the significance of core optical technologies for non-invasive glucose monitoring and their cost-effectiveness compared to their advantages and limitations.

Keywords: diabetes, autoimmune disease, glucose, non-invasive methods, optical methods.

Постановка проблеми. Діабет – хронічне захворювання, від якого страждають мільйони людей у всьому світі. Цей процес відбувається, коли організм не може належним чином регулювати рівень цукру в крові, що призводить до підвищення рівня глюкози в крові. Розуміння причин та факторів ризику діабету має вирішальне значення для профілактики та лікування цього серйозного захворювання. Існує два основні типи діабету: тип 1 і тип 2. Діабет типу 1 – це аутоімунне захворювання, при якому імунна система організму атакує і руйнує клітини підшлункової залози, які виробляють інсулін. Це призводить до нестачі інсуліну – гормону, відповідального за регулювання рівня цукру в крові. Діабет 1 типу зазвичай діагностується у дітей та молодих людей, хоча він може розвинутися у будь-якому віці [1].

За статистикою у всьому світі близько 425 мільйонів хворих на цукровий діабет, і 67% з них – це пацієнти з Азії. Приблизно від діабету щорічно помирає приблизно 4 мільйони хворих (9% смертей у всьому світі). За прогнозами Міжнародної федерації діабету (IDF) до 2045 року таких хворих буде 629 мільйонів.

Діабет 2 типу зустрічається частіше і зазвичай розвивається у дорослих віком від 45 років, хоча його все частіше діагностують у молодших людей через зростання показників ожиріння. При діабеті 2 типу організм стає стійким до інсуліну, або не виробляє достатньо інсуліну для підтримки нормального рівня цукру в крові. Існує кілька факторів ризику, які можуть збільшити ймовірність розвитку діабету. До них відносяться:

- сімейний анамнез: наявність близького члена сім'ї з діабетом збільшує ризик розвитку цього захворювання;
- ожиріння. Надмірна вага або ожиріння значно підвищує ризик розвитку діабету 2 типу;
- сидячий спосіб життя. Відсутність фізичної активності може сприяти збільшенню ваги та збільшенню ризику розвитку діабету;
- нездорове харчування: вживання великої кількості солодких продуктів може призвести до збільшення ваги та резистентності до інсуліну;
- вік: ризик розвитку діабету 2 типу збільшується з віком, особливо після 45 років;
- етнічна приналежність: деякі етнічні групи, такі як афроамериканці, латиноамериканці, корінні американці та американці азіатського походження, мають більшу поширеність діабету.

Інші фактори, які можуть збільшити ризик розвитку діабету, включають високий кров'яний тиск, високий рівень холестерину, гестаційний діабет (діабет під час вагітності), синдром полікістозних яєчників та серцево-судинні захворювання в анамнезі. Слід зазначити, що, хоча деякі

фактори ризику розвитку діабету, такі як генетика та етнічна приналежність, знаходяться поза нашим контролем, багато факторів можна змінити, щоб знизити ризик [2].

Прогноз значення глюкози у крові проводять за допомогою глюкометра проколюванням пальця ланцетом (маленькою гострою голкою), нанесення краплі крові на тест-смужку та розміщення смужки в вимірнику, який відбиває ступінь глюкози в крові. Більшість сучасних методів самоконтролю рівня глюкози в крові є інвазивними, тобто для кожного тесту потрібно зразок крові, зазвичай одержуваний із кінчика пальця [3]. Дослідження на глюкозу крові (тестування пальцем) пов'язані з болем для пацієнта через страх перед гіпоглікемією, яка викликана суворим контролем значення глюкози. Ці вимірювання важко виконувати у хворих із тривалим діабетом через мозолі на пальцях.

Нещодавно було розроблено флеш-сенсорний моніторинг рівня глюкози, який дозволяє періодично, але часто вимірювати рівень глюкози, а також є мінімально інвазивним. Миттєвий моніторинг рівня глюкози може покращити контроль рівня глюкози і зменшити гіпоглікемію. Флеш-датчик глюкози FreeStyle Libre швидко здобув популярність серед пацієнтів завдяки простоті використання, невеликому розміру та нижчій вартості порівняно з конкурентами. Отже, неінвазивний метод вимірювання рівня глюкози у крові сприятиме значному збільшенню якості життя. В останні роки майже всі оптичні способи були вивчені для знаходження неінвазивного методу [4]. У цій статті основна увага приділяється опису та стратегії розробки економічно ефективних неінвазивних систем моніторингу рівня глюкози.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Цифрові технології, що використовуються у сфері охорони здоров'я для автоматизації діагностичних процесів, включають телемедицину, машинне навчання, штучний інтелект, Інтернет речей (IoT) та хмарні технології. У дослідженні, присвяченому цифровізації охорони здоров'я та телекомунікаційних систем підтримки, розглядаються методи інтелектуальної підтримки складних тестових рішень для електронної медичної історії, які прискорюють порівняння даних пацієнтів та розвиток діагностичних гіпотез [5]. Машинне навчання використовується для автоматизації діагностичних процесів, наприклад, для прогнозування діабету з використанням таких параметрів, як вік, рівень глюкози та тиск [6]. Цифрові технології також сприяють просуванню персоналізованої охорони здоров'я, покращуючи управління пацієнтами та діагностику на основі даних про генетику, навколишнє середовище та спосіб життя пацієнта [7]. В епоху цифровізації використання IoT та хмарних технологій дозволяє автоматизувати обробку даних та надавати недорогі діагностичні рішення [8].

В останні роки в сфері сучасної медицини інтенсивно розробляються та впроваджуються оптикоелектронні неінвазивні методи моніторингу «in vivo», що дозволяють вимірювати концентрації важливих показників крові людини, зокрема кисень, глюкозу, холестерин та білірубін. Ці методи стають все більш популярними завдяки їх безболісності та відсутності необхідності фізичного втручання в організм, що особливо важливо при необхідності регулярних вимірювань. Актуальність та перспективність таких методів підтверджується в наукових роботах M.N. Larsen, M. Mohr та F. Lobelo [9], T. Iverson, H. Alfares, G.S. Nijjar та J. Wong [10], D.C. Lau та H. Teoh [11], а також X. Liu та J. Zhang [12], які також зазначають, що ці методи не вимагають додаткових реагентів чи складного обладнання для збору біологічних зразків.

Однак, за інформацією V.I. Malinovsky [13], головною проблемою оптикоелектронних неінвазивних методів є їх порівняно низька точність вимірювань. Наприклад, у випадку неінвазивних вимірювачів рівня глюкози точність може становити до 20%. Ця проблема є особливо актуальною і її також підтверджують у своїх дослідженнях A. Mishra, V. Verma, V. Bisht та J. Bala [14], які вказують на складності використання складних безконтактних оптичних механізмів для отримання точних даних про рівні компонентів крові. Ці механізми потребують ретельного врахування багатьох факторів, таких як відмінності в біологічних та структурних особливостях різних пацієнтів, що впливає на здатність точно вимірювати концентрації необхідних речовин в крові.

Таким чином, неінвазивні оптикоелектронні методи, попри їх значні переваги, все ще потребують подальших досліджень та вдосконалень для підвищення точності вимірювань та зниження можливих похибок.

Метою статті є вивчення стратегії та міркування щодо розробки та виробництва економічно ефективних неінвазивних систем моніторингу рівня глюкози, зосереджуючись на виборі матеріалів, виробничих процесах і доступності ринку.

Виклад основного матеріалу. Технології, що використовуються для неінвазивного моніторингу глюкози, включають оптичні, трансдермальні та термічні методи. Оптичні методи використовують різні властивості світла для взаємодії з глюкозою, що залежить від її концентрації, і поділяються на:

1. *Інфрачервона спектроскопія (ІКС)* – цей метод заснований на використанні зовнішнього джерела світла в організмі з діапазоном довжини хвилі 750-2500 нм. Інфрачервона спектроскопія (ІКС) дозволяє вимірювати рівень глюкози в тканинах на глибині 1-100 міліметрів із зменшенням глибини проникнення для збільшення значення довжина хвилі. Світло, зосереджене на тілі, частково поглинається і розсіюється через його взаємодію з хімічними компонентами тканини (рис. 1). Тканина може піддаватися впливу змін концентрації глюкози через зміни в її поглинанні, що пов'язані з водотоннажністю, або через зміни у власному поглинанні. Зміни концентрації глюкози також впливають на інтенсивність світла, розсіяного тканиною (μ_s).

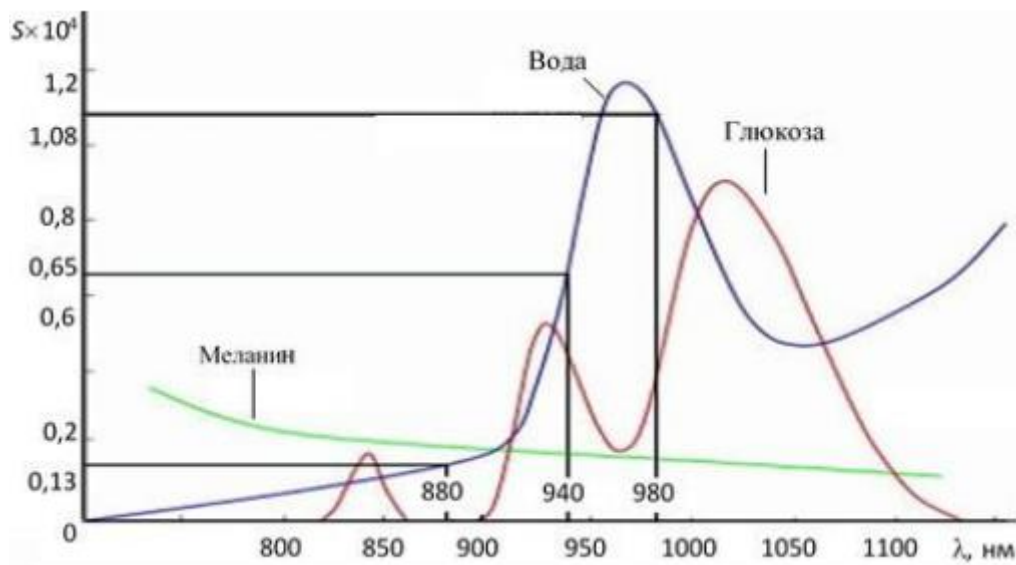


Рис. 1 – Спектральні коефіцієнти поглинання складових шкіри людини [1]

Одним з обмежень інфрачервоної спектроскопії (ІКС) для неінвазивного визначення глюкози є менший коефіцієнт поглинання глюкози в крові. Таким чином, слабкі спектральні смуги глюкози перекривають інші сильніші обертони комбінації смуг води, гемоглобіну, білка та жиру. Вимірювання глюкози може бути перервано за фізичними та хімічними характеристиками, такими як коливання артеріального тиску, температури тіла, зволоження шкіри, а також тригліцеридами та альбумінами. А також зміни навколишнього середовища, такі як температура, вологість, вуглекислий газ та атмосферний тиск, можуть призвести до похибки у визначенні глюкози [15].

Головна проблема ІКС для моніторингу рівня глюкози в крові – це необхідність частого калібрування приладу. ІКС не лише вимірює один специфічний сигнал для глюкози, але й оцінює багато сигналів, які не є ні специфічними для глюкози, ні пов'язані з рівнями глюкози лінійним чином. На жаль, дослідження вимірювання глюкози *in vivo* з використанням ІКС показали неточні результати.

2. Середня інфрачервона спектроскопія.

Середня інфрачервона спектроскопія (СІКС) заснована на використанні світла із довжиною хвилі в діапазоні 2500-10000 нм. Фізичний принцип середньої інфрачервоної спектроскопії схожий на інфрачервону спектроскопію (ІКС). У порівнянні з інфрачервоною спектроскопією середня інфрачервона спектроскопія демонструє зниження розсіювання та збільшення поглинання, враховуючи вищі довжини хвиль. Проникнення світла в тканини людини можуть досягати кількох мікромметрів, тому розглядається лише відбите або розсіяне світло [16].

Перевага середньої інфрачервоної спектроскопії перед інфрачервоною спектроскопією у тому, що смуги поглинання глюкози гостріші у порівнянні з іншими сполуками і часто бувають широкими та слабкими. Обмеження у використанні цього методу – погане проникнення. На середню інфрачервону спектроскопію впливають ті ж проблеми та фактори, що і на інфрачервону спектроскопію.

3. Раманівська спектроскопія.

Раманівська спектроскопія (комбінаційного розсіювання) дає можливість виміряти молекулярний склад за рахунок непружного розсіювання та ідентифікувати коливальний стан (фотонів). Кожна молекула має свою власну частоту коливань чи частоти. Отже, об'єднаний спектр розсіяного світла забезпечує унікальне враження, яке може ідентифікувати молекулу. Спектроскопія має кілька переваг. Спектроскопія спостерігається в розсіяному світлі зразка, а не в спектрі поглинання зразка світла.

Отже, раманівська спектроскопія не вимагає спеціальної підготовки зразків та нечутлива до смуг поглинання. Це властивість спектроскопії комбінаційного розсіювання полегшує процес прямого вимірювання у твердому, рідкому та газоподібному середовищі, а також вимірювання через прозорі матеріали, такі як скло, кварц, пластик. Раманівська спектроскопія заснована на використанні лазерних коливань і обертань у молекулах розчину. Отже, можна отримати оцінку концентрації глюкози в рідинах організму, де вона зазвичай знаходиться в інтервалі 200-1800 cm^{-1} . У цій смузі спектр комбінаційного розсіювання глюкози значно відрізняється від спектру інших сполук. Фактично, раманівська спектроскопія надає більш точні дані, а завдяки впровадженню та вдосконаленню лазерів, приладів із зарядовим зв'язком та інших оптичних компонентів кількісний аналіз став можливим завдяки цьому методу.

4. Фотоакустична спектроскопія (ФАК).

Фотоакустична спектроскопія (ФАК) може використовуватися для виявлення поглинання глюкози в рідинах і газах. Ця технологія є одним із методів аналізу взаємодії світла з тканинами. У ФАК аналізуються результати, де показник заломлення середовища пов'язаний зі змінами, спричиненими коливаннями концентрації глюкози. Важливими є подальші дослідження, щоб зрозуміти механізми виникнення та поширення фотоакустичних сигналів у тканинах і можливість їх застосування для неінвазивного визначення рівня глюкози.

5. Поляризаційні зміни.

Коли поляризоване світло проходить через розчин із оптично активними розчинами (такими як хіральні молекули), світло повертає власну площину під певним кутом, який відповідає концентрації оптично активних розчинених речовин [12]. Глюкоза вважається хіральною молекулою та її властивості добре відомі. Практично, при дослідженні змін полярності глюкози був запропонований перший неінвазивний метод виміру глюкози у людей. Оптичні компоненти можна мінімізувати, використовуючи видиме світло, проте цей метод чутливий до розсіюючих властивостей досліджуваної тканини, які призводять до деполіризації світла, тому шкіра не може бути досліджена за допомогою поляриметрії [13]. Крім того, цей метод має низьку специфічність, оскільки в рідинах, що містять глюкозу людини, присутні й інші оптично активні сполуки, такі як аскорбат та альбумін

б. Оптична когерентна томографія (ГКТ).

Оптична когерентна томографія представляє собою неінвазивний метод аналізу тонких шарів шкіри, слизових оболонок, а також тканин ока та зубів у людей. Цей метод застосовується для створення детальних зображень таких структур, як сітківка, зоровий нерв або передня частина ока. Принцип методу ГКТ полягає в тому, що світлова хвиля проходить через тканину, де вона поширюється і відображається або розсіюється від внутрішніх шарів, які мають різноманітні властивості. Світло, відбите назад тканиною, комбінується зі світлом, відбитим контрольним плечем інтерферометра і в результаті інтерферометричний сигнал виявляється фотоприймачем. Блок-схема експериментальної системи ГКТ наведена на рис. 2.

Властивості розсіювання тканин сильно залежать від відношення показника заломлення центрів розсіювання (наприклад, компонентів клітин та білків) до показника заломлення проміжної рідини. У міру збільшення концентрації глюкози в інтерстиціальній рідині її показник заломлення також збільшується, що визначає зменшення невідповідності показника заломлення та коефіцієнта розсіювання [17]. Таким чином, на підставі даних ГКТ, що генеруються розсіяним світлом, може бути отримана оцінка концентрації глюкози в інтерстиціальній рідині. Чутливість

цієї техніки до руху є одним з обмежень. Невеликі зміни температури шкіри мають незначний вплив, зміни в кілька градусів суттєво впливають на сигнал.

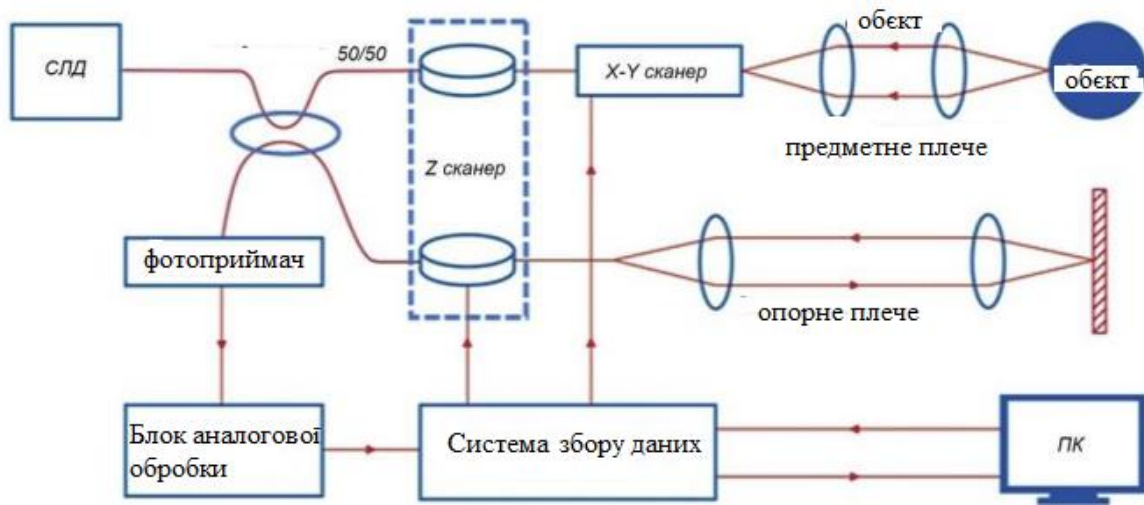


Рис. 2 – Блок-схема експериментальної системи ГКТ

7. Фотонний кристал

Фотонні кристали (ФК) є штучними періодичними діелектричними структурами (матеріалами) з шириною забороненої зони, що запобігає поширенню світла в певному діапазоні частот. Формуючи точкові недоліки (або резонансні порожнини) у цьому кристалі, ми можемо захоплювати фотони в «пастках» нелегальної зони (локалізувати фотони в зазорах дефекту) і потім застосувати їх особливим чином. Діапазон частот та інші параметри такого резонатора можна встановити у простий спосіб.

Ідея фотонних кристалів була вперше запропонована 1987 року Елі Яблоновичем (співробітником Каліфорнійського університету в Каліфорнії). Однак запропонована ним технологія не підходила для формування кристалічної структури, яка б дозволяла працювати з широкими оптичними довжинами хвиль (850, 1310, 1550 нм). Ця проблема вирішується за допомогою нової технології, розробленої ScandiaLab (США). Технологічний процес полягає у нанесенні шару кремнію на підкладку SiO₂ з подальшим створенням точкових дефектів у шарі Si, зазвичай періодичних, але з локальними нерівностями, що призводить до необхідних ефектів. Фотонні кристали дозволяють досягати ефектів, які недоступні для звичайних оптичних пристроїв, таких як пропускання оптичного променя з поворотом на 90° зі втратою потужності (рис. 3).



Рис. 3 – Розроблений [17] оптичний сенсор у вигляді кліпси для неінвазивної оцінки вміст глюкози в крові людини: а) вид пристрою; б) процес встановлення на кінцівках пальця

Група Ашера розробила фотонно-чутливий матеріал із полімеризованих кристалічних колоїдних матриць (ПККМ) для неінвазивного визначення глюкози. ПККМ являють собою періодичні кристалічні колоїдні матриці сферичних полістирольних колоїдів, полімеризованих у тонких плівках гідрогелю. Масиви діють як дифракційна решітка для білого світла та виявлення певної довжини дифрагованої хвилі під певним кутом огляду між напрямом поширення падаючого світла і дифракційними площинами [17].

Бреггівська дифракція залежить від показника заломлення системи (розчинник, гідрогель та колоїди) та відстані між дифракційними площинами (відстань d). Увімкнення заряджених частинок або зміна електричного заряду в ПККМ призводить до розширення масивів i , таким чином, змінюється відстань між площинами, що відхиляються. Потім дифракційна картина змінюється і призводить до зсуву довжини хвилі у світлі, відбитому від масиву. Декілька досліджень показали здатність плівок ПККМ виявляти іони металів [18], креатинін та глюкозу.

Група Ашера створила фотонний сенсор глюкози у вигляді тонкої дифракційної гідрогелевої плівки ПККМ, що містить кристали глюкозооксидази або фенілборонової кислоти як елементів молекулярного розпізнавання. Приєднання глюкози змінює розподіл заряду. Захоплення глюкози глюкозооксидазою або фенілбороновою кислотою призводить до зміни відстані d рівняння Брега і викликає зрушення в довжинах хвиль дифрагованого світла.

8. Флуоресцентна технологія

Застосування флуоресценції для моніторингу глюкози почалося в 1980-х роках, коли Шульц, застосовуючи підхід, заснований на використанні оптоволокна, використовував глюкозо-зв'язуючий білок, що зустрічається в природі, Конканавалін А в аналізі конкурентного зв'язування з високомолекулярним декстраном. Крім того, новий підхід з використанням синтетичного рецептора, відомого як боронова кислота, була введена в 1990-х роках. Так само був розроблений ферментативний підхід, в якому використовувалася глюкозооксидаза для вимірювання власної флуоресценції.

Наприкінці 1990-х дослідники почали оцінювати датчик глюкози, використовуючи дезактивований фермент, як рецептор, а не каталізатор. У 2000-х роках було зроблено нові досягнення у розробці нового біосенсора. На сьогоднішній день кілька рецепторів, включаючи глюкозо-зв'язувальні лектини апоферменти та синтетичні рецептори боронової кислоти, були використані для визначення глюкози [19].

Системи на основі флуоресценції привертають більше уваги через їхню високу чутливість. Ця система практично не пошкоджує систему та дозволяє вимірювати інтенсивність флуоресценції, а також час згасання флуоресценції. Втім, використання ультрафіолетового світла у тканинах може призвести до явищ розсіювання та флуоресценції. Більше того, навіть за використання різних довжин хвиль явище флуоресценції може залежати не тільки від глюкози, але і від таких параметрів, як меланін шкіри, гемоглобін та товщина епідермісу.

Висновки

У статті представлено опис основних оптичних технологій для неінвазивного моніторингу глюкози. Поява нових методів виявлення, покращення вимірювальних технологій і методів зниження шуму зробили свій внесок у неінвазивний моніторинг рівня глюкози. Виділені переваги та недоліки неінвазивних методів вимірювання глюкози у крові.

До переваг можна віднести:

- відсутність ризику передачі інфекцій через кров;
- відсутність необхідності забору біоматеріалу;
- відсутність необхідності використання витратного матеріалу (тест-смужки).

Виділені недоліки:

- необхідність індивідуального калібрування для кожного пацієнта;
- складність технічної реалізації;
- складність обліку сукупності всіх факторів, які роблять внесок у вимір.

Чутливість до численних фізіологічних факторів, факторів навколишнього середовища та активності, які часто змінюються у звичайному повсякденному житті, призвела до того, що деякі технології ще не були використані в пристроях, у той час як інші призвели до створення пристроїв, принаймні, у просунутому стані прототипу. Ці методи можуть бути застосовані для вдосконалення існуючих приладів неінвазивної діагностики концентрації глюкози оптичними

аналізаторами, з метою покращення якості та точності вимірювань, що є першочерговим завданням для приладів такого типу.

Таким чином, спектрофотометрія виступає як обнадійливий метод для аналізу оптичних характеристик, хімічного складу, структурних особливостей та місцевих відхилень у біотканинах. Ця техніка забезпечує точне кількісне визначення ступеня та об'єму ураження біологічних тканин, дозволяючи глибше зрозуміти механізми їхніх змін. Однією з ключових переваг спектрофотометрії є її здатність виявляти варіації в епітеліальних тканинах та пухлинах, що розташовані в глибоких шарах внутрішніх органів. Ця особливість методу дозволяє здійснювати раннє виявлення різних захворювань, значно підвищуючи шанси на успішне лікування та відновлення пацієнтів.

Перелік використаних джерел:

1. Henkenjohann R. Role of individual motivations and privacy concerns in the adoption of german electronic patient record apps – a mixed-methods study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. Article 9553. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18189553>.
2. Healthcare information exchange using blockchain technology / Murugan A., Chechare T., Muruganatham B., Ganesh Kumar S. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2020. Vol. 10. Pp. 421-426. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v10i1.pp421-426>.
3. Xiao S., Pan, X. What drives firms to go green in China? The role of digitalization. *Sustainability*. 2025. Vol. 17(1). Article 234. DOI: <https://doi.org/10.3390/su17010234>.
4. Towards the development of digital manufacturing ecosystems for sustainable performance: learning from the past two decades of research / A. F. Shahatha Al-Mashhadani et al. *Energies*. 2021. Vol. 14. Article 2945. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14102945>.
5. Amann J., Sleigh J., Vayena E. Digital contact-tracing during the Covid-19 pandemic: An analysis of newspaper coverage in Germany, Austria, and Switzerland. *PLOS ONE*. 2021. Vol. 16(2). Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246524>.
6. Wang C. IoT-enabled remote patient monitoring for chronic disease management: Exploring the use of IoT devices for remote monitoring of patients with chronic diseases. *Journal of Machine Learning for Healthcare Decision Systems*. 2024. Vol. 2(1). Pp. 27-33.
7. The LatAm-FINGERS initiative: The first non-pharmacological randomized controlled trial to prevent cognitive decline across Latin America / G. E. Sevlever et al. *International Psychogeriatrics*. 2024. Vol. 36. Iss. S1. Pp. 10-13. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1041610224001029>.
8. Henkenjohann R. Role of individual motivations and privacy concerns in the adoption of german electronic patient record apps – a mixed-methods study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. Article 9553. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph18189553>.
9. Recreational team sports: Prevention, treatment, and rehabilitation of non-communicable diseases. URL: <https://www.frontiersin.org/research-topics/59862/recreational-team-sports-prevention-treatment-and-rehabilitation-of-non-communicable-diseases> (дата звернення: 15.07.2024).
10. A rapid systematic review of the effect of health or peer volunteers for diabetes self-management: Synthesizing evidence to guide social prescribing / T. Iverson et al. *PLOS Global Public Health*. 2024. Pp. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pgph.0004071>.
11. Lau D. C., Teoh H. Impact of Current and Emerging Glucose-Lowering Drugs on Body Weight in Type 2 Diabetes. *The Canadian Journal of Diabetes*. 2020. Vol. 39(5). Pp. 148-154. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcjd.2015.09.090>.
12. Liu X., Zhang J. Continuous glucose monitoring in prediabetes management: A comprehensive perspective. *Frontiers in Endocrinology*. 2024. URL: <https://www.frontiersin.org/journals/endocrinology/articles/10.3389/fendo.2024.1472898/full> (дата звернення: 15.09.2024).
13. Маліновський В. І. Метод та оптичний сенсор підвищення точності неінвазивного моніторингу концентрацій показників крові людини. *Photonics-ODS* : тези доповіді VI-ї Міжн. наук.-техн. конф., м. Вінниця 1-4 жовтня 2012 р. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2012. С 151.

14. Internet of Diagnostic Things: Emerging Horizon towards Precision and Digital Health Care / V. Verma, A. Mishra, V. Bisht, J. Bala. *Journal of Health and Social Research*. 2021. Vol. 41(1). Pp. 25-36. DOI: <https://doi.org/10.7324/JHSR/2020/24981>.
15. Pathophysiological characterization of the ApoE^{-/-;db/db} mouse: A model of diabetes and atherosclerosis / M. Paniagua-Sancho et al. *Methods*. 2025. Vol. 243. Pp. 223-232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2025.01.002>.
16. Intermittent use of flash glucose monitoring improves glycemic control in Chinese older patients with type 2 diabetes mellitus / Y. Hu et al. *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy*. 2025. Vol. 18. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.2147/DMSO.S498620>.
17. Cognition and influencing factors of secondary prevention in patients with ischemic stroke 1 year after discharge in southwest China: A cross-sectional survey / X. Zhong et al. *Frontiers in Neurology*. 2024. Vol. 15. Pp. 01-07. DOI: <https://doi.org/10.3389/fneur.2024.1488180>.
18. Okura T. The importance of the time in target range (TTR) of glucose and blood pressure. *Hypertension Research*. 2024. Pp. 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41440-024-02054-2>.
19. Validation of Time in Range as an Outcome Measure for Diabetes Clinical Trials / R.W. Beck. *Diabetes Care*. 2019. Vol. 42(3). Pp. 400-405. DOI: <https://doi.org/10.2337/dc18-1444>.

References:

1. R. Henkenjohann, «Role of individual motivations and privacy concerns in the adoption of german electronic patient record apps – a mixed-methods study», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, article 9553, 2021. doi: **10.3390/ijerph18189553**.
2. A. Murugan, T. Chechare, B. Muruganantham, and S. Ganesh Kumar, «Healthcare information exchange using blockchain technology», *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 10, pp. 421-426, 2020. doi: **10.11591/ijece.v10i1.pp421-426**.
3. S. Xiao, and X. Pan, «What drives firms to go green in China? The role of digitalization», *Sustainability*, vol. 17(1), article 234, 2025. doi: **10.3390/su17010234**.
4. A.F. Shahatha Al-Mashhadani, M.I. Qureshi, S.S. Hishan, M.S. Md Saad, Y. Vaicondam, and N. Khan, «Towards the development of digital manufacturing ecosystems for sustainable performance: learning from the past two decades of research», *Energies*, vol. 14, article 2945, 2021. doi: **10.3390/en14102945**.
5. J. Amann, J. Sleight, and E. Vayena, «Digital contact-tracing during the Covid-19 pandemic: An analysis of newspaper coverage in Germany, Austria, and Switzerland», *PLOS ONE*, vol. 16(2), pp. 1-16, 2021. doi: **10.1371/journal.pone.0246524**.
6. C. Wang, «IoT-enabled remote patient monitoring for chronic disease management: Exploring the use of IoT devices for remote monitoring of patients with chronic diseases», *Journal of Machine Learning for Healthcare Decision Systems*, vol. 2(1), pp. 27-33, 2024.
7. G. E. Sevelever, L. Crivelli, R. M. Salinas, A. Charamelo, and C. Delgado, «The LatAm-FINGERS initiative: The first non-pharmacological randomized controlled trial to prevent cognitive decline across Latin America», *International Psychogeriatrics*, vol. 36, iss. S1, pp. 10-13, 2024. doi: **10.1017/S1041610224001029**.
8. R. Henkenjohann, «Role of individual motivations and privacy concerns in the adoption of german electronic patient record apps – a mixed-methods study», *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, article 9553, 2021. doi: **10.3390/ijerph18189553**.
9. Recreational team sports: Prevention, treatment, and rehabilitation of non-communicable diseases. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/research-topics/59862/recreational-team-sports-prevention-treatment-and-rehabilitation-of-non-communicable-diseases>. Accessed on: July 15, 2024.
10. T. Iverson et al., «A rapid systematic review of the effect of health or peer volunteers for diabetes self-management: Synthesizing evidence to guide social prescribing», *PLOS Global Public Health*, pp. 1-23, 2024. doi: **10.1371/journal.pgph.0004071**.
11. D.C. Lau, and H. Teoh, «Impact of Current and Emerging Glucose-Lowering Drugs on Body Weight in Type 2 Diabetes», *The Canadian Journal of Diabetes*, vol. 39(5), pp. 148-154, 2020. doi: **10.1016/j.jcjd.2015.09.090**.
12. X. Liu, J. Zhang, «Continuous glucose monitoring in prediabetes management: A comprehensive perspective». *Frontiers in Endocrinology*, 2024. [Online]. Available:

<https://www.frontiersin.org/journals/endocrinology/articles/10.3389/fendo.2024.1472898/full>. Accessed on: September 15, 2024.

13. V.I. Malinovskyi, «Metod ta optychnyi sensor pidvyshchennia tochnosti neinvazyvnoho monitorynhu kontsentratsii pokaznykiv krovi liudyny» [«Method and optical sensor for increasing the accuracy of non-invasive monitoring of human blood concentration parameters»], in Proc. VI Int. Sci.-Tech. Conf. «Photonics-ODS», Vinnytsia, 2012, pp. 151. (Ukr.)
14. V. Verma, A. Mishra, V. Bisht, and J. Bala, «Internet of Diagnostic Things: Emerging Horizon towards Precision and Digital Health Care», *Journal of Health and Social Research*, vol. 41(1), pp. 25-36, 2021. doi: **10.7324/JHSR/2020/24981**.
15. M.P. Paniagua-Sancho, A.G. Casanova, L. Rodríguez-Estévez, I. Cruz-González, F.J. López-Hernández, and C. Martínez-Salgado, «Pathophysiological characterization of the ApoE^{-/-};db/db mouse: A model of diabetes and atherosclerosis», *Methods*, vol. 243, pp. 223-232, 2025. doi: **10.1016/j.ymeth.2025.01.002**.
16. Y. Hu, R. Yan, Y. Shen, H. Li, J. Ma, and X. Su, «Intermittent use of flash glucose monitoring improves glycemic control in Chinese older patients with type 2 diabetes mellitus», *Diabetes, Metabolic Syndrome and Obesity: Targets and Therapy*, vol. 18, pp. 1-9, 2025. doi: **10.2147/DMSO.S498620**.
17. X. Zhong, L. Li, Q. Ye, J. Wang, L. He, and C. Li, «Cognition and influencing factors of secondary prevention in patients with ischemic stroke 1 year after discharge in southwest China: A cross-sectional survey», *Frontiers in Neurology*, vol. 15, pp. 01-07, 2024. doi: **10.3389/fneur.2024.1488180**.
18. T. Okura, «The importance of the time in target range (TTR) of glucose and blood pressure», *Hypertension Research*, pp. 1-3, 2024. doi: **10.1038/s41440-024-02054-2**.
19. R.W. Beck, «Validation of Time in Range as an Outcome Measure for Diabetes Clinical Trials», *Diabetes Care*, vol. 42(3), pp. 400-405, 2019. doi: **10.2337/dc18-1444**.

Стаття надійшла 22.10.2024

Стаття прийнята 02.12.2024

171 ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 62-94

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321358

© Хребтова О.А.¹, Перекрест А.Л.², Зачепа Ю.В.³, Зачепа Н.В.⁴,
Некрасов А.В.⁵, Маслій М.А.⁶**УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ КЕРУВАННЯ СИСТЕМИ ПЧ-АД
МЕХАНІЗМУ ПЕРЕМІЩЕННЯ ПЛИТ ФІЛЬТР-ПРЕСУ ФКМ-500**

Моменти навантаження електропривода механізму переміщення плит фільтр-пресу ФКМ-500 супроводжуються достатньо великими значеннями механічних зусиль, що складаються зі статичних і змінних складових стохастичного характеру. Аналіз аварійних ситуацій дозволив визначити чинники, які впливають на формування аварійних ситуацій. Для збільшення працездатності роботи системи автоматизованого електропривода під час виконання технологічних операцій проведено аналіз можливостей налаштування параметрів перетворювача частоти ACS580. При використанні можливостей перетворювача частоти виконано удосконалення алгоритму роботи системи електропривода для безаварійного виконання технологічної операції під час нетипових режимі роботи за рахунок введення додатково підпрограми алгоритму з новими налаштуваннями перетворювача частоти для виконання покрокового переміщення плит фільтр-пресу. Перетворювач частоти має групу параметрів, що були визначені як пріоритетні для параметрування пристрою під час забезпечення безаварійного виконання динамічних режимів переміщення плит фільтр-пресу по напрямним зі збільшеним моментом опору. Розроблено алгоритм роботи автоматизованої системи електропривода на базі перетворювача частоти ACS580 з урахуванням характеру зміни навантаження під час виконання технологічної операції та нетипових режимів роботи технологічного механізму. Алгоритм складається з двох складових. Перша складова забезпечує виконання типового технологічного процесу, параметри перетворювача частоти налаштовуються у відповідності з вимогами до системи електропривода саме для виконання цього режиму. Друга складова, що була розроблена, має підпрограму, яка виконує контрольоване покрокове збільшення моменту двигуна для подолання стропоріння за необхідності та запобігання перекосів сторін плити, що переміщується. Алгоритм, що використовує відповідні налаштування перетворювача частоти в реальному часі, забезпечує виконання технологічної операції з заданими параметрами робочого режиму системи електропривода, і, як наслідок, забезпечує зменшення аварійних режимів.

Ключові слова: перетворювач частоти, технологічний процес, параметри налаштування, фільтр-прес.

¹ канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-4369-0262, okkhrebtova@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-7728-9020, pksg13@gmail.com

³ канд. техн. наук, доцент, Бахмутський навчально-науковий професійно-педагогічний інститут Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, м. Харків, ORCID: 0000-0003-4364-6904, iuriizachepa@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0003-0365-5320, zachepa.nataliia@ukr.net

⁵ канд. техн. наук, доцент, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0000-0002-6507-4102, AndriiNekrasov@gmail.com

⁶ аспірант, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, м. Кременчук, ORCID: 0009-0008-6221-0659, misha87767@gmail.com

O.A. Khrebtova, A.L. Perekrest, Iu.V. Zachepa, N.V. Zuchepa, A.V. Nekrasov, M.A. Masliy. Improvement of the control algorithm for the VFD-IM system of the plate movement mechanism in the FKM-500 filter press. Load moments on the electric drive of the plate movement mechanism in the FKM-500 filter press are accompanied by significant mechanical forces, which consist of static and variable components of a stochastic nature. An analysis of emergency situations identified factors influencing the formation of such incidents. To improve the performance of the automated electric drive system during technological operations, an analysis of the tuning possibilities for the ACS580 frequency converter parameters was conducted. Using the capabilities of the frequency converter, the operation algorithm of the electric drive system was improved to ensure the fault-free execution of technological operations during atypical operating modes. This was achieved by introducing an additional subroutine into the algorithm with new frequency converter settings for stepwise movement of the filter press plates. The frequency converter has a set of parameters identified as priority for device parameterization to ensure fault-free execution of dynamic modes during plate movement along the guides under increased resistance torque. An algorithm for the automated electric drive system was developed based on the ACS580 frequency converter, considering the nature of load variations during technological operations and atypical operating modes of the mechanism. The algorithm consists of two components. The first component ensures the execution of the typical technological process, with the frequency converter parameters configured according to the requirements for the electric drive system for this mode. The second component, newly developed, includes a subroutine that performs controlled stepwise torque increases of the motor to overcome sticking, if necessary, and to prevent misalignment of the sides of the moving plate. The algorithm, utilizing appropriate frequency converter settings in real time, ensures the execution of the technological operation with specified working mode parameters of the electric drive system. As a result, the occurrence of emergency modes is reduced.

Key words: frequency converter, technological process, setting parameters, filter press.

Постановка проблеми. У більшості технічної та наукової літератури питання динаміки електроприводу під час виконання динамічних і статичних режимів розглядаються за умови незмінності опору навантаження $M_c(\omega) = const$ [1-3].

На сьогодні з більшості досліджень встановлено, що навантаження електротехнічного обладнання технологічного механізму формуються за рахунок наступних чинників: вага технологічного середовища, яке переміщується; власна вага окремих деталей, вузлів, механізмів та металоконструкцій рухливої частини технологічного механізму; зусилля, що формується за рахунок попереднього натягу кінематичного ланцюгу; зусилля початкової затяжки з'єднувального ланцюгу елементів кінематики, запресування та розклинювання в рухомих складових кінематичного ланцюгу; робочі динамічні навантаження та сили опору руху під час стаціонарного режиму роботи промислового механізму [4-7].

Одним із прикладів такого технологічного комплексу є електропривод (ЕП) механізму переміщення плит фільтр-пресу ФКМ-500, що забезпечує ефективне відділення твердих часток від рідини під час фільтрації руди і промислових матеріалів, вугілля і, так званих, «хвостів» в процесі роботи гірничо-збагачувального обладнання.

Під час виконання технологічної операції особливістю усталених навантажень є те, що для одних елементів конструкції електротехнічного обладнання вони можуть виступати постійними, а для інших елементів виявляються квазівстановленими. Квазівстановлені навантаження змінюються в часі за періодичним законом (синусоїдальним, прямокутним, трапецеїдальним тощо), кількісні параметри якого (мінімальна і максимальна величина навантаження, періодичність, тривалість окремих стадій тощо) досить стійкі протягом тривалого періоду експлуатації [8, 9].

Чинники, що формують характер квазівстановлених навантажень, це: параметри робочого середовища, якість виконання попередньої технологічної операції, зовнішні збурення, в тому металоконструкції, відпрацювання зворотних зв'язків автоматизованої системи керування тощо. Тому функція зміни в часі величини навантаження має заздалегідь непередбачуваний характер, вона неповторна для різних інтервалів часу і є стохастичним процесом [10, 11].

Встановлено, що в реальних умовах залежність $M_c(\omega)$ складається з двох основних складових: класичного чинника, що формує навантаження ($M_0 + k(\omega/\omega_n)^p$), і чинника, що має складний стохастичний характер ($M_p(\varphi) + M_d f(v_{mp})$):

$$M_c(\omega) = M_0 + k(\omega/\omega_n)^p + M_p(\varphi) + M_d f(v_{mp}), \quad (1)$$

де $M_p(\varphi)$ – залежність моменту від кута повороту валу φ , що, в свою чергу, залежить від часу t , на протязі якого агрегат знаходиться в нерухомому стані, властивостей масла ν , температури навколишнього середовища $^{\circ}C$, характеристик робочого тіла і ін., тобто $M_p(\varphi) = F(t, \nu, ^{\circ}C, \dots)$, M_d – момент двигуна; $f(v_{mp})$ – коефіцієнт тертя, що залежить від багатьох факторів і може мати характер як квазівстановленого процесу, так і стохастичного, тобто $f(v_{mp}) = F(t, \nu, m, \rho, \dots)$.

В роботі [12] зазначено, що наявність змінних стохастичних навантажень обумовлена високим ступенем динамічності робочого процесу під час переміщення плит фільтр-пресу ФКМ-500. До них віднесено ударні навантаження при натиканні рухомого елемента механізму на перешкоду, удари на кінцевий упор; навантаження, що виникають під час пуско-гальмівного, перехідного та випробувального режимів роботи технологічного механізму. Значні динамічні ударні моменти призводять до погіршення стану елементів технологічного ланцюга, зниження показників якості технологічного процесу, опосередковано впливають на погіршення електричних характеристик ЕП і, як наслідок, виникнення аварійних ситуацій.

Проблема покращення виконання технологічного процесу за рахунок налаштування системи автоматизованого керування частотно-регульованого електропривода з використанням спеціальних алгоритмів робота під час контролю як електромеханічних параметрів електротехнічного обладнання, так і параметрів кінематичної ланки, на сьогодні дуже актуальна і розглядається в багатьох роботах різного напрямку [13, 14].

Технологічний комплекс має вбудовану систему автоматики, що забезпечує майже повний контроль та виконує керування технологічною операцією з фіксацією і зберіганням всіх подій і значень елементів контролю і керування.

В системі керованого електропривода перетворювач частоти (ПЧ) відіграє ключову роль, дозволяючи точно регулювати швидкість і момент обертання двигуна, що приводить в рух плити фільтр-пресу. Має простоту і зручність у застосуванні, розширені функціональні можливості налаштування, стійкість к кібератакам. Використання сучасних перетворювачів частоти, таких як ACS580, забезпечує високу ефективність і надійність роботи системи [15, 16].

Метою даної роботи є розробка алгоритму роботи автоматичної системи електропривода механізму переміщення плит фільтр-пресу під час виконання технологічної операції з урахуванням факторів, що впливають на формування моменту опору, за рахунок встановлення певних значень параметрів перетворювача частоти в реальному часі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічний комплекс фільтр-пресу ФКМ-500 має наступні технічні характеристики: напруга і частота мережі живлення – 3 ~ 50 Гц, 380 В; номінальний сумарний струм 80 А; двигун приводу затискання/розтискання (SIEMENS) – 22 кВт, 380 В, 50 Гц, 1465 об/хв, $I_n = 41,5$ А.

Динамічні навантаження під час роботи механізму пересування (рух плити по траверсі) виникають як у періоди розгону і гальмування, так і при переміщенні. Характер руху плити формується відповідно до режиму переміщення рухомого елемента по нерівному шляху, що викликано знаходженням робочого середовища на елементах, по яким виконується переміщення плити. Аналіз динамічної завантаженості є досить значним і впливає на формування перекосів сторін фільтру під час його переміщення при виконанні технологічної операції.

В роботі [12] наведено значення експериментальних досліджень завантаженості елементів переміщення фільтр-пресу, значення динамічних навантажень під час виконання типової технологічної операції змінюються в діапазоні 100÷280 Нм, номінальне значення моменту електроприводу – 143,4 Н. За експериментальними даними виконано математичний розрахунок результатів схематизації, встановлено щільність ймовірності (2) та тип ймовірнісного закону розподілу динамічних навантажень (3) під час виконання технологічної операції [12]. Також наведено графіки цих залежностей (рис. 1).

За законом Вейбулла залежності:

$$F(x_a) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x_a - 5}{87,64} \right)^{4,5} \right], \tag{2}$$

де x_a – амплітуд навантажень (а – номер кроку),

$$f(x_a) = \frac{4,5x_a^{3,5}}{87,64^{4,5}} \exp \left[- \left(\frac{x_a - 5}{87,64} \right)^{4,5} \right]. \tag{3}$$

За нормальним законом розподілення:

$$f(x_a) = \frac{1}{20,156 \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[- \frac{(x_a - 40)^2}{2 \cdot 20,156^2} \right], \tag{4}$$

$$F(x_a) = \frac{1}{20,156 \cdot \sqrt{2\pi}} \int_0^{x_a} \exp \left[- \frac{(x_a - 40)^2}{2 \cdot 20,156^2} \right] dx_a. \tag{5}$$

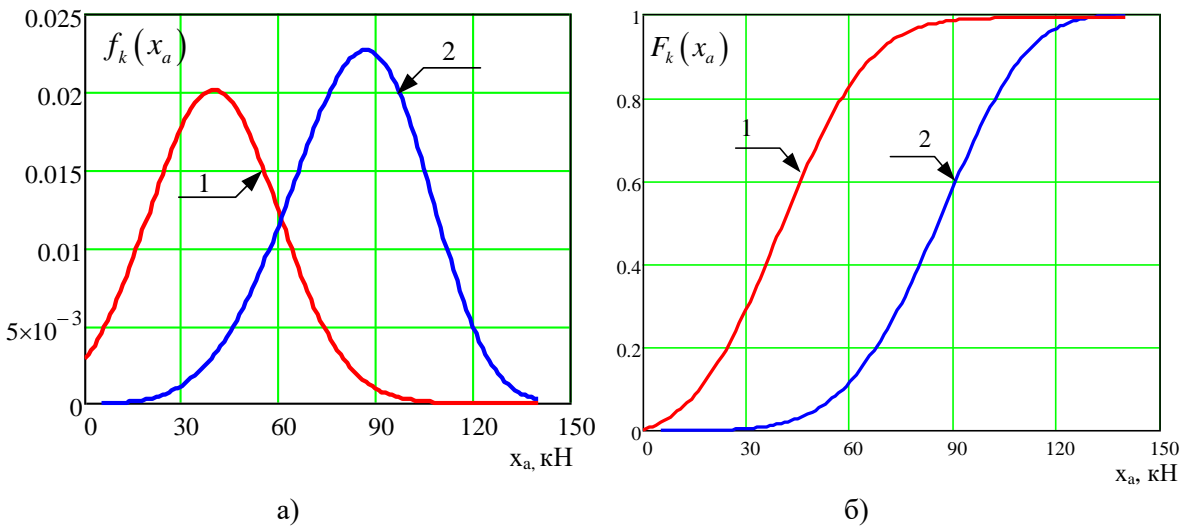


Рис. 1 – Графік щільності ймовірності (а) і функції розподілу (б) амплітуди навантаження (x_a) для схематизованого навантаження: 1 – нормальний закон; 2 – закон Вейбулла

Результати такої обробки використовуються для розробка алгоритму роботи електротехнічного устаткування технологічного обладнання і моделювання реального процесу навантаження під час розробки оптимальних режимів роботи системи електропривода і алгоритмів керування. Також під час розробки алгоритму керування ЕП механізму переміщення необхідно враховувати чинники, які впливають на виникнення аварійних ситуацій.

Виклад основного матеріалу. До табл. 1 зведено дані стосовно аварійних ситуацій та пошкоджень системи електропривода затискання/розтискання, що виникали під час виконання технологічної операції фільтр-преса ФКМ-500 за останній рік, інформація надано в процентному співвідношенні для наочного представлення.

Таблиця 1

Аварійні повідомлень, що надає система автоматики, та їх чинники

Опис пошкоджень	Умови виникнення	Кількість, %
Попередження – перевищено час силового дотискання	Перевищення моменту опору під час дотискання	17
Фільтр-прес не затиснутий	Стороннє середовище в затисканні	14
Двигун затискання/розтискання не відрегував на команду включення	Відсутній сигнал з датчика положення траверси	5
Двигун затискання/розтискання не відрегував на команду відключення		6
Аварія частотного перетворювача станції оливонасосної затискання/розтискання	Перевищення струму двигуна станції оливонасосної затискання/розтискання	7

Продовження таблиці 1

Опис пошкоджень	Умови виникнення	Кількість, %
Перевищено час розфіксування траверси штоками	Перевищення моменту опору	18
Схід із датчика Траверса в положенні для фіксації правим штоком	Перекося траверси	8
Сход із датчика Траверса в положенні для фіксації лівим штоком		8
Перевищено час змикання плит	Перевищення моменту опору	16

За результатами аналізу виконання технологічних операцій та ситуацій, що виникають, встановлено вимоги до керованої системи електропривода під час виконання технологічної операції для забезпечення безаварійної і ефективної роботи, а саме: при необхідності форсування пуску, тобто підвищення пускового моменту двигуна у разі необхідності формування підвищеного моменту рушення M_p ; штучного збільшення часу пуску з метою створення умов, що виключають термічні і механічні перенапруження, які виникають при форсованому пуску як в технологічному механізмі, так і в двигуні; створення фіксованих переміщень ротора з метою цілеспрямованого зменшення шкідливих складових статичного моменту; забезпечувати максимально допустимий момент двигуна для подолання сил опору елементів технологічного механізму; при необхідності формувати циклічність включення електропривода для виконання керованого покрокового переміщення робочого органу; за необхідності визначати час роботи зі значним перевантаженням по струму для створення достатнього пускового моменту.

Вірно задані вимоги щодо технологічних параметрів та показників якості роботи системи автоматизованого електропривода під час виконання технологічного процесу дозволяють забезпечити не тільки безаварійні режими роботи, а і значно підвищити продуктивність виконання робочого процесу [17-21].

Для розробки алгоритму роботи, який забезпечить безаварійний режим системи електропривода затискання/розтискання необхідно адаптувати і доповнити завдання алгоритму для перетворювача частоти, який формує силові параметри керування для асинхронної машини, що входить до системи електропривода.

В системах з підвищеними вимогами до динамічних або статичних характеристик регулювання вихідних змінних електроприводу, а також у випадках, коли регульованою змінною є момент, широке розповсюдження знайшли векторні системи керування асинхронними двигунами.

Для визначення параметрів частотного керування під час виконання технологічної операції зі змінним моментом опору було виконано математичне моделювання.

При дослідженні динамічних режимів на математичній моделі використовувалася стандартна математична модель АД [22, 23] з наступними параметрами: тип асинхронного двигуна – 1LE1502-1EB43-4AA4-Z; потужність – 22 кВт; напруга – 380 В; частота обертання – 1465 об/хв (153,3 1/с); кількість полюсів – 4; номінальний момент – 143,4 Н; номінальний струм двигуна (IE) – 42 А; співвідношення пусковий/номінальний струм – 6,9; співвідношення максимальний/номінальний момент – 3,2; співвідношення пусковий/номінальний момент – 2,5; ККД – 89,9%; момент інерції – 0,03; коефіцієнт потужності – 0,84. Рівняння електромагнітних процесів записано відносно потокозчеплення ротора та струму статора в синхронній ортогональній системі координат (d, q), орієнтованих за вектором потокозчеплення ротора. Для побудови графіків перехідних процесів використовуємо векторну та скалярну математичну модель системи електропривода.

Під час моделювання момент опору складався з двох складових, перша – це динамічні навантаження, що формуються за рахунок динамічних властивостей кінематичних пар самого технологічного механізму у вигляді пульсацій [12] і момент опору, що формується за рахунок залишкового середовища на напрямних траверси та зміни властивостей кінематичного ланцюга технологічного механізму. Математична залежність першої складової під час типового технологічного процесу враховує функції розподілу амплітуди навантаження за нормальним законом (3), а під час стопоріння – за законом Вейбулла (4).

Таким чином, момент опору в деякий час становить $M_c \leq 2,4M_{ном}$. Результати

математичного моделювання наведено на рис. 2-3.

Як видно з отриманих графіків, під час векторного керування швидкість залишається незмінною, за винятком короточасних швидкісних ривків, момент двигуна має значну швидкодію, що призводить до наявності ударних моментів, які негативно впливають на стан системи електропривода і можуть привести до перекосів плити та аварійних режимів в кінематичних елементах. Під час скалярного керування швидкість змінюється відповідно до моменту навантаження, але значно зменшуються ударні моменти за рахунок збільшення часу перехідного процесу, що для системи електропривода і кінематичного ланцюгу несуттєво, а для виконання даної технологічної операції є більш важливим тому, що попереджує виникнення перекосів та стопоріння.

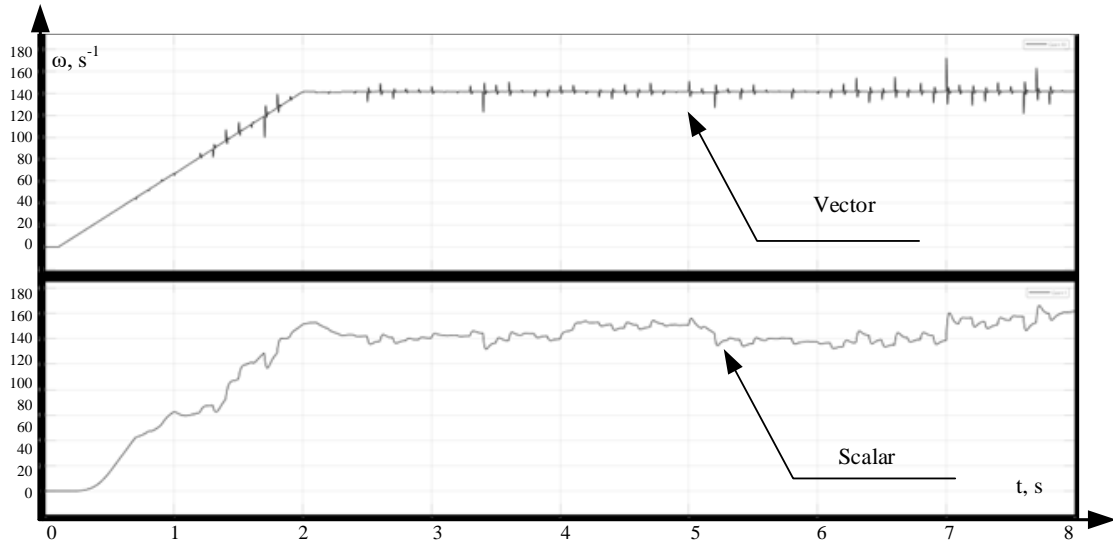


Рис. 2 – Перехідний процес за швидкістю двигуна

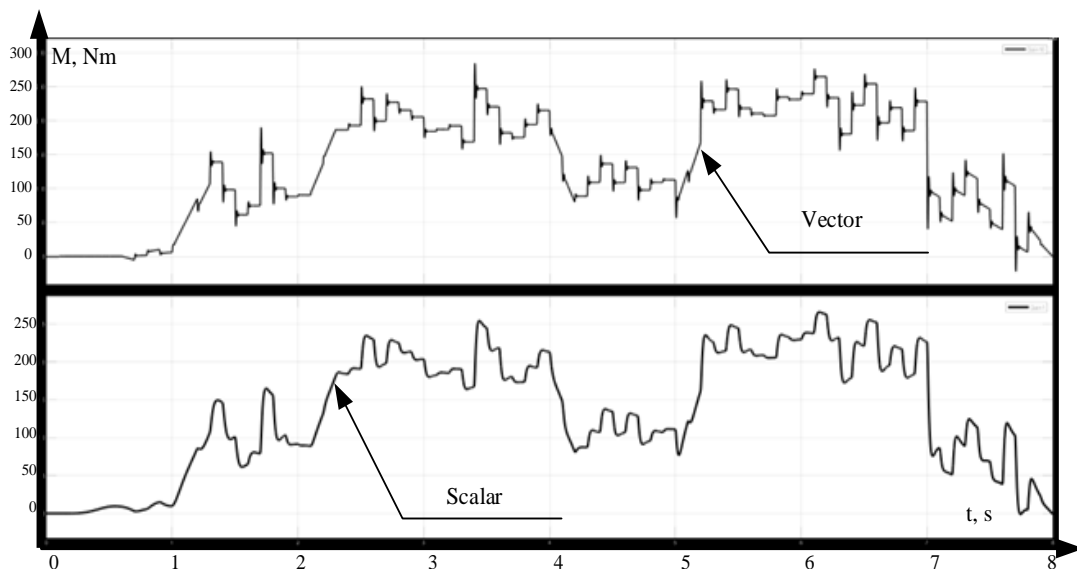


Рис. 3 – Перехідний процес за моментом двигуна під час змінного навантаження

З результатів моделювання системи прямого векторного керування можна зробити висновок, що при векторному керуванні відпрацювання математичної моделі сигналу завдання зменшується часу перехідного процесу на 2%, зменшення похибки регулювання – на 8%. Тобто векторне керування є більш точнішим та швидшим за скалярне, що гарантує ефективне виконання

типових режимів технологічного процесу. Але для здолання підвищеного моменту опору та запобігання стопоріння, що більш важливо, авторами пропонується використовувати методику формування моменту рушання та пуску, що було розглянуто у роботі [2, 13]. В роботах зазначено, що під час рушання та пуску отримання збільшеного пускового моменту на низьких частотах можна сформувавши за рахунок використання наступної залежності:

$$U/f^{1/\beta} = const, \quad (6)$$

де U – керована напруга живлення; f – керована частота напруги живлення; β – ступень, що визначає співвідношення частоти та напруги живлення під час скалярного частотного керування. Таке співвідношення можна отримати під час налаштування перетворювача частоти за рахунок використання функції «буст» (рис. 4, а). З урахуванням того, що пропонується використовувати кроковий режим переміщення плит фільтр-пресу, основний режим електропривода під час виконання цієї операції буде саме пуск і гальмування. Скалярне керування слід застосовувати під час забезпечення процесу керування моментом пуску та покроковим рухом двигуна з мінімальними ударними моментами та формування збільшеного моменту опору при необхідності під час пуску та переміщення робочого механізму.

Таким чином, за результатами аналізу математичного моделювання встановлено, що під час виконання технологічної операції з типовими режимами роботи слід використовувати векторне керування частотно-регульованого електропривода, а під час нетипових режимів (перекосів, стопоріння), коли необхідно сформувавши покрокове переміщення робочого органу або сформувавши підвищений керований момент ЕП, запропоновано використовувати скалярний режим частотного керування.

Для реалізації алгоритму роботи системи автоматизованого керування ЕП в нетипових режимах використовується вбудоване адаптивне програмування, що дозволяє надбудовувати функції приводу без використання спеціальних інструментів та мов програмування.

У табл. 2 наведено перелік завдань, що виконуються програмами-майстрами та відповідні параметри ПЧ для забезпечення налаштувань саме під час формування частотних режимів роботи ЕП. Майстер запуску визначає необхідну послідовність завдань залежно від обраного режиму роботи.

Один з важливих аспектів розробки алгоритму – це забезпечення його гнучкості та можливості легкої адаптації до змінних умов. Це може включати використання регуляторів зі змінними параметрами, що дозволяють швидко реагувати на зміни в роботі системи. Важливо також передбачити можливість ручного втручання в роботу системи у разі виникнення непередбачених ситуацій. Розробка алгоритму виконання технологічної операції переміщення плит фільтр-пресу включає кілька основних етапів: аналіз технологічного процесу; визначення основних параметрів, які необхідно контролювати під час роботи (швидкість, момент, положення плити); створення математичної моделі; розробка моделі, яка враховує кінематичні і динамічні характеристики системи; програмування алгоритму; реалізація алгоритму на основі зібраних даних і математичної моделі; тестування та налагодження; перевірка алгоритму на практиці, виявлення та виправлення можливих помилок [24].

Початок роботи системи електропривода розпочинається з ідентифікації параметрів двигуна, особливо це потрібно, коли використовується векторний закон частотного керування. Модель двигуна уточнюється щоразу під час пуску приводу після зміни параметрів двигуна. Після прогону автоматично встановлюється значення 0. Двигун має бути від'єднаний від механічного навантаження. Після визначення параметрів встановлюються робочі параметри системи керування.

Перетворювач частоти є складовою системи автоматики фільтр-преса ФКМ-500, тому джерело управління зовнішнє – панель керування (1001 (0 – 14)). Встановлюємо значення 8. Команди «Пуск»/«Стоп» та «Напрямок» подаються з панелі керування. Для керування напрямком обертання, в нашому випадку для забезпечення реверсу, необхідний параметр $1003 = 3$ (ВПЕРЕД, НАЗАД).

Таблиця 2

Перелік завдань, що виконуються під час роботи ПЧ

Найменування	Опис	Параметри, що встановлюються
Вибір мови	Вибирає мову	9901
Встановлення параметрів двигуна	Встановлення даних двигуна Виконує ідентифікацію двигуна (Якщо граничні значення швидкості виходять за допустимий діапазон: встановлення граничних значень)	9904...9909 9910
Прикладний макрос	Вибір прикладного макросу	9902
Дод. модулі	Активізація додаткових модулів	9802
Кер. швидкістю ЗОВНШ1	Вибір джерела завдання швидкості Встановлення граничних значень завдання Встановлення граничних значень (частоти) Встановлення часу прискорення/уповільнення	1103 1104, 1105 2001, 2002,(2007) 2202, 2203
Кер. Швидкістю ЗОВНШ2	Вибір джерела завдання швидкості Встановлення граничних значень завдання	1106 (13011303,3001) 1107, 1108
Керування моментом	Вибір джерела завдання крутного моменту Установка граничних значень завдання Установка часу наростання та спаду моменту	1106 (13011303,3001) 1107, 1108 2401, 2402
ПД-регулятор	Вибір джерела завдання регульованої величини Установка граничних значень завдання Встановлення граничних значень швидкості (завдання) Встановлення джерела та граничних значень регульованої величини	1106 (1301...1303, 3001) 1107, 1108 2001, 2002, (2007, 2008) 4016, 4018, 4019
Керування. Пуском/Стопом	Вибір джерела сигналів пуску та зупинки від двох зовнішніх пристроїв керування (ЗОВНШ1 та ЗОВНШ2) Вибір ЗОВНШ1 або ЗОВНШ2 Визначення режиму управління напрямком обертання Завдання режимів пуску та зупинки	1001, 1002 1102 1003 2101...2103
Таймерні функції	Вибір таймерних функцій Вибір керування пуском/зупинкою з використанням таймера для зовнішніх джерел керування ЗОВНШ1 і ЗОВНШ2 Вибір джерела керування ЗОВНШ1 / ЗОВНШ2 за часом Активізація режиму 1 Р _{вих} Вибір керування набором параметрів 1/2 ПД-регулятора за часом	Група 36: Таймерні функції 1001, 1002 1102 1401 4027
Захист	Установка граничних значень крутного моменту і струму	2003, 2017
Вихідні сигнали	Вибір сигналів, для індикації яких використовується релейний вихід Р _{вих} Вибір сигналів, для індикації яких використовується аналоговий вихід Встановлення мінімального та максимального рівня, а також масштабу та інверсії	Група 14 Релейні виходи Група 15 Аналогові виходи

Старт налаштувань починається з процесу самоналаштування приводу, який виконується заданим значенням параметру 9910. З урахування того, що алгоритм формує векторний та скалярні режими роботи електропривода, виконуємо вимірювання, що необхідні для визначення характеристик двигуна і створення його математичної моделі, що використовується потім для внутрішніх обчислень. Встановлено, що під час переходу з векторного режиму керування до скалярного значення параметру необхідно встановлювати значення 1 для стабілізації швидкості і значення 2 для стабілізації моменту. Значення 2 параметру 9910 встановлюється під час переходу на виконання запропонованої підпрограми керованого руху.

З урахування стохастичної складової моменту опору, що є наслідком залишку робочого середовища в напрямних траверси, де переміщається плита фільтр-пресу, обираємо векторний закон керування з забезпеченням моменту технологічного ланцюгу (9904=2), максимальний момент (2017=300%). Відповідно, максимальне значення струму асинхронного двигуна складає $2,0 I_{2hd}$ (9906=200%), авторами запропоновано обирати саме ці значення, а не ті, що встановлені за замовченням, як типові.

Двигун починає виконувати технологічну операцію. Під час виконання операції необхідно виконувати контроль переміщення плити фільтру по траверсі, а саме перевіряти встановлене значення довжини (S_m) переміщення плити. Якщо під час виконання технологічної операції переміщення припиняється, то алгоритм зупиняє роботу технологічного механізму і переходить на підпрограму алгоритму щодо виконання керованого переміщення зі здоланням стопоріння і заклинювання.

Для виконання запропонованої підпрограми необхідно виконати переналаштування перетворювача частоти на відповідні параметри.

Для виконання підпрограми керованого переміщення необхідно забезпечити постійний керований момент, для цього обираємо закон керування скалярний (9904=3) з квадратичним законом частотного керування (2605=2), який дозволяє отримати достатній момент двигуна $(1 \div 2,5)M_{ном}$ під час зниженої частоти напруги живлення і встановленні максимального «бусту» (рис. 4, а). Момент двигуна встановлюємо двома значеннями: перше – стандартне (2017=300%) и другу позначку встановлюємо до максимально можливого (2018=600%).

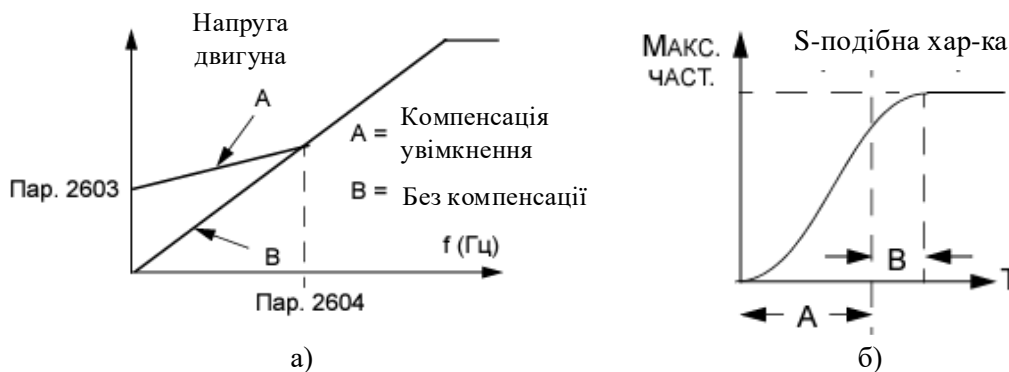


Рис. 4 – Візуалізація параметрів ПЧ: а – графік формування «Буст»; б – форма кривої прискорення/уповільнення: А = 2202 час прискорення; В = 2204 крива прискорення

З урахуванням того, що двигун буде виконувати пуск для підпрограми керованого переміщення під навантаженням, так як була виконана зупинка в процесі виконання технологічної операції, то необхідно сформувані достатній пусковий момент засобами частотно-регульованого електропривода, для цього встановлюємо початкове значення напруги живлення максимально можливим (2603=100 В) і максимально можливе значення струму (2110=300%).

Під час виконання керованого переміщення плити пресу необхідно сформувані підвищений момент двигуна. Для цього використовується налаштування параметру 2101 і встановлюється значення 4 (тільки для режиму скалярного керування). Частина алгоритму, що виконує керовані покрокові переміщення плити потребує в деяких випадках підвищення моменту. Такий

режим формується при запуску двигуна та завершується при частоті 20 Гц або в момент, коли вихідна частота зрівняється із заданою, що відповідає можливостям керуючого пристрою. Двигун попередньо намагнічується постійним струмом протягом часу, який задається під час налаштування параметра 2103.

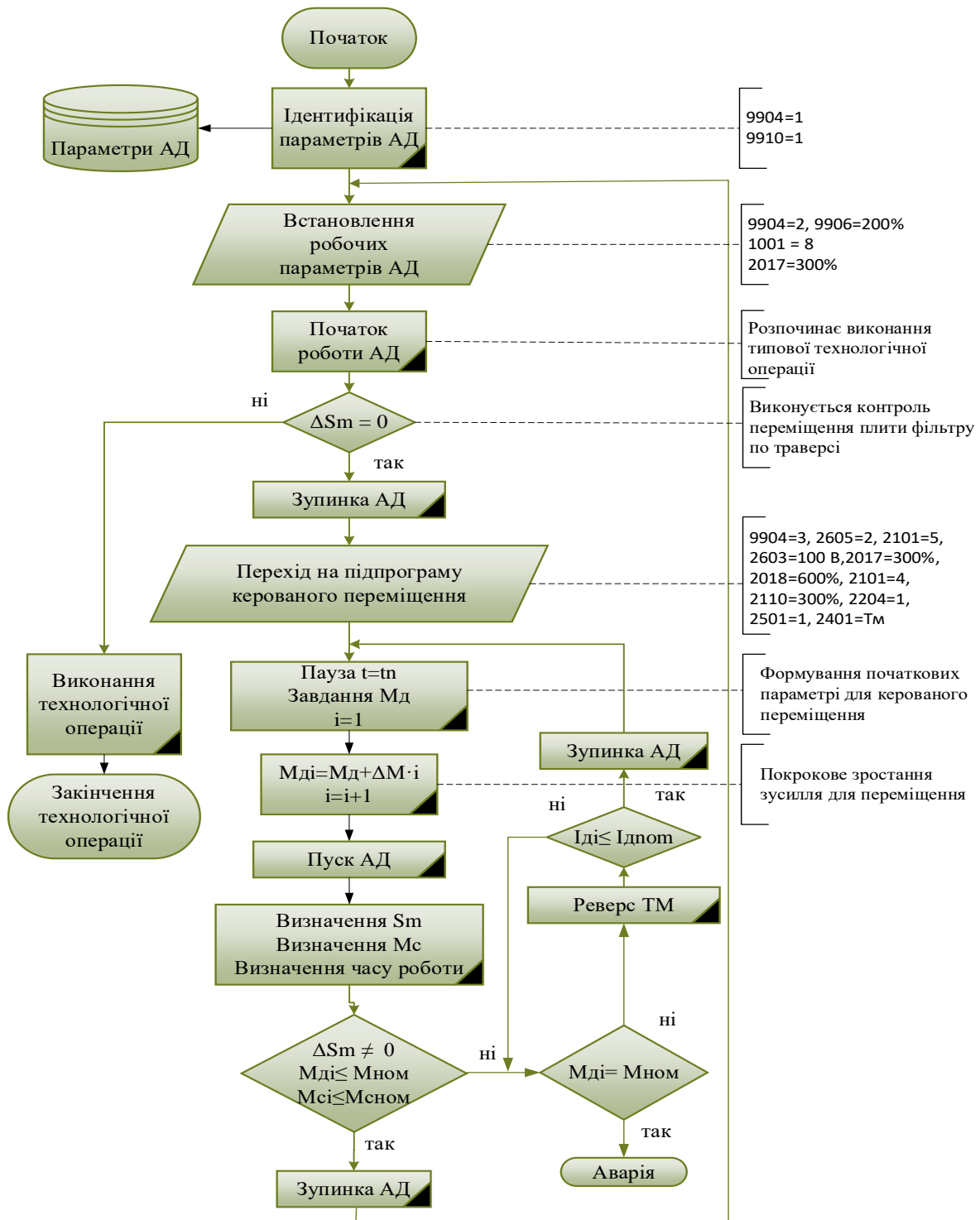


Рис. 5 – Алгоритм виконання технологічного процесу переміщення плити по траверсам фільтр-пресу

Для попередження динамічних ударів, під час перехідних режимів, вид прискорення обираємо як криву типу S-подібну ($2204=1$) (рис. 4, б). Час перехідного процесу для виконання контрольованого переміщення встановлюємо в співвідношенні до постійної електромеханічної системи електропривода ($120 \text{ с} \leq 2401 \geq T_m$) та налаштування параметру 2204 зі значенням 1.

Складна електромеханічна система має таке явище, як резонансні частоти. Резонансну частоту визначає момент інерції роботи двигуна і момент інерції навантаження, що приведено до валу двигуна. Під час виконання реального технологічного процесу явище резонансу викликає явне погіршення технічних характеристик елементів електротехнічного механізму.

З наведеного графіку щільності ймовірності динамічних навантажень (рис. 1) видно, на яких саме навантаженнях ця залежність має найбільше значення.

Тому під час виконання керованого переміщення з формуванням достатнього зусилля, запропоновано вилучити частоти, в яких навантаження елементів має значні параметри і співпадають з власними частотами коливань системи електропривода механізму переміщення ($2501=1$). Параметр 2501 задає увімкнення/вимкнення функції критичних швидкостей, що унеможливує роботу у певних діапазонах швидкостей. Значення 0 = відключення, 1 = включення. Цей параметр застосовується для заборони роботи на швидкостях, на яких виникає вібрація кінематичного ланцюга системи електропривода.

Після переналаштування перетворювача частоти алгоритм починає виконувати кероване переміщення. Процес переміщення виконується за циклом. Формується початковий момент ($M_{ді}$, $i = 1 \dots n$), якщо за встановлений час переміщення робочого органу не виконується ($\Delta S_m = 0$), момент двигуна не перевищує максимально можливий ($M_{ді} \leq M_{ном}$), то виконується наступний цикл, де момент двигуна збільшується на зазначений відсоток з урахуванням максимально допустимого значення (ΔM) і виконується повторна спроба виконання переміщення, з контрольним вимірюванням переміщення, часу роботи циклу і непрямим визначенням моменту опору технологічного механізму.

Якщо під час виконання підпрограми момент двигуна досягає номінального значення ($M_{ді} = M_{ном}$), а переміщення не виконується, то з'являється повідомлення про аварійну ситуацію. Алгоритм роботи та параметри налаштування ПЧ наведено на рис. 5.

Подальший напрям досліджень буде спрямований на розробку математичної моделі для відпрацювання розробленого алгоритму керування з урахуванням всіх чинників, що було розглянуто в наведеному матеріалі.

Висновки

За результатами аналізу попередніх досліджень визначено складові, що формують реальний момент опору технологічного механізму під час виконання як статичних, так і динамічних режимів роботи електроприводу.

Для визначення параметрів частотного керування під час виконання технологічної операції зі змінним моментом опору було виконано математичне моделювання на стандартній математичній моделі асинхронного двигуна для векторного і скалярного керування.

Математичні залежності щільності ймовірності та тип ймовірнісного закону розподілу динамічних навантажень використовуються для визначення власних частот коливань системи електропривода механізму переміщення для вилучення їх з параметрів роботи ПЧ.

Встановлено, що під час виконання технологічної операції з типовими режимами роботи слід використовувати векторне керування частотно-регульованого електропривода, а під час нетипових режимів (перекосів, стопоріння), коли необхідно сформулювати покрокове переміщення робочого органу або сформулювати підвищений керований момент ЕП, запропоновано використовувати скалярний режим частотного керування

Виконано аналіз можливостей налаштування перетворювача частоти ACS580, як елемента керування системи автоматики фільтр-преса ФКМ-500. Розглянуто функціональні можливості ПЧ, на базі яких розроблено алгоритм виконання технологічної операції переміщення з забезпеченням керованого формування зусилля для здолання стопоріння і заклинювання. Встановлена послідовність виконання кроків алгоритму, де виконується налаштування параметрів в реальному часі.

Розроблено алгоритм роботи автоматизованої системи електропривода на базі

перетворювача частоти ACS580 з урахуванням характеру зміни навантаження під час виконання технологічної операції та нетипових режимів роботи системи електропривода технологічного механізму затискання/розтискання плити фільтр-пресу.

Алгоритм складається з двох складових. Перша – виконання типового технологічного процесу з налаштуванням параметрів перетворювача частоти для цього. Друга підпрограма – це контрольоване покрокове збільшення моменту двигуна для здолання стропоріння та запобігання перекосів сторін плити, що переміщується, і, як наслідок, запобігання аварійних режимів.

Перелік використаних джерел:

1. Гладир А. І., Гомілко В. І. Система формування пускових характеристик електроприводів змінного струму з важкими умовами запуску. *Електроінформ.* 2005. №1. С. 17-19.
2. Хребтова О. А., Сергієнко С. А. Електропривід механізму підймання затвора зливної греблі з керованим процесом рушання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту.* 2017. № 2. С. 56-62.
3. Хребтова О. А., Сергієнко С. А. Дослідження властивостей системи електропривода механізму підйому затвора зливної греблі. *Електромеханічні та енергозберігаючі системи.* 2012. № 4/2012 (20). С. 63-69.
4. Evaluation of the technical condition of marine internal combustion engines according to parameters of the work process at modes other than nominal them / M. E. Rybalchenko et al. *Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance: Proceedings of 13th Int. Sci. and Pract. Conf., Kherson, 07-09 September 2022.* Kherson : Kherson State Maritime Academy. 2022. Pp. 20-24.
5. Research of an Automated Control System for the Technological Process of a Rolling Mill with the Application of the Electroplastic Effect / Khrebtova O., Zacheпа I., Zacheпа N., Khrebtov O. *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek),* Kharkiv, 2-6 Oct. 2023. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org.10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312941>.
6. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів / Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Кременчук : ЧП Щербатых А.В., 2019. 122 с.
7. Теоретична механіка. Статика і кінематика: навч. посіб. / Іскрицький В. М., Подлесний С. В., Водолазська О. Г., Єрфорт Ю. О. Краматорськ : ДДМА, 2007. 204 с.
8. Види навантажень, що діють на деталі машин. URL: <http://um.co.ua/1/1-1/1-13211.html> (дата звернення: 17.07.2024).
9. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: навч. посіб. Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І.Пулую, 2011. 322 с.
10. Starting System of Induction Motor with Dynamic Torque Control Powered by an Autonomous Sources of Energy Supply / Zacheпа I., Zacheпа N., Antonov M., Pyrozhok A. *2022 IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES),* Kremenchuk, 20-22 Oct. 2022. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org.10.1109/MEES58014.2022.10005708>.
11. Dynamics and strength of mechanisms, machines, and structures under the conditions of complex loading. Part 2: collective monograph. Series «Dynamics and Strength of Mechanisms, Machines, and Structures» / V. R. Pasika et al. Lviv: СПОЛІОМ, 2023. 168 p.
12. Khrebtova O., Zacheпа I., Zacheпа N. Dynamics Loads of the Automated Electric Drive for Moving FKM-500 Filter-Press Plates. *IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES),* Kremenchuk, 27-30 Sept. 2023. Pp. 1-5. DOI: <https://doi.org.10.1109/MEES61502.2023.10402505>.
13. Formation of Starting Torque of Double-Fed Induction Motor / O. Khrebtova et al. *Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice (PAEP) 2020: Proceedings of the 25th IEEE International Conference,* Kremenchuk, 21-25 Sept. 2020. Pp. 544-547. DOI: <https://doi.org.10.1109/PAEP49887.2020.9240786>.
14. The control of the traction asynchronous electric drive of the miner electric locomotive with dual-mode supply / D. Shokarov et al. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES),* Kremenchuk, 15-17 Nov. 2017. Pp. 52-55. DOI: <https://doi.org.10.1109/MEES.2017.8248950>.
15. Гелетій В. М., Кореңдій В. М., Пасіка В. Р. Визначення кінематичних і навантажувальних

- параметрів транспортних систем вертикального складування. *Підйомно-транспортна техніка*. 2023. № 1(68). С. 17-27. DOI: <https://doi.org/10.15276/pidtt.1.68.2023.02>.
16. Гудрамович В. Про основні наукові досягнення академіка В. І. Моссаковського в напрямку механіки деформівних твердих тіл і тонкостінних конструкцій. *Актуальні проблеми механіки суцільного середовища і міцності конструкцій*: тези доповідей Другої міжнародної науково-технічної конференції пам'яті академіка НАН України В. І. Моссаковського (до сторіччя від дня народження), м. Дніпро, 10-12 жовтня 2019. С. 23-24
 17. Карташов М. В. Імовірність, процеси, статистика : посібник. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. 494 с.
 18. Аналіз безпеки сервіс-орієнтованого програмування / Запрій І. В., Придибайло О. Б., Захаржевський А. Г., Полонський К. В. *Зв'язок*. 2021. № 5. С. 29-33. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2021.052933>.
 19. Kenjić D., Antić M., Anđelić T. Theoretical Aspects of Automatically Generated Service-Oriented Communication Between ADAS and IVI Domains. *2022 IEEE Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)*, Novi Sad, Serbia, 25-26 May 2022. Pp. 87-92. DOI: <https://doi.org/10.1109/ZINC55034.2022.9840567>.
 20. Автоматизація технологічного процесу переробки молока на базі програмованого логічного контролера VIPA / О. Хребтова та ін. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук : КрНУ, 2023. Вип. 1 (60). С. 50-60. DOI: <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.1.60.5>.
 21. Eckhardt H. D. Kinematic design of machines and mechanisms. New York : McGrawHill, 1998. 621 p.
 22. Лозінський А. О., Карплюк Л. Ф., Карплюк Б. Л. Дослідження частотно-регульованого електропривода зі змінним моментом інерції та навантаженням. *Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика*. 2006. № 66. С. 46-47.
 23. Запрій І. В., Сосновий В. О. Безпека мережі з використанням рекурентної нейромережі. *Зв'язок*. 2022. № 5. С. 21-24. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-9070.2022.0502124>.
 24. Перетворювачі частоти: їх види, переваги і недоліки, способи управління і застосування. ТОВ «Перша редукторна компанія». URL: <https://prk.com.ua/ua/a473092-preobrazovatelichastoty-vidy.html> (дата звернення: 18.07.2024).

References:

1. A. I. Gladyr, and V. I. Gomilko, «Systema formuvannia puskovykh kharakterystyk elektroprivodiv zminnoho strumu z vazhkymu umovamy zapusku» [«The system of formation of starting characteristics of alternating current electric drives with difficult starting conditions»], *Elektroinform – Electronic information*, no. 1, pp. 17-19, 2005. (Ukr.)
2. O.A. Khrebtova, and S.A. Sergienko, «Elektroprovod mekhanizmu pidiimannia zatvora zlyvnoi hrebli z kerovanyum protsesom rushannia» [«Electric wire of the mechanism for lifting the gate of the spillway dam with a controlled movement process»], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, no. 2, pp. 56-62, 2017. (Ukr.)
3. O.A. Khrebtova, and S.A. Sergienko, «Doslidzhennia vlastivostei systemy elektroprivoda mekhanizmu pidiomu zatvoru zlyvnoi hrebli» [«Study of the properties of the electric drive system of the lifting mechanism of the outlet gate»], *Elektromekhanichni y enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, no. 4/2012 (20), pp. 63-69, 2012. (Ukr.)
4. M.E. Rybalchenko, E.V. Bilousov, V.P. Savchuk, A.P. Marchenko, and G.Ya. Tuluchenko, «Evaluation of the technical condition of marine internal combustion engines according to parameters of the work process at modes other than nominal them», in Proc. 13th Int. Sci. and Pract. Conf. «Modern energy installations on transport and technologies and equipment for their maintenance», Kherson, 2022, pp. 20-24.
5. O. Khrebtova, I. Zachepa, N. Zachepa, and O. Khrebtov, «Research of an Automated Control System for the Technological Process of a Rolling Mill with the Application of the Electroplastic Effect», in Proc. IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-6. doi: [10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312941](https://doi.org/10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312941).
6. O. P. Cherny, Yu. V. Zachepa, V. K. Tytyuk, and O.A. Chorna, *Monitorynh i diahnostryka elektromekhanichnykh ob'ektiv* [Monitoring and diagnostics of electromechanical objects].

- Kremenchug, Ukraine: ChP Shcherbatykh A.V. Publ., 2019. (Ukr.)
7. V.M. Iskriksky, S.V. Podlesny, O.G. Vodolazska, and Y.O. Yerfort, *Teoretychna mekhanika. Statyka i kinematyka: navch. posib.* [Theoretical mechanics. Statics and kinematics: Study guide]. Kramatorsk, Ukraine: DDMA Publ., 2007. (Ukr.)
 8. Types of loads acting on machine parts. [Online]. Available: <http://um.co.ua/1/1-1/1-13211.html>. Accessed on: 17 July 2024. (Ukr.)
 9. O.V. Zakalov, and I.O. Zakalov, *Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh: navch. posib.* [Fundamentals of friction and wear in machines: Training manual]. Ternopil, Ukraine: Publishing House of TNTU named after I. Pulyuya, 2011. (Ukr.)
 10. I. Zacheпа, N. Zacheпа, M. Antonov, and A. Pyrozhok, «Starting System of Induction Motor with Dynamic Torque Control Powered by an Autonomous Sources of Energy Supply», in Proc. IEEE 4th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, 2022, pp. 1-6. doi: **10.1109/mees58014.2022.10005708**.
 11. V.R. Pasika, V.M. Heletiy, Ya.M. Novitskiy, B.V. Solohub, and Ya.Ya. Danylo, «Dynamics and strength of mechanisms, machines, and structures under the conditions of complex loading», in *Dynamics and Strength of Mechanisms, Machines, and Structures*, part 2. Lviv, Ukraine: SPOLOM Publ., 2023. (Ukr.)
 12. O. Khrebtova, I. Zacheпа, N. Zacheпа, A. Nekrasov, K. Pavlo, and O. Hrytsai, «Dynamics Loads of the Automated Electric Drive for Moving FKM-500 Filter-Press Plates», in Proc. IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES), Kremenchuk, 2023, pp. 1-5. doi: **10.1109/mees61502.2023.10402505**.
 13. O. Khrebtova, N. Zacheпа, I. Zacheпа, V. Prokopenko, and G. Mykhalchenko, «Formation of Starting Torque of Double-Fed Induction Motor», in Proc. 25th IEEE Int. Conf. on Problems of Automated Electric Drive. Theory and Practice, Kremenchuk, 2020, pp. 544-547. doi: **10.1109/paep49887.2020.9240786**.
 14. D. Shokarov, I. Zacheпа, N. Zacheпа, V. Chorna, and D. Susyk, «The control of the traction asynchronous electric drive of the miner electric locomotive with dual-mode supply», in Proc. International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, 2017, pp. 52-55. doi: **10.1109/mees.2017.8248950**.
 15. V.M. Geletii, V.M. Korendiy, and V.R. Pasika, «Vyznachennia kinematychnykh i navantazhuvannykh parametriv transportnykh system vertykalnoho skladuvannia» [«Determination of kinematic and loading parameters of transport systems of vertical storage»], *Pidiomno-transportna tekhnika – Hoisting and conveying equipment*, vol. 1(68), pp. 17-27, 2023. doi: **10.15276/pidtt.1.68.2023.02**. (Ukr.)
 16. V. Gudramovich, «Pro osnovni naukovi dosiahnennia akademika V. I. Mossakovskoho v napriamku mekhaniky deformivnykh tverdykh til i tonkostinnykh konstruksii» [«About the main scientific achievements of Academician V. I. Mossakovskii in the field of mechanics of deformable solids and thin-walled structures»], in Abstracts of reports of the II Int. Sci. and Tech. Conf. in memory of Academician of the NAS of Ukraine V. I. Mossakovskii «Current problems of continuum mechanics and structural strength». Dnipro, 2019, pp. 23-24. (Ukr.)
 17. M.V. Kartashov, *Imovirnist, protsesy, statystyka : posibnyk* [Probability, processes, statistics]. Kyiv, Ukraine: VOC «Kyiv University» Publ., 2008. (Ukr.)
 18. I.V. Zamrii, O.B. Prydybailo, A.G. Zakharzhevskiy, and K.V. Polonskyi, «Analiz bezpeky servisorientovanoho prohramuvannia» [«Security analysis of service-oriented programming»], *Zviazok – Connectivity*, no. 5, pp. 29-33, 2021. doi: **10.31673/2412-9070.2021.052933**. (Ukr.)
 19. D. Kenjić, M. Antić, and T. Anđelić, «Theoretical Aspects of Automatically Generated Service-Oriented Communication Between ADAS and IVI Domains», in Proc. IEEE Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC), Novi Sad, Serbia, 2022, pp. 87-92. doi: **10.1109/zinc55034.2022.9840567**.
 20. O. Khrebtova, Yu. Zacheпа, M. Radchenko, O. Khrebtov, and P. Kvitash, «Avtomatyzatsiia tekhnolohichnoho protsesu pererobky moloka na bazi prohramovanoho lohichnoho kontrolera VIPA» [«Automation of the technological process of milk processing based on the VIPA programmable logic controller»], *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, iss. 1(60), pp. 50-60, 2023. doi: **10.32782/2072-2052.2023.1.60.5**.

- (Ukr.)
21. H.D. Eckhardt, *Kinematic design of machines and mechanisms*. New York: McGrawHill Publ., 1998.
 22. A.O. Lozinskyi, L.F. Karpluk, and B.L. Karpluk, «Doslidzhennia chastotno-rehulovanoho elektropryvoda zi zminnym momentom inertsii ta navantazhenniam» [«Research of a frequency-controlled electric drive with a variable moment of inertia and load»], *Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriia i praktyka – Problems of the automated electric drive. Theory and practice*, no. 66, pp. 46-47, 2006. (Ukr.)
 23. I.V. Zamrii, and V.O. Sosnovy, «Bezpeka merezhi z vykorystanniam rekurentnoi neiromerezhi» [«Network security using a recurrent neural network»], *Zv'язok – Connectivity*, no. 5, pp. 21-24, 2022. doi: 10.31673/2412-9070.2022.0502124. (Ukr.)
 24. Frequency converters: their types, advantages and disadvantages, methods of management and application. LLC «First Gearbox Company». [Online]. Available: <https://prk.com.ua/ua/a473092-preobrazovateli-chastoty-vidy.html>. Accessed on: July 19 2024.

Стаття надійшла 21.10.2024

Стаття прийнята 17.12.2024

183 ТЕХНОЛОГІЯ ЗАХИСТУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 622.807:504.06

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321361

© Волошин В.С.¹, Бурко В.А.²

ВІДПОВІДНІСТЬ ПРИНЦИПУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ ДВОЄДНОСТІ, ЯК ПРИЧИНИ ВІДХОДОУТВОРЮВАННЯ

Мета дослідження – розробка та дослідження інноваційної технології управління виробничою системою, що дозволяє змінити якісну складову використовуваної енергії і мінімізувати ентропію технологічного процесу, за рахунок перерозподілу її в надсистему, що стає донором для нової енергії. Ця нова енергія здатна впливати на компоненти сировини, що не підлягають переробці за традиційною технологією, зменшуючи кількість відходів у джерелі їх виникнення.

Ключові слова: енергетичний баланс, ентропія, надсистема, якісна енергія, переробка відходів, сировина, технологічний процес, мінімізація відходів, екологічна ефективність, інноваційні технології.

V.S. Voloshyn, V.A. Burko. Improvement of individual protection equipment against falls from a height using the methods of focal objects and control questions. The purpose of the research is the development and research of an innovative production system management technology that allows changing the qualitative component of the used energy and minimizing the entropy of the technological process, due to its redistribution into the supersystem, which becomes a donor for new energy. This new energy is able to affect the components of raw materials that cannot be processed according to traditional technology, reducing the amount of waste at the source of their occurrence. A feature of the traditional technological process is the redistribution of the used energy by quality and its reservation for processing only that part of the raw materials, from which a marketable product is then obtained product. But at the same time, as a result of such borrowing of high-quality energy spent on the production of useful products, the share of entropy that settles in the spontaneously processed, but «unnecessary» material part of production - waste - increases. Ideas are presented for the development of waste management methodology at the source of their occurrence - the technological process. The basis of research is the principle of thermodynamic duality, which refers to the ratio of the component raw material base of the technological process and its energy capabilities at the limit of thermodynamic disequilibrium. The recognized range of parameters of the technological process within which the process of matching energy sources required for the technological process with the components of its raw material base in order to minimize waste is possible. The methodology for evaluating the last indicator allows you to objectively evaluate possible target modernizations in the technological process. As an indicator of scientific novelty, this approach is the basis of the method of determining the theoretical minimum of waste generation directed to the natural environment from the production sector. In the development of the principle of thermodynamic duality, methodological foundations are provided for identifying such an indicator as the theoretical minimum of waste generation in the technological process.

¹ д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-8423-2663, vsvlshn52@gmail.com

² канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-7384-4226, burko_v_a@pstu.edu

Keywords: *energy balance, entropy, supersystem, quality energy, waste processing, raw materials, technological process, waste minimization, ecological efficiency, innovative technologies.*

Постановка проблеми. В останній час з'явилися роботи, в яких доводиться взаємозалежність між термодинамічними процесами, що супроводять технології виробництва товарної продукції та виникнення відходів. Ці дані можуть бути об'єктивними, якщо вони можуть відповідати другому закону термодинаміки. А саме, знаходиться у відповідності до дисипативно-репаративних взаємодій, що стосується відношень в ієрархічно структурованих системах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні положення принципу термодинамічної двоєдності, який відповідає за механізми утворення відходів в будь-яких виробничих системах, стосуються розуміння того, що один і той же технологічний процес по відношенню до певної частини компонентів сировини проявляє себе як сильно нерівноважна система і функціонує за законами нелінійної термодинаміки і, в той же час, по відношенню до іншої частини сировини проявляє себе як слабо нерівноважна або така, що знаходиться в стані термодинамічної рівноваги і підкоряється законам лінійної термодинаміки [1]. Як результат, в системі з'являється готова продукція та відходи, відповідно. Такий принцип повинен повністю відповідати умовам другого закону термодинаміки, що має робити його легітимним в галузях будь-яких технологічних процесів. Підкреслюється дисипативно-репаративне сполучення енергетичних перетворень [2], що приводить до конструктивного результату, спрямованого на зниження ентропії системи таким чином, що $dS_U = dS_f^\pm + dS_i^\pm + dS_p^\pm \geq 0$. Індокси «*f*», «*i*», «*p*» позначають складові ентропії відкритої системи, а саме визначають її форму, інтенсивність і щільність, а знак (\pm) позначає вектор зміни ентропії, що стосується відповідної енергії дисипативного і репаративного напрямків відповідно [3].

Мета статті – встановлення можливості принципу термодинамічної двоєдності як прикладного механізму мінімізації промислових відходів у технологічних процесах шляхом перерозподілу якісної енергії всередині чи зовні системи.

Виклад основного матеріалу. Енергія, що використовується в будь-якому технологічному процесі, як правило, задіяна на отримання певних запрограмованих змін у стані тієї частини сировини, з якої потім отримується корисна продукція (рис. 1). Як правило ж ми не звертаємо уваги на те, що в традиційному технологічному процесі та ж сама енергія впливає і на інші компоненти сировини, до яких вона геть не запрограмована. Такий вплив цієї енергії призводить до зростання частки ентропії ΔS_o , що осідає в спонтанно переробленій, але «непотрібній» матеріальній частині виробництва – відходах.

Механізм такого перерозподілу ентропії між основними компонентами сировинної бази складає наступне: *закладена нами в готовий продукт негентропія збільшується за рахунок зростання ентропії решти матеріальної частини системи, і в першу чергу тієї, якій приписуються властивості відходів.* Це й складає суть принципу термодинамічної двоєдності у будь-якій виробничій системі відносно її сировинної компонентності.

В цій його частині, якщо це стосується об'єкту аналізу ентропії – неізольованої нерівноважної системи з певними як дисипативними, так і репаративними процесами перетворення енергії та речовин, вказаний принцип відповідає другому закону термодинаміки, який в інтегральному вигляді має бути як

$$\Delta S_k = \sum_k \Delta S_k^\pm \geq 0, \quad (1)$$

де ΔS_k^\pm відноситься до тієї з *k*-их властивостей, які в даній системі змінюються в дисипативному ($\Delta S_k^\pm > 0$) або репаративному ($\Delta S_k^\pm \leq 0$) напрямках.

У цьому сенсі, розуміння формули другого закону термодинаміки дозволяє зробити висновки, які раніше не використовувалися для опису механізмів утворення відходів у виробничих системах. А саме. Будь-який технологічний процес – це термодинамічно незамкнута та нерівноважна система, що відносно сировини поводить себе як механізм спонтанного перерозподілу ентропії між різними компонентами сировини.

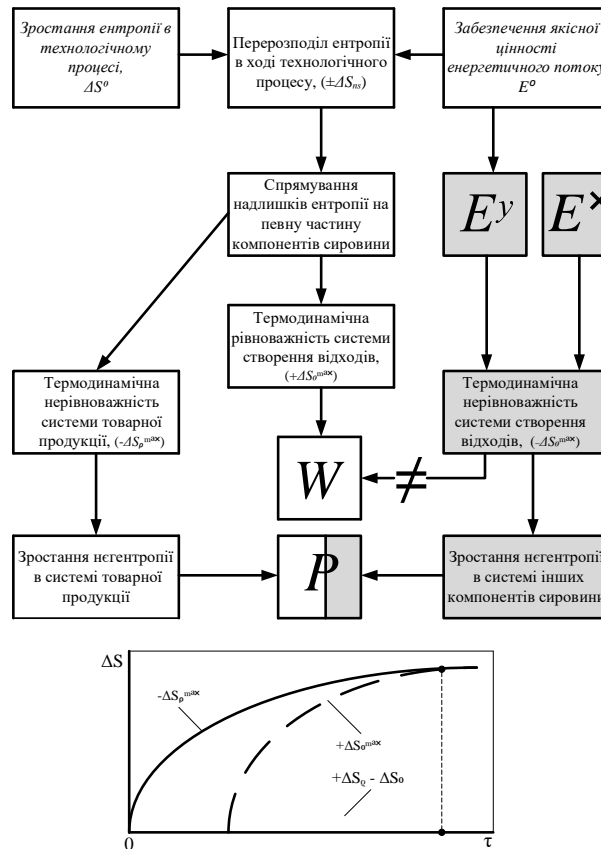


Рис. 1 – Умови перерозподілу ентропії і негентропії в процесі виробництва корисних продуктів та їх графічна інтерпретація

В результаті реалізації будь якого технологічного процесу, що має ознаки термодинамічно нерівноважної неізолюваної системи, відбувається наступна, вже знайома нам узагальнююча реструктуризація, до якої належить ця система (назвемо її i -тою системою) та яка сама має дві підсистеми ($i - 1$) – виробництво відходів та ($i - 2$) – виробництво корисної продукції, ентропії (рис. 2). Означимо, як ($i + 1$) назву надсистеми для нашого технологічного процесу. Для такої надсистеми загальна кількість ентропії ($S_{i+1}^0 + \Delta S_{i-2}$), згідно з другим законом, збільшується. Водночас відбувається перерозподіл ентропії між складовими компонентами виробничої системи, а саме: між тією, яка споживала енергію ($E_{i-2}^0 + \Delta E_2^x$) на перетворення «корисної» частини сировини у продукцію, з одного боку, і тією, для якої притаманна енергія ($E_{i-1}^0 + \Delta E_1^x$), як для «непотрібної» частин матеріального потоку сировинної бази з другого. Тут E^0 – базова енергія відповідних індексам підсистем; ΔE_1^x та ΔE_2^x – часткові долі зовнішньої енергії в двох підсистемах основної системи. Як правило, перерозподіл ентропії між компонентами матеріальної бази типової виробничої системи відбувається таким чином, що закладена нами в готовий продукт негентропія збільшується за рахунок зростання ентропії решти матеріальної частини системи, і, в першу чергу, тієї, якій приписуються властивості відходів (див. рис. 1). Це ще раз підтверджує існування термодинамічної двоєдності для будь-якої виробничої системи.

Якщо систему забезпечити певною внутрішньою енергією (E^y) або енергія подається ззовні (E^x) з надсистеми, яка здатна перевести залишкову частину сировини по відношенню до себе в термодинамічно сильно нерівноважний стан (див. табл. 1), то можна говорити про умовну емісію частки ентропії ΔS_{i-2} з цієї системи в надсистему, з якої ця енергія вийшла. В цьому випадку в системі з'являється робота, здатна перевести розглянуту частину сировини зі складу відходів до складу товарного продукту (див. рис. 2).

Ентропія надсистеми збільшується принаймні на перерозподілену величину ентропії відходів самої системи. За певних умов така емісія ентропії з системи до надсистеми перевищує межу ентропії самої системи, і тоді в цій системі можуть спостерігатися синергетичні ефекти. Це

саме той випадок, який належить принципу термодинамічної двоєдності і який не існує супротив другого закону термодинаміки, коли в системі з'являється додаткова (E^x) або існуюча, але модифікована (E^y) енергія, яка може змінити стан тих компонентів, які при традиційних умовах перетворюються у відходи. У нашому випадку умовна робота, що виконується цією енергією, буде більше, ніж в традиційному технологічному процесі, на величину не збільшення ентропії в підсистемі ($i - 1$), пов'язаної з утворенням відходів і її емісії в надсистему (див. рис. 2).

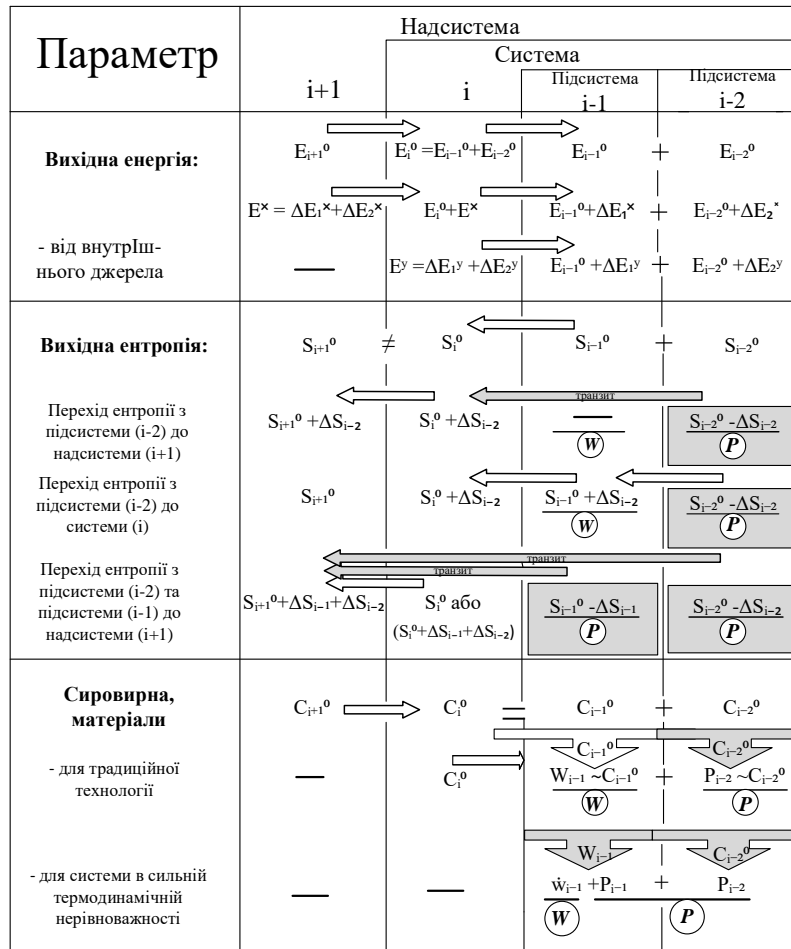


Рис. 2 – Актуалізація принципу термодинамічної двоєдності та управління перерозподілами ентропії між компонентами сировини в нерівноважних системах

Додаткова або модифікована зовнішня енергія $E^x = \Delta E_1^x + \Delta E_2^x$ у вигляді своїх частин ΔE_1^x і ΔE_2^x в певній пропорції витрачається на дві підсистеми – ($i - 1$) та ($i - 2$) (див. табл. 1). Можливий варіант, коли модифікація джерела енергії здійснюється за рахунок внутрішньої енергії такої системи $E^y = \Delta E_1^y + \Delta E_2^y$ також у певній пропорції для вказаних двох підсистем.

Додаткова енергія $E^x + E^y$ отримується за умовою емісії ентропії з кожної з двох підсистем шляхом «транзиту» в надсистему ($i + 1$) зі збільшенням її сумарної ентропії на величину $(\Delta S_{i-1} + \Delta S_{i-2})$. Ентропія двох наших підсистем ($i - 1$) і ($i - 2$) при цьому сумарно зменшується, відповідно, на ΔS_{i-1} та ΔS_{i-2} . Та й ентропія самої i -ї системи, принаймні, не збільшується. Хоча б, в кінцевому результаті, може й зменшитися на величину $(\Delta S_{i-1} + \Delta S_{i-2})$. Різниця між підведеною енергією та функціями ($f(\Delta S_{i-1})$ і $\varphi(\Delta S_{i-2})$), що нас цікавлять, її втрати у вигляді ентропії $(E^x + E^y) - [f(\Delta S_{i-1}) + \varphi(\Delta S_{i-2})]$, це й є додаткова робота, що здійснюється в підсистемах, що отримали сильну нерівноважність (див. рис. 2). У нашому випадку це робота щодо перетворення компонентів однієї з підсистем (наприклад, відходи – підсистема ($i - 1$)) в корисні продукти.

Будь-який технологічний процес спрямований на якісну зміну його матеріальної та енергетичної складової через свідоме перетворення компонентів сировинної бази. Чим нижча якість використовуваної енергії в співвідношенні опосередкованих теоретичних (e^0) і фактичних (e^ϕ) її витрат, тим вища відносна інтенсивність утворення відходів (рис. 3). І навпаки, зі зростанням якості фактично використовуваної енергії інтенсивність утворення відходів спадає за рахунок того, що ця енергія витрачається на переробку тієї частини сировини, яка в нормальних умовах перетворювалася би у відходи.

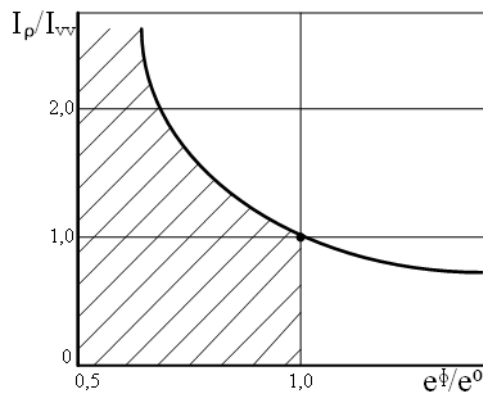


Рис. 3 – Вплив структури енергоспоживання на відносну інтенсивність утворення відходів e^0 і e^ϕ – теоретично обумовлений та фактичний рівень енергоспоживання приведений до об'єму ресурсу; I_p і I_w – інтенсивність утворення продукції та відходів, відповідно, приведена до їх маси

Якісне поліпшення енергії в цій частині має бути пов'язане в першу чергу з її впорядкуванням у структурі вироблених корисних продуктів за рахунок цілеспрямованої технології перетворення тільки частки сировини. Продукцію, що випускається, можна розглядати як підсистему, в структуру якої закладена якісна енергія даної виробничої системи.

На перший погляд, такі висновки слід застосувати і до перетворення іншої частини сировини, яка потім перетворюється у відходи. Однак це не так. Порядок переробки сировини, особливості фізичних, хімічних, механічних та інших процесів, що лежать в основі тієї чи іншої технології, найчастіше не сприяють використанню енергії певного типу, запозиченої ззовні, для впорядкування елементів тієї частини сировинної бази, яка стає відходами. Якість енергії, використовуваної в процесі виробництва для перетворення цієї другої частини сировини, практично ніколи не відповідає її структурі та якості, мало впливає і на якість її перетворення. Таким чином, у цю матеріальну частину системи закладається максимально можлива ентропія всього виробничого процесу (пов'язана з втратами як теплової енергії, так і неструктурованої речовини). Тому відмінною рисою системи, що відповідає за отримання відходів, може бути її термодинамічна рівноважність із максимальною ентропією (див. рис. 1).

Таким чином, основною властивістю відходів різного типу є не тільки їх низька споживча привабливість, але і те, що, потрапляючи в навколишнє середовище, вони є продуктами-носіями збільшення ентропійних процесів у цьому середовищі. У той же час будь-яка виробнича система є яскравою ілюстрацією сполучених дисипативно-репаративних процесів перетворення енергії і речовини [4, 9, 8]. Ми глибоко переконані, що саме вони є основою механізмів утворення відходів.

Резюмуючи вищесказане, можна зупинитися на деяких ознаках, які можна прийняти ґрунтовно принципу термодинамічної двоєдності як відповідні до другого закону термодинаміки і впливають з нього (табл. 1).

З такого співвідношення можна зробити висновок про те, що тільки сумісна взаємодія на структуру сировини та на якість джерел енергії в технологічному процесі дозволяє досягати можливого результату, а саме, змінити особливості та якість тих компонентів сировини, що раніше потрапляли до стану відходів.

Таблиця 1

Відповідність деяких ознак принципу термодинамічної двоєдності виробничої системи другому закону термодинаміки для відкритих систем

№№ п\п	Признак	Другий закон термодинаміки	Відповідність у принципі двоєдності
1	Поводження енергії	Транзит енергії відкритої системи в підсистему	Потрібність у додатковій енергії для переробки відходів
2	Поводження ентропії	Не збільшення ентропії відкритої системи та її емісія в надсистему	Видалення ентропії з системи з метою мінімізації відходів
3	Дисипативні процеси	Процеси втрати якості енергії при її витрачанні	Процеси переносу ентропії з продукції на відхід
4	Репаративні процеси	Процеси запозичення енергії та мінімізація ентропії в відкритій системі	Додаткова синергія відносно стану компонентів сировини, що відносяться до відходів
5	Дисипативно-репаративні взаємодії	Проява синергізму та максимальне використання якісної енергії в системі	Використання якісної енергії як для продукції, так і для дій щодо мінімізації відходів

В якості нового джерела енергії, крім основного, що бере участь в даному технологічному процесі, може виступати накладене поле різної якості: *синхронізуючий енергетичний сигнал, вторинний енергетичний вплив, енергетична модуляція сильного сигналу більш слабким, резонансний ефект і т. д.*, зокрема, представлені на рис. 4. З метою підвищення ефективності енергетичного впливу в технологічному процесі існують способи його послідовної модифікації, а саме забезпечення полем протилежного знаку, змінним у часі полем, високочастотним полем тієї ж якості, імпульсним енергетичним полем такої ж якості, як і основне. І, нарешті, поле резонансного стану по відношенню до початкового, якщо ми маємо справу зі змінними полями. Кожна з цих модифікацій дає технологам нові можливості впливати на склад вихідної сировинної бази технологічного процесу в напрямку переробки всіх її компонентів.

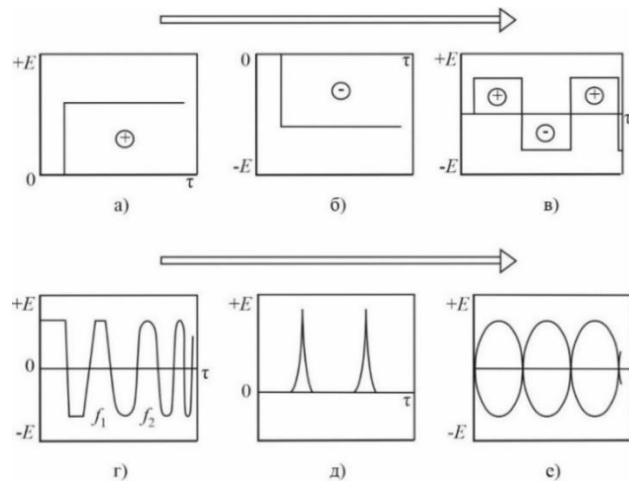


Рис. 4 – Лінія розвитку характеристик енергетичного поля, що бере участь у технологічному процесі: а) енергетичне поле постійного знаку; б) поле протилежного знаку; в) змінне енергетичне поле; г) високочастотне змінне поле; д) імпульсне енергетичне поле; е) резонансне частотне поле

Далеко не кожна нова енергія, задіяна в технологічному процесі, дозволяє мінімізувати одержувані відходи. Наприклад, відома в металургії практика модернізації мартенівських печей в 70-х роках минулого століття продувкою пічної ванни киснем і поява нового джерела теплової енергії – теплоти екзотермічних реакцій в зоні продувки, ніяк не вплинули на необхідну якісну

зміну складу і структури відходу – мартенівського шлаку, хоча і сприяли зниженню кількості чавуну, що подавалася у піч. Шлаки, як і раніше, залишаються лише інструментарієм для підвищення якості одержуваної сталі нових марок і, як і раніше, відходами. Причому більшість компонентів, що входили до складу чавуну (Si, Mn, P, S, V, Cr і ін.), підлягали більш інтенсивному окисленню і додатково збільшували кількість шлаку.

З таких позицій більш раціональним є приклад використання в доменному агрегаті нового покоління такого джерела енергії, як електричний струм і умови електролітичної дисоціації в зоні створення доменного шлаку, при спроможності для просторого розділу шлаків в нижній частині цього агрегату [5]. Безумовно, це потребує додаткових досліджень, але таке джерело здатне, принаймні, цілеспрямовано впливати на структуру доменного шлаку в напрямку мінімізації оксидів.

Ще одним прикладом є технологія розкрою листового металу [1], що здатна відійти від відхідної обрізи за рахунок нових джерел енергії, що використовуються в технології. Таких прикладів ще дуже обмаль, зокрема [6, 7, 10], але вони тим більш важливі в якості аргументації відносно мінімізації відходів у сучасних технологіях. Всі вони виглядають, як проява відомих дисипативно-репаративних процесів, в основі яких лежить емісія ентропії та скриті можливості для мінімізації відходів у будь-якому технологічному процесі.

Висновки

Ми маємо справу зі здатністю виробничої системи щодо перерозподілу якісної енергії всередині чи зовні системи з одночасним перерозподілом ентропії не в підсистему, що відповідає за отримання відходів, а в надсистему, яка стає донором для нової енергії, що здатна впливати на ті компоненти сировини, які не підлягають переробці за традиційною технологією. Для досягнення можливостей щодо мінімізації відходів у джерелі їх виникнення, технологічному процесі, мають бути створені умови для зміни якісної складової використовуваної енергії, мінімізувавши ентропію самого технологічного процесу, за рахунок викиду її в надсистему.

Перелік використаних джерел:

1. Волошин В. С. Природа отхообразования. Мариуполь : Видавництво «Рената», 2007. 666 с.
2. Prigogine I., George C. The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipative Processes in Quantum Systems. *Proceeding of the National Academy of Science*. 1983. Vol. 80. Pp. 4590-45945. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.80.14.4590>.
3. Prigogine I. Etude Thermodynamique des Phenomenes Irreversibles. These d'agregation presentee a la faculte des sciences de l'Unoversite Libre de Bruxelles. Paris: Dunon, 1947. 143 p.
4. Чаленко О. Ю. Самоорганізація, ентропія в природі та економіці. *Наука та інновації*. 2013. Т. 9. № 4. С. 13-24. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/114544>.
5. Johnson K. L. Thermodynamic Aspects of Industrial Waste Formation. *Journal of Industrial Ecology*. 2021. Vol. 25. Iss. 4, pp. 892-904. DOI: <https://doi.org/10.1111/jieec.13085>.
6. Zhang Y., Yang W. Thermodynamic Analysis of Resource Utilization and Waste Generation. *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 315. Pp. 128-139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128933>.
7. Волошин В. С. Щодо питання про методологію мінімізації відходів у джерелі їх виникнення – технологічному процесі. *Екологічні науки*. 2024. № 2(53). С. 114-122. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.17>.
8. Бутенко Е. О., Волошин В. С. Сучасні технології очищення стічних вод промислових підприємств. *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* : матеріали V Міжн. наук.-техн. конф., м. Львів, 11-13 жовтня 2023 р. Київ : Яроченко Я.В., 2023. С. 86-87.
9. Волошин В. С., Бутенко Е. О. Відносно питання про деякі нормативні вимоги щодо питної води. *Водопостачання і водовідведення: проектування, будівництво, експлуатація, моніторинг* : матеріали V Міжн. наук.-техн. конф., м. Львів, 11-13 жовтня 2023 р. Київ : Яроченко Я.В., 2023. С. 88-90.
10. Волошин В. С., Бурко В. А. Щодо питання про відповідність принципу термодинамічної двоедності, причини відходоутворювання, другому закону термодинаміки. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення*: зб. наук. статей XX Міжнародної науково-практичної

конференції, м. Харків, 19-20 вересня 2024 р. УКРНДІЕП, 2024. С. 160-169. URL: http://www.nieep.kharkov.ua/sites/default/files/konfer_2024.pdf.

References:

1. V.S. Voloshyn, *Pryroda otkhodoobrazovaniya* [The nature of waste formation]. Mariupol, Ukraine: Renata Publ., 2007. (Rus.)
2. I. Prigogine, and C. George, «The Second Law as a Selection Principle: The Microscopic Theory of Dissipative Processes in Quantum Systems», *Proceeding of the National Academy of Science*, vol. 80, pp. 4590-45945, 1983. doi: **10.1073/pnas.80.14.4590**.
3. I. Prigogine, «Etude Thermodynamique des Phenomenes Irreversibles», these d'agregation, la faculte des sciences de l'Unoversite Libre de Bruxelles. Paris, France: Dunon, 1947. (Fr.)
4. O.Y. Chalenko, «Samoorhanizatsiia, entropiia v pryrodі ta ekonomitsi» [«Self-organization, entropy in nature and economics»], *Nauka ta innovatsii – Science and Innovation*, vol. 9, № 4, pp. 13-24, 2013. (Ukr.)
5. K. L. Johnson, «Thermodynamic Aspects of Industrial Waste Formation», *Journal of Industrial Ecology*, vol. 25, iss. 4, pp. 892-904, 2021. doi: **10.1111/jiec.13085**.
6. Y. Zhang, and W. Yang, «Thermodynamic Analysis of Resource Utilization and Waste Generation», *Journal of Cleaner Production*, vol. 315, pp. 128-139, 2022. doi: **10.1016/j.jclepro.2021.128933**.
7. V.S. Voloshyn, «Shchodo pytannia pro metodolohiiu minimizatsii vidkhodiv u dzhereli yikh vynykennia – tekhnolohichnomu protsesi» [«On the question of the methodology of waste minimization at the source of occurrence»], *Ekolohichni nauky – Ecological Sciences*, № 2(53), pp. 114-122, 2024. doi: **10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.17**. (Ukr.)
8. E.O. Butenko, and V.S. Voloshyn, «Suchasni tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod promyslovykh pidpriemstv» [«Modern technologies for wastewater treatment of industrial enterprises»], in Proc. V Int. sci.-techn. conf. «Water supply and wastewater: design, construction, operation, monitoring», Lviv, 2023, pp. 86-87. (Ukr.)
9. V.S. Voloshyn, and E.O. Butenko, «Vidnosno pytannia pro deiaki normatyvni vymohy shchodo pytnoi vody» [«Regarding the question of some regulatory requirements for drinking water»], in Proc. V Int. sci.-techn. conf. «Water supply and wastewater: design, construction, operation, monitoring», Lviv, 2023, pp. 88-90. (Ukr.)
10. V.S. Voloshyn, and V.A. Burko, «Shchodo pytannia pro vidpovidnist pryntsypu termodynamichnoi dvoiednosti, prychyny vidkhodoutvoriuvannia, druhomu zakonu termodynamiky» [«Regarding the question of the compliance of the principle of thermodynamic duality, the cause of waste generation, with the second law of thermodynamics»], in Proc. XX Int. sci.-pract. conf. «Environmental safety: problems and solutions», Kharkiv, 2024, pp. 160-169.

Стаття надійшла 26.10.2024

Стаття прийнята 06.11.2024

УДК 504.06:504.05

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321363

© Волошин В.С.*

**ЧОМУ ЛЮДИНА ПОЧИНАЄ ПРОГРАВАТИ КОНКУРЕНЦІЮ
ЗА ТЕРМОДИНАМІЧНУ НЕРІВНОВАЖНІСТЬ, ЯК ФАКТОР РОЗВИТКУ
В НАВКОЛИШНЬОМУ ТЕХНОГЕННОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

У роботі запропоновано до розгляду деякі безпекові умови для людини в навколишньому природному середовищі, через її відношення до термодинамічної

* д-р техн. наук, професор, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-8423-2663, vsvlshn52@gmail.com

нерівноважності, розуміючи під цим критерієм можливість оцінки зміни ентропії в екосистемі. В якості методу аналізу беруться закономірності розвитку таких систем послідовно – в області термодинамічної рівноважності, слабкої термодинамічної нерівноважності і сильно нерівноважних систем. Для розрахунку таких співвідношень в ентропії запропоновано використовувати рівняння Л. Онсагера, закономірності, що покладені в основу теореми І. Пригожина, а також формули для обчислення ентропії К. Шеннона, які визначають взаємовідносини з ентропією для інформаційних систем. Аналізу підлягали дві великі групи екосистем, які мають вплив на стан навколишнього середовища, а саме: неорганічна або метало-металоїдна, з одного боку, і група систем з вуглецево-білковою основою, з початковим припущенням певної конкуренції між ними. Показано, що людина, як представник другої групи, в процесі свого розвитку зіткнулась з низкою техногенних процесів, які усувають її претензії на термодинамічну нерівноважність і, тим самим, зменшують її можливості для перспективного розвитку і зменшують її вплив на фактори техногенної безпеки. До них відносяться незворотні процеси техногенного забруднення навколишнього середовища, використання невідновлюваних мінеральних і органічних ресурсів, прояв технологічної інерції у виробництві, зменшення біорізноманіття з вини людини тощо. Однією з таких причин поступово стає залежність людини від властивостей і якостей глобального інформаційного простору, як нового техногенного фактора і його похідних, які при певних умовах можуть ставати здатними привести до небезпечного співвідношення між людиною та глобальним інформаційним простором (ГПП), як частин навколишнього середовища – нездатності для людини мінімізувати ентропію в процесі своєї діяльності. Особливості розвитку штучного інтелекту та ГПП як впливових техногенних факторів в навколишньому середовищі дають можливості для порівняння двох нових техногенних основ, що належать до окремих складових навколишнього середовища і що прийняті для аналізу в роботі, у відношенні до їх рівноправної конкуренції, яку людина ще не програла, але вже і не виграла.

Ключові слова: екологічна небезпека, навколишнє середовище, нові техногенні фактори, термодинамічна нерівноважність, ентропія, людина, штучний інтелект.

V.S. Voloshyn. Why is the human begins to lose the competition for thermodynamic disequilibrium as a factor of development in the technogenic environment. This work proposes to consider some safety conditions for humans in the environment, due to their relation to thermodynamic non-equilibrium, understanding this criterion as the possibility of estimating changes in entropy in the ecosystem. As a method of analysis, the regularities of development of such systems are taken sequentially—in the field of thermodynamic equilibrium, weak thermodynamic nonequilibrium, and strongly nonequilibrium systems. To calculate such ratios in entropy it is proposed to use the equations of L. Onsager, the regularities that form the basis of I. Prigogin's theorem, as well as formulas for calculating the entropy of K. Shannon, which determine the relationship with entropy for information systems. Two large groups of ecosystems that have an impact on the state of the environment were analyzed, namely: inorganic or metal-metalloid on the one hand, and a group of systems with a carbon-protein base, with the initial assumption of some competition between them. It is shown that man, as a representative of the second group, in the process of his development encountered a number of technogenic processes that aggravate its claims to thermodynamic disequilibrium and, thus, reduce its opportunities for long-term development and reduce its impact on technogenic safety factors. These include irreversible processes of man-made pollution of the environment, the use of non-renewable mineral and organic resources, the manifestation of technological inertia in production, the reduction of biodiversity due to the fault of humans, etc. One of these reasons is gradually becoming the dependence of man on the properties and qualities of the global information space, as a new man-made factor and its derivatives, which, under certain conditions, can become capable of leading to a dangerous relationship between man and HIP, as parts of the environment - the inability of a person to minimize entropy in the process of his activity.

Features of the development of artificial intelligence and HIP As influential man-made factors in the environment, they provide opportunities for comparison of two new man-made bases that belong to separate components of the environment, and which are accepted for analysis in the work, in relation to their equal competition, which man has not yet lost, but will not win.

Keywords: *environmental hazard, environment, new technogenic factors, thermodynamic disequilibrium, entropy, human, artificial intelligence.*

Постановка проблеми. Термодинамічна нерівноважність у навколишньому середовищі планети є своєрідним індикатором її розвитку. Тому умовна конкуренція між окремими складовими екосистемами за такі специфічні стани є надзвичайно актуальним показником для наземної природи в цілому і особливо для її техногенних складових. Беручи до уваги, що кожна з частин відомих екосистем на планеті по-різному прагне до розвитку, пов'язаного з отриманням і засвоєнням зовнішньої енергії, слід розуміти, що стан термодинамічної нерівноважності для них, як критерій такого розвитку та критерій захисту навколишнього середовища, підлягає спеціальному вивченню.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В технологіях охорони навколишнього середовища все частіше використовується такий показник, як глобальний інформаційний простір (ГІП), наслідки якого в суспільстві не обмежуються впливом на сучасні технології в промисловості, агрономії та ін. Позитивні та негативні впливи, що створює ГІП на людину, здавна обговорюються в науковій літературі. Зокрема, обговоренню підлягають інформаційні технології, що забезпечують розвиток людини, але які з відомих причин сприяють погіршенню стану навколишнього середовища. Поряд з відомими методами мінімізації відходів, захисту атмосферного і водного простору планети гостро постає питання про інформаційну безпеку людини як спосіб захисту навколишнього середовища. ГІП як спосіб впливу на безпеку навколишнього середовища є суто амбівалентним. Це системи оптимального управління виробництвом і економікою в цілому, аналізу і вільного доступу до статистики техногенного забруднення навколишнього середовища. Але це ще й глобальне інформаційне забруднення довкілля, яке вже проявляється своїми негативними наслідками для людини.

Нас цікавить вплив ГІП як техногенний фактор, на природні системи з позицій їх термодинамічної нерівноважності. Природа, умовно поділяючись на органічний і неорганічний світи, перебуває в постійній динамічній взаємодії. В основі такої взаємодії, в повній відповідності до другого закону термодинаміки, лежить термодинамічна нерівноважність систем, стани яких змінюються в часі від сильного нерівноважного стану до наближення до повного рівноважного стану в залежності від певних термодинамічних параметрів.

І якщо для систем неорганічного світу та його окремих складових – атмосфери, гідросфери та літосфери – термодинамічна рівновага є суттєво мінливим показником, що залежить від параметричного термодинамічного градієнта, і, у повній відповідності до теореми І. Пригожина, то біологічний світ не може існувати поза такої нерівноважності, випадання з якої означало б для нього припинення існування [1]. У той же час людина поступово стає одним з основних джерел формування термодинамічної нерівноважності на планеті, фактором збереження і концентрації сонячної енергії та обмеження її втрат у навколишній космос [2]. Стан термодинамічної нерівноважності може служити своєрідним, але ефективним критерієм розвитку відкритих екологічних систем. І показником такого розвитку може бути зміна ентропії таких систем. Чим далі екосистема від стану термодинамічної рівноважності і чим нижча її ентропія, тим більше у неї можливостей для власного розвитку. І навпаки, чим ближче система до стану термодинамічної рівноважності і чим вище її ентропійний потенціал росту, тим система менш здатна до розвитку. У загальному випадку співвідношення систем у стані термодинамічної нерівноваги є показником розвитку Природи на Землі. Чим більше локальних світів знаходиться в таких станах, тим різноманітніша Природа, тим більші перспективи її розвитку [3].

Існує безліч факторів як природних, так і штучних, які перешкоджають зростанню термодинамічної нерівноважності в природі [4]. Наприклад, до перших можна віднести природне охолодження ядра планети, деформацію озонового шару, проникнення жорсткого космічного випромінювання на земну поверхню [5]. До штучних факторів можна віднести всі техногенні впливи на природу. Самі техногенні системи також можуть перебувати в нерівноважному стані, але їм

часто потрібно незрівнянно більше енергії для підтримки нерівноважних станів, ніж природним системам [6].

Мета роботи – на основі оціночного аналізу зважених показників термодинамічної нерівноважності для різноманітних складових навколишнього середовища визначити вектор розвитку сучасного глобального інформаційного простору та його складових як конкуруючої для людини системи.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо поверхню нашої планети як екосистему, умовно поділену на неорганічний метало-металоїдний світ і світ біологічного різноманіття, що включає саму людину і все, що пов'язано з її існуванням. В енергетичному аспекті таку систему слід розглядати як стаціонарну, термодинамічно нерівноважну, яка має два джерела енергії – сонячне випромінювання і внутрішнє тепло планети. Обидва цих енергетичних потоки, що обозначені як J_1 та J_2 , для нашої системи ми прийемо як стаціонарні, зустрічні та не рівні нулю. Термодинамічні сили, які є джерелами цих потоків, в даному випадку це енергетичний потенціал випромінювання Стефана-Больцмана $X_1 \sim \left(\frac{0,01}{T^4}\right)$ від Сонця і тепловий градієнт Фур'є $X_2 \sim \left(\frac{1}{T}\right)$ від ядра планети, пов'язані таким чином, що виконується умова Л. Онсагера для утворення ентропії в слабко нерівноважних системах $\sigma = \sum_{\gamma} X_{\gamma} J_{\gamma}$. При цьому кожен γ -збудуючий потік J_{γ} є функцією термодинамічної сили, що викликає його, у відповідності до феноменологічних коефіцієнтів $L_{\gamma j}$ таким чином, що $J_{\gamma} = \sum_j L_{\gamma j} X_j$, де j – об'єкт прикладання дії потоку J_{γ} . Звернемося до того, що для умов справедливості лінійних феноменологічних співвідношень сумарне виробництво ентропії в стаціонарній лінійній слабко нерівноважній системі визначається як $\sigma = \sum_{j\gamma} L_{j\gamma} X_j X_{\gamma} > 0$. Такий аналіз застосовний там, де система відчуває спонтанний перехід від стану сильної нерівноважності до рівноважного стану.

І далі звернемося до відомої теореми І. Пригожина про мінімум дисипації по відношенню до відкритих екосистем [7]. З неї випливає, що в системах, що знаходяться поза термодинамічною рівноважністю, при достатньому надходженні енергії та речовини ззовні можуть виникати нові впорядковані структури. Ці структури зменшують локальну ентропію системи, хоча глобальна ентропія продовжує зростати. Джерелом зовнішньої енергії і речовини тут є Сонце та об'єкти космічної системи. А стан систем, що адаптуються під такі синергії, це саме стійка термодинамічна нерівноважність.

Показником прояву термодинамічної нерівноважності в екологічних системах є зміна градієнта термодинамічного (за І. Пригожином – хімічного) потенціалу $\delta\mu$, який виявляє напрям вектора зміни ентропії ΔS в системі. У цьому випадку теорему Пригожина для визначення зміни ентропії в системі за деяким переліком збудуючих факторів (γ) можна представити у вигляді

$$(\pm)\Delta S = \sum_{\gamma} [\sigma_{\gamma}(\Delta\tau) - J_{\gamma}\nabla\mu]\Delta\tau; \quad (1)$$

де: ΔS – вектор зміни ентропії в певному інтервалі часу $\Delta\tau$;

$\sigma_{\gamma}(\Delta\tau) = \sigma/\tau$ – внутрішня швидкість утворення ентропії по γ -збудуванню в інтервалі часу $\Delta\tau$;

J_{γ} – зовнішній потік речовини або енергії через γ -збудування;

$\nabla\mu = \left(\frac{\delta\mu}{\Delta x}, \frac{\delta\mu}{\Delta y}, \frac{\delta\mu}{\Delta z}\right)$ – градієнт термодинамічного (хімічного) потенціалу.

Тут вектор зміни ентропії для заданих γ -типів техногенних або природних збудувань показує напрямок швидкості мінімальної зміни ентропії при наявності зовнішнього потоку енергії або речовини. Ця методика зостосується там, де доводиться мати справу з системами, розташованими в стабільно нерівноважному термодинамічному стані. Але там, де головну роль в зміні ентропії відіграє тепла енергія, скористаємося класичним визначенням ентропії.

Важливим у наших розрахунках є зміна ентропії, яка стосується інформаційних систем, включаючи стільниковий зв'язок та інтернет, нейронні мережі та розвинені системи штучного інтелекту (AI). Тут за основу прийемо формулу Шеннона $H(x) = -\sum_{i=1}^n (P_i \log_2 P_i)$ – як кількість інформації що припадає на подію (x), тобто середнє значення ентропії події (bit). Співвідношення між енергетичною ентропією та інформаційною ентропією береться з умови $S = k_b \cdot H(x) = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot H(x)$, коли 1 bit = $9,57 \cdot 10^{-24}$ Дж/К.

Для порівняльного аналізу розрахункам підлягають екологічні системи, що включають природні явища, такі як геологічні, атмосферні та гідрологічні зміни енергії планети, теплообмін поверхні Землі з атмосферою і океанічною зоною, і окремо теплообмін планети з космічним простором. Крім того, розраховуються втрати енергії, які пов'язані з основними видами людської діяльності, включаючи промислову і сільськогосподарську діяльність, вплив на біорізноманітність, формування і підтримку глобальної інформаційної мережі і систем AI, з урахуванням інтегрального показника таких процесів.

Основні параметри для аналізу впливу умов термодинамічної нерівноважності по відношенню до глобальних геологічних, гідро- та атмосферних впливів, а також пов'язаних з ними біологічних систем, були отримані розрахунковим шляхом на основі даних робіт [8-26], а також за даними досліджень українських вчених Белявцева Р.Ю. (2012, 2016), Кутаса Р.І. (1978), Лебедева Т.С. (1980), Трипольського А.А. (2004), Гордієнко В.В. (2013). Використані джерела: World Bank. Global Infrastructure – (2017); U.S. Energy Information Administration (EIA-2021); World Energy Statistics (EIA-2022); NASA Earth Observatory. Earth's Energy Budget; IPCC – Climate Change – (2021); NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), World Meteorological Organization (WMO-2022); N-Habitat-2016; Urbanization and Development: Emerging Futures, (FAO-2020); Land Use in Agriculture ICMM-2020; Mining Contribution to Land Use. Температурні параметри в розрахунках вибиралися оціночно, виходячи з температурних градієнтів для ареалу впливу тієї чи іншої події, за даними літературних джерел [1, 10-14, 17, 20, 24, 26, 27], а також за даними NOAA, WMO, NASA Earth Observatory, EIA за різні роки спостережень, включаючи розрахунки. Зведені дані для аналізу представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Зведені дані деяких показників для розрахунку зміни ентропії в окремих нерівноважних системах на поверхні планети

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Сукупні енергетичні витрати на будівництво будівель та підтримку промислової та сільськогосподарської інфраструктури.	$5 \cdot 10^{23}$ Дж	Втрати енергії з Світового океану в атмосферу*.	$1,26 \cdot 10^{23}$ Дж/год
Енергетичні витрати на будівництво доріг та інших транспортних систем.	$10^{12} \div 10^{14}$ Дж/км	Енергетичні втрати від техногенної діяльності людини	$4,2 \cdot 10^{20}$ Дж/год
Сукупні енерговитрати при створенні людської інфраструктури з початку ХХ століття.	$10^{21} \div 10^{22}$ Дж	Розрахункове значення енергії, що викидається Землею в космічний простір	$2,39 \cdot 10^{17}$ Дж/год
Витрати енергії на утримання глобальних комп'ютерних центрів обробки даних	$2 \cdot 10^{18}$ Дж/год	Енергія сукупної біомаси в перерахунку на вуглець*	$9,35 \cdot 10^{21}$ Дж.
Сукупні енерговитрати на створення глобального інформаційного простору.	$3,3 \cdot 10^{20}$ Дж	Середньорічна температура та її діапазон на поверхні Землі	288К (185÷ 331К)
Енергетичні витрати для підтримки всього Інтернету, включаючи обробку, зберігання та передачу даних.	$1,4 \cdot 10^{19}$ Дж/год	Середньорічна температура і її діапазон по всьому Світовому океану	276,5К (275÷ 303К)
Енерговитрати для підтримки всіх інженерних мереж, що знаходяться в суспільному користуванні.	$6 \cdot 10^{20}$ Дж/год	Середньорічна температура за об'ємом атмосфери та її діапазон	288К (213÷ +329К)

Продовження таблиці 1

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Сумарні енерговитрати на створення всього штучного середовища на Землі, починаючи з древніх промислових епох і до наших днів.	$1,6 \cdot 10^{24}$ Дж	Поверхня планети, що покрита стільниковою мережею	$1,4 \cdot 10^{17}$ м ²
Енергетичні витрати на переробку всіх накопичених промислових і побутових відходів.	$(6 \div 8) \cdot 10^{20}$ Дж	Площа поверхні планети з доступом в інтернет	$3,7 \cdot 10^{16}$ м ²
Енергія, що виділяється при землетрусах на суші і в океані.*	$6 \cdot 10^{19}$ Дж/год	Площа території міст і інших населених пунктів	$3,5 \cdot 10^{15}$ м ²
Енергія, що виділяється в результаті вивержень вулканів.*	$1,5 \cdot (10^{18} \div 10^{19})$ Дж/год	Площі ріллі та земельних угідь	$5 \cdot 10^{16}$ м ²
Енергія, що виділяється найбільшими цунамі.*	$7,7 \cdot (10^{15} \div 10^{16})$ Дж/год	Площа, зайнята відкритими шахтами і кар'єрами	$5 \cdot 10^{14}$ м ²
Енергія, що виділяється при атмосферних явищах (грози, смерчі, циклони, урагани тощо).*	$2,5 \cdot 10^{21}$ Дж/год	Площа промислових і побутових техногенних скупчень	$2 \cdot 10^{14}$ м ²
Втрати енергії з поверхні суші в атмосферу Землі.*	$3,3 \cdot 10^{21}$ Дж/год	Площа суші на земній поверхні	$1,48 \cdot 10^{17}$ м ²

* - опосередкована оцінка

Розрахункові значення відносних показників зміщення вектора зміни ентропії (\pm) ΔS щодо повного виробництва ентропії σ при зовнішньому потоці збурюваної речовини або енергії J представлені на рис. 1. Зміна ентропії представлена в стані, зведеному до оціночної площі ареалу впливу тієї чи іншої енергетичної дії. Розрахунку піддавалися 62 історично відомих станів окремих органічних і неорганічних екосистем з найбільш суттєвим енергетичним впливом на планету. Зокрема, деякі з них такі.

1. Вибрані приклади та варіанти для аналізу.

Великий чилійський землетрус магнітудою 9,5 бала за Ріхтером. 1960. Оціночна енергетична інтервенція $1,4 \cdot 10^{19}$ Дж – (поз. 1). Виверження вулкана Тамбора, 1815. Оціночна вивільнена енергія $1,4 \cdot 10^{18}$ Дж (рік без літа) – (поз. 2). Виверження вулкана Тоба (Індонезія), 74000 років тому. Енергетична інтервенція $6,0 \cdot 10^{18}$ Дж – (поз. 3). Цунамі в Індійському океані 26.12.2004. Орієнтовна енергетична інтервенція $1,0 \cdot 10^{18}$ Дж – (поз. 4). Ураган «Патрисія», 2015 р. Орієнтовна звільнена енергія $1,5 \cdot 10^{18}$ Дж – (поз. 5). Тайфун ТИП, 1979. Оціночна енергетична інтервенція $1,0 \cdot 10^{18}$ Дж – (поз. 6). Суперциклон Одіша, 1999. Оціночна енергетична інтервенція $2,4 \cdot 10^{17}$ Дж – (поз. 7). Випробування «Цар-бомби» в СРСР, 1974. Розрахункова вивільнена енергія $2,1 \cdot 10^{17}$ Дж – (поз. 8). Синергія від сукупності появи штучних людських об'єктів та систем на планеті. Орієнтовна витрачена енергія – $1,6 \cdot 10^{23}$ Дж – (поз. 9). Проект перекидання вод з центрального і південного Китаю в північні провінції. Розрахункові енергетичні витрати проекту $8,4 \cdot 10^{16}$ Дж – (поз. 10). Енергетичні витрати за проектом гідроелектростанції «Три ущелини» в Китаї становлять $1,2 \cdot 10^{20}$ Дж, з річною потужністю $7,09 \cdot 10^{17}$ Дж/рік – (поз. 11). Енергетичний обмін (виробництво і передача, включаючи синергію) в сукупній біомасі планети в перерахунку на вуглець, $9,35 \cdot 10^{21}$ Дж – (поз. 12). Зменшення біорізноманіття з вини людини, в перерахунку на вуглець – $1,1 \cdot 10^{15}$ Дж – (поз. 13). Розрахункова енергетична інтервенція, необхідна для переробки всіх накопичених промислових і побутових відходів – $(6 \div 8) \cdot 10^{20}$ Дж – (поз. 14). Споживання невідновлюваних ресурсів. Орієнтовна енергія, що звільнилася $(3 \div 4) \cdot 10^{22}$ Дж – (поз. 15). Оцінковий розмір енергетичного втручання промислових викидів в атмосферу і

гідросферу $(1,5 \div 2,0) \cdot 10^{20}$ Дж – (поз. 16). Сукупні енергетичні інвестиції на створення глобального інформаційного простору $3,3 \cdot 10^{20}$ Дж/рік – (поз. 17). Енергетичні витрати на підтримання ГП $1,4 \cdot 10^{19}$ Дж/рік – (поз. 18).

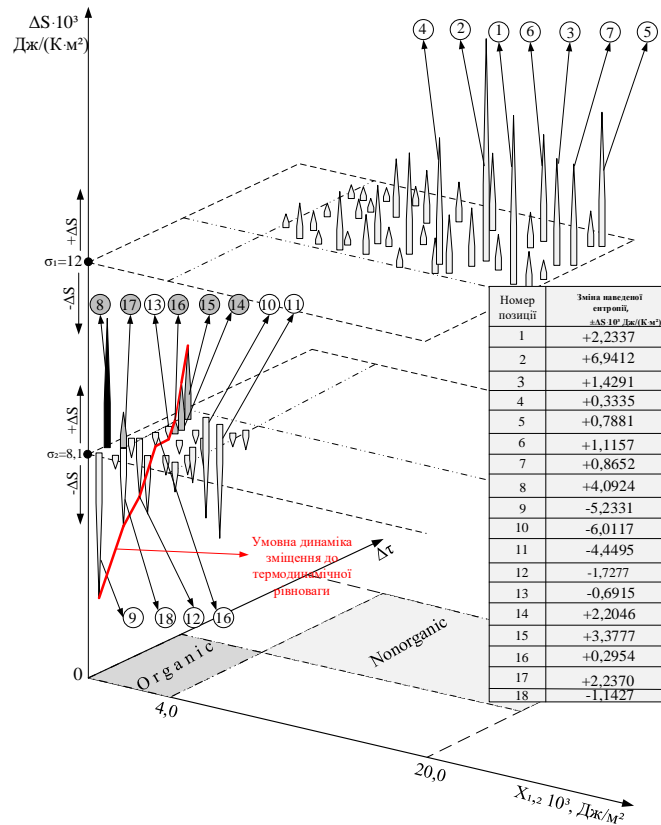


Рис. 1 – Результати параметричного розрахунку термодинамічної нерівноважності стану деяких природних та техногенних систем з навколишнього середовища (позначення в тексті). Темний колір вказує на явища, пов'язані з діяльністю людини в напрямку термодинамічної рівноважності

2. Для неорганічного світу.

Як правило, природні процеси, джерелом яких є потужні сили всередині планети, прагнуть привести систему в певний стан, близький до рівноваги, хоча б у визначеному часовому інтервалі Δt . Механізмами такого процесу є зрушення тектонічних плит і пов'язані з ними землетруси, вулканічна активність, а також циклони, урагани, цунамі і подібні великомасштабні явища (поз. 1-7, рис. 1). Вони пов'язані з ростом ентропії в напрямку рівноважності системи. Як правило, такі системи мають позитивно спрямовану зміну ентропії, зведеної до площі ареалу впливу в розрахунковому діапазоні від $+0,3 \cdot 10^3$ Дж/(К · м²) до $+6,9 \cdot 10^3$ Дж/(К · м²), а іноді і більше, при внутрішньому виробництві ентропії для таких систем $\sigma_1 = 12 \cdot 10^3$ Дж/(К · м²).

3. Для органічного світу.

3.1. Біологічні системи, як правило, розташовані далеко від стану термодинамічної рівноваги і прагнуть привести систему до максимально можливої термодинамічної нерівноважності. Це, перш за все, все, що пов'язано з фотосинтезом, виникненням і розвитком різноманітності вуглецево-білкової маси (поз. 12, рис. 1). Людина внесла свою лепту в цю термодинамічну нерівноважність, створивши власну інфраструктуру – міста, селища, сільськогосподарські системи різного роду, величезну кількість комунікаційних мереж – залізничної та автомобільної, інформаційно-комунікаційної та супутникової (поз. 9, рис. 1). У кожній такій системі завдяки людській праці локалізується певна вільна енергія, якій людина знаходить застосування у вигляді нових матеріалів, будівель, машин, енергетичних комунікацій для самих різних цілей, в тому числі, нових джерел енергії, яких раніше в природі не існувало. Тому стан термодинамічної нерівноваги є

надзвичайно актуальним як для всього вуглецево-білкового світу, так і для самої людини. Якщо оцінювати зниження відновленої ентропії для біологічних екосистем, то воно знаходиться в межах $\Delta S_i = (-0,69 \div -6,0) \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$, що можна порівняти як зі значенням внутрішнього виробництва ентропії для таких систем $\sigma_1 = 8,1 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$, так і з показниками зростання ентропії для неорганічних систем. Тобто білково-вуглецеві екосистеми більш спрямовані до максимальної термодинамічно нерівноважності, ніж неорганічні екосистеми, і людина відіграє тут не останню роль на планеті.

3.2. У процесі антропогенезу людина сформувалася, перш за все, як ще один умовний механізм збереження сонячної енергії на планеті [2]. Цю місію вона здійснювала завдяки своїй трудовій діяльності в різноманітних формах її прояву. Результатом, як правило, ставали синергетичні зміни в речовинах, що знаходяться навколо людського суспільства. Як «концентратор» сонячної енергії людина не могла не вступити в конкуренцію з природою за термодинамічно нерівноважні стани створених нею систем.

3.3. Першим сигналом для людини відносно дисипативних процесів стало забруднення навколишнього середовища, яке поступово набуло незворотного характеру, вже не підвладного природним механізмам утилізації. Маються на увазі промислові та побутові відходи (п. 14, рис. 1), забруднення атмосфери і водного басейну (п. 16, рис. 1), прояв технологічної інерції в самій діяльності людини [6], зменшення біорізноманіття у вуглецево-білковому світі (поз. 13, рис. 1) та ін. Зростання ентропії, викликане такою діяльністю людини, поступово перевищує енергетичні можливості екосистем щодо відновлення і підтримання нерівноважних станів. Тому конкуренція за термодинамічну нерівноважність повинна лежати в основі біологічного життя в цілому і для людини зокрема.

4. Глобальний інформаційний простір як користувач термодинамічної нерівноважності.

Ще однією, несподіваною і часто недооціненою, причиною спостережуваного зсуву процесів, пов'язаних з утриманням людського суспільства в сторону від термодинамічної нерівноважності, може бути поступове формування потужної інформаційної оболонки планети (на сьогоднішній день це вже мережа з майже 800 локальних і національних операторів і близько 8 млн базових станцій стільникового зв'язку, що постійно розвивається і забезпечує послуги зв'язку і доступу до ГПП в окремих країнах і регіонах для 95% населення планети [27]) і прагнення розвинути штучний інтелект (AI) як метало-металоїдну альтернативу біологічним системам (поз. 17 і 18, рис. 1). Для неї, несподівано, ентропія, яка складається з втрат енергії при створенні мережі і її інформаційної складової, розрахованої за формулою Шеннона, по відношенню до суб'єкта впливу – людини, стає різко позитивною $\Delta S_{17} = +2,23 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$, навіть при тому, що експлуатація таких систем в оціночному варіанті для територій зі стабільним інформаційним покриттям для мереж Інтернет, супроводжується синергетичними ефектами і зниженням сумарної ентропії на $\Delta S_{18} = -1,14 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$

5. Інтерпретація.

Пояснення цьому видно з наступного. Об'єктивність, що доступна людині, завжди знаходиться в межах досяжності її органів почуттів (зору, дотику, слуху і т. д.). Розум і знання дають людині уявлення про величезну кількість предметів і явищ, які знаходяться поза його органами почуттів, але мають реальний сенс без конкретної вербалізації. У цьому контексті ГПП відіграє дуже унікальну роль у системі «людина-машина». Він дозволив зробити віртуальність реальністю і розкріпачити наявну об'єктивність, раніше недосяжну для людини.

Глобальна інформація, як все більш самостійний суб'єкт, для якого людина поступово стає можливим об'єктом застосування, дозволила актуалізувати неймовірно велику кількість людських відчуттів, зробити світ ближче до його органів почуттів. Це безумовний позитив.

Для теми даної роботи негативним є те, що вперше синергетичним початком в даному процесі є не людина, а створена нею об'єктивна реальність – глобальний інформаційний простір і, зокрема, штучний інтелект, що генерується в його надрах, і який вже здатний перехопити ініціативу щодо розвитку напрямку на термодинамічну нерівноважність і мінімізацію ентропії в таких системах без ініціативи самої людини. Вперше умовна система «людина-машина» зіткнулася для себе з обов'язковим збільшенням ентропії і переміщенням її в напрямку термодинамічної рівноважності в порівнянні з тим існуючим, що було раніше створено людиною. Важливим тут є потенційна зміна ролі людини в причинно-наслідкових відносинах в системі «людина-машина». Від її суб'єктності до об'єктності.

Якщо приймати людину як суб'єкта інформаційних систем, то системні процеси впорядкування інформації призводять до зниження інформаційної ентропії, наприклад: за рахунок штучного інтелекту (AI) – на 15-20%; інтернету речей (IoS) – на 7-10%; Big Data – на 10-15%, навчальних систем типу DL або RL – на 20-25%, забезпечуючи загальне зниження ентропії на $4,4 \div 6,1$ Дж/К. При цьому сама інформаційна система прагне до максимального термодинамічного нерівноважного стану.

Але якщо прийняти людину як об'єкт впливу ГПП, то ті ж згадані системні процеси призводять до невпорядкованості інформації. Це сприяє зменшенню її структурованості і зростанню невизначеності в ГПП для людини як об'єкту впливу, підвищує ентропію людино-машинних систем, роблячи це зростання порівняним з ростом ентропії для багатьох природних явищ (див. рис. 1), а також із зниженням ентропії, характерної для біологічних систем, в тому числі і людини. В цьому випадку інформаційна система, яка включає людину і, зокрема, її AI, прагне до мінімальної термодинамічної нерівноважності. На це вказує наступна послідовність (від суб'єктності людини до її об'єктності):

- «людина замовляє для AI певний алгоритм за допомогою програмного продукту і AI його виконує»;

- «людина пропонує AI виконати певний алгоритм і отримує згоду на виконання»;

- «людина пропонує AI виконати певний алгоритм, але у системи є альтернатива – виконувати чи не виконувати».

По суті, для сучасної людини захист від об'єктності на користь суб'єктності стає домінуючою в конкуренції з AI і ГПП. В її основі лежить фундаментальна теза: «ми ще не знаємо, як змусити найдосконаліші системи штучного інтелекту поводитися так, як ми цього хочемо». Зокрема, лише одна частина цієї тези, що має назву *проблема специфікації* [28], полягає в тому, що важко точно визначити, що ми хочемо, щоб штучний інтелект робив. Наприклад, передбачається поділ проблеми на дві частини:

- суто технічну, що забезпечує здатність AI слідувати запропонованому людиною алгоритму, незважаючи на потенційну можливість виходу за межі цього алгоритму;

- соціальну, що розглядається як соціалізація того, що створюється за допомогою AI, але не належить до нього, а також можливі майбутні реакції AI на таку уявну нерівність і пов'язану з цим соціальну небезпеку для людини.

Відсутність вирішення таких та інших подібних проблем для людини означає небезпеку втрати претензій на частину термодинамічної нерівноважності в природі на користь глобальних інформаційних систем, у тому числі зі штучним інтелектом, а отже, і до втрати частини перспектив власного розвитку.

Висновки

Людина давно і поступово почала програвати конкуренцію за термодинамічну нерівноважність відносно навколишнього природного середовища через низку факторів, пов'язаних з техногенним впливом, а саме: зростання ентропії в техногенних системах, повільні темпи відновлення природних екосистем, виснаження невідновлюваних ресурсів, скорочення біорізноманіття тощо. Поява глобального інформаційного простору потребувало перегляду ролі та функції людини в таких системах, коли пріоритети в управлінні передаються від людини до суб'єктів з невичерпаною інформацією, обсяги якої роблять її незрівняними з людським мозком навіть з урахуванням його органів почуттів і когнитивності. Останнє починає поступатися своїми позиціями об'єктивності сприйняття і швидкості обробки інформації перед способами формального перебору варіантів, характерними для штучних носіїв інформації – комп'ютерних мереж і штучного інтелекту. Відповідним чином, нові умови поступово стають здатними самостійно перетворювати стани термодинамічної нерівноважності в напрямку від людини до власно метало-металоїдних систем з більш низьким рівнем ентропії, мінімізуючи відомі дисипативні процеси в системах «людина-машина-середовище».

Перелік використаних джерел:

1. Helgeson H. C. Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. *American Journal of Science*. 1979. № 277(7). Pp. 729-804. DOI: <https://doi.org/10.2475/ajs.267.7.729>.

2. Волошин В. С. Щодо питання про місце людини на Землі. Варіант дослідження. *Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення* : зб. наук. статей XIX Міжнародної науково-практичної конференції, м. Харків, 14-15 вересня 2023 р. С.118-130.
3. Nicolis G., Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations. New York, London, Sydney, Toronto, 1977. 141 p.
4. Lasaga A. C. Transition State Theory. *Reviews of Geophysics*. 1981. № 19(2). Pp. 201-232.
5. Powell R., Holland T. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program. *Journal of Metamorphic Geology*. 1988. № 6(2). Pp. 173-204. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.1988.tb00415.x>.
6. Волошин В. С. Відходи та їх природа. Маріуполь-Київ, 2024. 630 с.
7. Prigogine I. Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures. Wiley, John Wiley and Sons LTD, 2014. 560 p.
8. Корчин В. О. Зони низьких сейсмічних швидкостей в земній корі і їх петрофізичні особливості. *Геодинаміка*. 2011. № 2(11). С. 122-124.
9. Атлас «Геологія і корисні копалини». 1:5 000 000 / за ред. Л. С. Галецького. Київ: Вид. НАН України, Міністерства екології та природ. ресурсів України, 2001. 168 с.
10. Peixoto J. P., Oort A. H. Physics of Climate. New York : American Institute of Physics, 1992. 520 p.
11. Advancing Volcanic Activity Monitoring: A Near-Real-Time Approach with Remote Sensing Data Fusion for Radiative Power Estimation / G. S. Di Bella et al. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 16. Pp. 1-24. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16162879>.
12. Holton J. R., Hakim G. J. An Introduction to Dynamic Meteorology. 5 ed. Academic Press, Elsevier, 2013. 552 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-63394-8>.
13. Salby M. L. Physics of the Atmosphere and Climate. Cambridge University Press, 2012. 717 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139005265>.
14. Knauss J. A., Garfield N. Introduction to Physical Oceanography. 3-d ed. Waveland Press, 2005. 305 p.
15. Inverse Problems, Inverse Methods, and Inverse Models / Wunsch C., Kirk J., Henry J., Yager L. *Encyclopedia of Ocean Sciences*. 3-d ed. 2019. Pp. 502-512. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11262-X>.
16. Emery W. J., Thomson R. E. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. New York : Elsevier, 2001. 638 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66362-0>.
17. Morowitz H. J. Energy Flow in Biology: Biological Organization as a Problem in Thermal Physics. *The Journal of Applied Ecology*. 1969. Vol. 6. Iss. 3. Pp. 517.
18. Kauffman S. A. The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution. Oxford : Oxford University Press, 1993. 577 p. DOI: <https://doi.org/10.1093/oso/9780195079517.001.0001>.
19. Lineweaver C. H., Davies P. C., Ruse M. Complexity and the Arrow of Time. New York : Cambridge University Press, 2013. 352 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9781139225700>.
20. International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2022. Paris: OECD/IEA, 2022. 524 p.
21. Kanamori H., Brodsky E. E. The physics of earthquakes. *Reports on Progress in Physics*. 2004. Vol. 67(8). Pp. 1429-1496. DOI: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/67/8/R03>.
22. Emanuel K. A. Divine Wind: The History and Science of Hurricanes. Oxford University Press, 2005. 279 p.
23. Pielke R. A. Jr., Landsea C. W. Normalized Hurricane Damages in the United States: 1925-1995. *Weather and Forecasting*. 1998. Vol. 13(3). Pp. 621-631. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1998\)013<0621:NHDITU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1998)013<0621:NHDITU>2.0.CO;2).
24. Goody R. M. Sources and sinks of climate entropy. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2000. Vol. 126(569). Pp. 1953-1970. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49712656619>.
25. Bar-On Y. M., Phillips R., Milo R. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2018. Vol. 115(25). Pp. 6506-6511. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.171184211>.
26. Hoornweg D., Bhada-Tata P. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. World Bank, 2012. 439 p.

27. Report of the International Telecommunication Union on information and communication technologies statistics : note / by the Secretary-General. 2024. URL: <https://digitallibrary.un.org/record/515803?ln=ru&v=pdf> (дата звернення: 15.08.2024).
28. Russel S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4th ed. 1115 p.

References:

1. H.C. Helgeson, «Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures», *American Journal of Science*, № 277(7), pp. 729-804, 1979. doi: **10.2475/ajs.267.7.729**.
2. V.S. Voloshyn, «Shchodo pytannia pro mistse liudyny na Zemli. Variant doslidzhennia» [«Regarding the question of man's place on Earth. Research option»], in Proc. XIX Int. sci.-pract. conf. «Environmental safety: problems and solutions», Kharkiv, 2023, pp.118-130. (Ukr.)
3. G. Nicolis, and I. Prigogine, *Self-Organization in Nonequilibrium Systems. From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*. New York, London, Sydney, Toronto, 1977.
4. A.C. Lasaga, «Transition State Theory», *Reviews of Geophysics*, № 19(2), pp. 201-232, 1981.
5. R. Powell, and T. Holland, «An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 3. Applications to geobarometry, worked examples and a computer program», *Journal of Metamorphic Geology*, № 6(2), pp. 173-204, 1988. doi: **10.1111/j.1525-1314.1988.tb00415.x**.
6. V.S. Voloshyn, *Vidkhody ta yikh pryroda* [Waste and its nature]. Mariupol-Kyiv, Ukraine, 2024. (Ukr.)
7. I. Prigogine, *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. Wiley, John Wiley and Sons LTD, 2014.
8. V.O. Korchin, «Зони низьких сейсмічних швидкостей в земній корі і їх петрофізичні особливості» [«Low velocity zones in the earth crust and them petrophysical features»], *Heodynamika – Geodynamics*, № 2(11), pp. 122-124, 2011. (Ukr.)
9. L. S. Haletskyi, Ed. *Atlas «Heolohiia i korysni kopalyny». 1:5000000* [Atlas «Geology and Minerals». 1:5,000,000]. Kyiv, Ukraine: Publishing House of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine, 2001. (Ukr.)
10. J.P. Peixoto, and A.H. Oort, *Physics of Climate*. New York, USA: American Institute of Physics, 1992.
11. G.S. Di Bella, C. Corradino, S. Cariello, F. Torrisi, and C. Del Negro, «Advancing Volcanic Activity Monitoring: A Near-Real-Time Approach with Remote Sensing Data Fusion for Radiative Power Estimation», *Remote Sensing*, vol. 16, pp. 1-24, 2023. doi: **10.3390/rs16162879**.
12. J.R. Holton, and G.J. Hakim, *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 5 ed. Academic Press, Elsevier, 2013. doi: **10.1016/C2009-0-63394-8**.
13. M.L. Salby, *Physics of the Atmosphere and Climate*. Cambridge University Press, 2012. doi: **10.1017/CBO9781139005265**.
14. J.A. Knauss, and N. Garfield, *Introduction to Physical Oceanography*, 3-d ed. Waveland Press., 2005.
15. C. Wunsch, J. Kirk, J. Henry, and L. Yager, «Inverse Problems, Inverse Methods, and Inverse Models», *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 3-d ed., pp. 502-512, 2019. doi: **10.1016/B978-0-12-409548-9.11262-X**.
16. W.J. Emery, and R.E. Thomson, *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*, New York, UCA: Elsevier, 2001. doi: **10.1016/C2010-0-66362-0**.
17. H.J. Morowitz, «Energy Flow in Biology: Biological Organization as a Problem in Thermal Physics», *The Journal of Applied Ecology*, vol. 6, iss. 3, pp. 517, 1969.
18. S.A. Kauffman, *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*. Oxford, UK: Oxford University Press, 1993. doi: **10.1093/oso/9780195079517.001.0001**.
19. C.H. Lineweaver, P.C. Davies, and M. Ruse, *Complexity and the Arrow of Time*. New York, USA: Cambridge University Press Publ., 2013. doi: **10.1017/CBO9781139225700**.
20. *International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook 2022*. Paris, France: OECD/IEA Publ., 2022.
21. H. Kanamori, and E.E. Brodsky, «The physics of earthquakes», *Reports on Progress in Physics*, vol. 67(8), pp. 1429-1496, 2004. doi: **10.1088/0034-4885/67/8/R03**.
22. K.A. Emanuel, *Divine Wind: The History and Science of Hurricanes*. Oxford University Press Publ., 2005.

23. R.A.Jr. Pielke, and C.W. Landsea, «Normalized Hurricane Damages in the United States: 1925-1995», *Weather and Forecasting*, vol. 13(3), pp. 621-631, 1998. doi: **10.1175/1520-0434(1998)013<0621:NHDITU>2.0.CO;2**.
24. R.M. Goody, «Sources and sinks of climate entropy», *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 126(569), pp. 1953-1970, 2000. doi: **10.1002/qj.49712656619**.
25. Y.M. Bar-On, R. Phillips, and R. Milo, «The biomass distribution on Earth», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 115(25), pp. 6506-6511, 2018. doi: **10.1073/pnas.171184211**.
26. D. Hoornweg, and P. Bhada-Tata, *What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management*. World Bank, 2012.
27. Report of the International Telecommunication Union on information and communication technologies statistics : note / by the Secretary-General. 2024. [Online]. Available: <https://digitallibrary.un.org/record/515803?ln=ru&v=pdf>. Accessed on: August 15, 2024.
28. Russel S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th ed.

Стаття надійшла 19.10.2024

Стаття прийнята 05.11.2024

263 ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

УДК 628.5

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321366

© Мітіна Н.Б.¹, Плис М.М.², Когтєва О.П.³, Герасименко В.О.⁴,
Мініна Ю.О.⁵**ОБҐРУНТУВАННЯ ВПЛИВУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ТА ТОПОГРАФІЧНИХ
УМОВ НА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ХМАРИ ЗАБРУДНЕНОГО ПОВІТРЯ**

***Мета.** Обґрунтування суттєвого впливу метеорологічних умов та характеру місцевості (топографічні умови) на характер поведінки небезпечно хімічних речовин (НХР) в атмосфері (навколишньому середовищі) при аварії на хімічно-небезпечному об'єкті (ХНО) з її виливом (викидом) з урахуванням того, що ці умови можуть змінюватися у просторі і часі. **Методика.** Використані загальні та спеціальні методи теоретичних та розрахункових методів дослідження, нормативно-правові документи з охорони праці. **Висновки.** При зміні метеорологічних умов (ступеня вертикальної стійкості та швидкості вітру, температури повітря) змінюється також швидкість перенесення переднього фронту хмари зараженого повітря. Це, в свою чергу, змінює глибину перенесення повітряних мас і, відповідно, змінює масштаби зони фактичного хімічного забруднення. До основних змінних, що визначають формування рівня забруднення атмосфери, відносяться напрям переносу хмари НХР, швидкість їх перенесення, атмосферна стійкість і пов'язана з нею ступінь вертикального перемішування шкідливих домішок, термічний стан повітряної маси, від якого залежить початковий підйом викидів, вимивання НХР опадами, акумуляція їх у туманах, інерційний фактор. Зона хімічного забруднення – це територія, на якій небезпечні хімічні речовини перебувають в концентраціях, небезпечних для людини та інших живих організмів, що знаходяться в цій зоні. З урахуванням цього фактора і необхідно приймати рішення щодо рятувальних робіт, адже на кожній складовій ділянці забрудненої території будуть різні концентрації НХР. При виборі заходів та способів захисту населення необхідно враховувати не тільки фізико-хімічні та токсичні властивості НХР, масштаби забруднення, а і метеорологічні умови та характер місцевості, на якій будуть проводитися аварійно-рятувальні роботи. **Наукова новизна.** Запропоновано спосіб прогнозування впливу метеорологічних умов та характеристики місцевості за умов надзвичайної ситуації небезпечних хімічних речовин в приземному шарі атмосфери. Запропоновано доповнення до нормативних і правових документів з цивільного захисту. **Практична цінність.** Розроблені рекомендації сприятимуть врахування метеорологічних умов та характеру місцевості при прогнозуванні масштабів розповсюдження хмари забрудненого повітря при аварії з*

¹ канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-5384-7040, natalimitina0000@gmail.com

² викладач, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-8127-0077, plisbig@gmail.com

³ PhD, ст. викладач, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-7282-8243, olhakohtieva@gmail.com

⁴ канд. техн. наук, доцент, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0003-3369-4267, gerasim_vlad@ukr.net

⁵ асистент, Український державний університет науки та технологій, ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0001-9555-6471, mininayuliya1985@gmail.com

НХР та правовому регулюванню цивільного захисту з діючими нормами законодавства у сфері цивільної безпеки.

Ключові слова: методика, аварія, метеорологічні умови, прогнозування, небезпечно хімічні речовини, нормативно-правове забезпечення.

N. Mitina, M. Plys, O. Kohtieva, V. Herasymenko, Y. Minina. Substantiation of the influence of meteorological and topographical conditions on the spread of a cloud of polluted air. Objective. To substantiate the significant influence of meteorological conditions and terrain (topographic conditions) on the behaviour of hazardous chemicals (HCS) in the atmosphere (environment) in the event of an accident at a chemical hazardous facility (CHF) with its release (discharge), taking into account that these conditions can change in space and time. Methods. The general and special methods of theoretical and computational research methods, regulatory and legal documents on labour protection were used. Conclusions. Changes in meteorological conditions (degree of vertical stability and wind speed, downwind temperature) also change the speed of the contaminated air cloud front. This, in turn, changes the depth of the air mass transfer and, accordingly, changes the extent of the actual chemical contamination zone. The main variables that determine the formation of the level of atmospheric pollution include the direction of transfer of the cloud of HCHs, the speed of their transfer, atmospheric stability and the degree of vertical mixing of harmful impurities associated with it, the thermal state of the air mass, which determines the initial rise of emissions, the leaching of HCHs by precipitation, their accumulation in fogs, and the inertial factor. A chemical pollution zone is an area where hazardous chemicals are present in concentrations that are dangerous for humans and other living organisms in the area. This factor should be taken into account when making decisions on rescue operations, as each component part of the contaminated area will have different concentrations of HCS. When choosing measures and methods of protection of the population, it is necessary to take into account not only the physicochemical and toxic properties of CWA, the scale of contamination, but also meteorological conditions and the nature of the area where emergency rescue operations will be carried out. Scientific novelty. A method for predicting the impact of meteorological conditions and terrain characteristics in the event of an emergency situation with hazardous chemicals in the surface layer of the atmosphere is proposed. Additions to regulatory and legal documents on civil protection are proposed. Practical value. The developed recommendations will facilitate the consideration of meteorological conditions and terrain when predicting the extent of the spread of a cloud of contaminated air in the event of a CBR accident and the legal regulation of civil protection in accordance with the current norms of legislation in the field of civil security.

Keywords: methodology, accident, meteorological conditions, forecasting, hazardous chemicals, regulatory and legal support.

Постановка проблеми. При аварії на хімічно-небезпечному об'єкті (ХНО) з виливом (викидом) небезпечної хімічної речовини (НХР) її фізичні, хімічні та токсичні властивості та метеорологічні умови і характер місцевості (рослинний покрив, рельєф, забудова), вступаючи в певну взаємодію, утворюють хімічну обстановку. З метою вдосконалення порядку оцінки хімічної обстановки шляхом прогнозування масштабів забруднення в разі виникнення аварії з виливом (викидом) НХР із технологічних ємностей на хімічно небезпечних об'єктах, автомобільному, річковому, залізничному та трубопровідному транспорті, в 2019 році наказом МВС України введена в дію «Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті» (далі Методика 2019) [1].

В основу Методики 2019 покладено математичні розрахунки з використанням формул та розрахункових таблиць, параметрів, що характеризують технічні особливості ХНО, метеорологічні умови та характер навколишньої місцевості (метеорологічні та топографічні умови).

Методика 2019 застосовується для хімічних речовин, що перебувають у рідкому або газоподібному стані та при потраплянні в атмосферу утворюють хмару зараженого повітря

(первинну і вторинну). Розрахунки передбачається проводити для приземного шару повітря до висоти 10 м над поверхнею землі [1].

Аналіз останніх джерел та публікацій. У попередніх публікаціях [6-9] автори проаналізували суть прогнозування та недоліки зазначеної Методики 2019 в частині алгоритму математичних розрахунків та їх логічності і складності.

На необхідність врахування метеорологічних умов та характеру місцевості при прогнозуванні масштабів розповсюдження хмари забрудненого повітря при аварії з НХР в 1989 році вказала група фахівців в сфері цивільної оборони під керівництвом кандидата хімічних наук В.О. Владимірова [10].

Ґрунтовне дослідження особливостей розповсюдження небезпечних хімічних речовин в приземному шарі атмосфери за умов надзвичайної ситуації (НС) проведено О.О. Поповим та його колегами [11]. Ними встановлено, що найбільш визначальними факторами впливу на розподіл концентрації домішок є: режим та умови викиду, вид джерела, напрямок та швидкість вітру, стан атмосфери, хімічна взаємодія з іншими речовинами в атмосферному повітрі, гравітаційне осадження, вимивання опадами, поглинання підстильною поверхнею, рельєф місцевості. Предметом їх дослідження був промисловий майданчик атомної електростанції (АЕС). А тому є певні особливості впливу метеорологічних умов та характеру місцевості на забруднюючі речовини при їх попаданні в повітря: при аварії на АЕС забруднення повітря і його розповсюдження відбувається зверху вниз (небезпечні речовини викинуті вибухом), а при аварії з НХР (рідка чи газоподібна) – забруднення повітря відбувається знизу вгору.

Цікавою в контексті даної статті є і публікація О.М. Бортняка, М.П. Школьного та М.М. Осипчука, які констатували, що у разі постійних за обсягом та складом викидів в результаті зміни метеорологічних умов рівень забруднення атмосферного повітря може суттєво відрізнятися. Проведені дослідження на підприємстві нафтогазового комплексу дозволяють встановити закономірності такого впливу, що є важливим для проведення оцінки стану повітряного басейну, прогнозування можливого забруднення, підготовки документації якості атмосферного повітря та розроблення природоохоронних заходів [12].

Постановка проблеми. В Методиці 2019 вказано на необхідність (і тільки!) враховувати метеорологічні та топографічні умови (фактори), але не дається пояснення та обґрунтування такої необхідності і суті процесів, що відбуваються під час їх взаємодії з фізичними, хімічними та токсичними властивостями НХР.

Мета статті – обґрунтування суттєвого впливу метеорологічних умов та характеру місцевості (топографічні умови) на характер поведінки НХР в атмосфері (навколишньому середовищі) при аварії на ХНО з її виливом (викидом) з урахуванням того, що ці умови можуть змінюватися у просторі і часі.

Виклад основного матеріалу.

Методика. Використані загальні та спеціальні методи теоретичних та розрахункових методів дослідження, нормативно-правові документи.

Результати. Розглянемо загальні відомості про місцевість та погоду. В контексті поставленої теми під поняттям «місцевість» розуміється будь-яка ділянка земної поверхні з усіма її топографічними елементами, де може виникати (виникає) надзвичайна ситуація з характерними для них факторами, що в тій чи іншій мірі можуть впливати на ураження населення і територій і на якій плануються (будуть проводитися) відповідні заходи з ліквідації наслідків НС, захисту населення і територій.

Погода – стан атмосфери, що постійно змінюється, в певному місці і в певний час з урахуванням температурних умов, величини опромінення земної поверхні сонячним світлом, наявності або відсутності опадів (дощ, град, сніг, туман і т. п.), сили вітру. Тобто погода характеризується: температурою повітря та ґрунту, атмосферним тиском, швидкістю та напрямом вітру, вологістю повітря, хмарністю, опадами, але не як окремо взятими елементами, а їх сукупністю, бо всі вони взаємозв'язані та взаємозалежні [5]. Офіційно, погода – це фізичний стан атмосфери в конкретний проміжок часу, що визначається сукупністю атмосферних явищ у конкретному районі [3, 4].

Метеорологічні умови (фактори), названі в Методиці 2019: ступінь вертикальної стійкості повітря; температура повітря; швидкість та напрямок вітру. Топографічні умови (фактори),

названі в Методиці 2019: види рослинності (лісиста, лісисто-степова, степова, напівпустинна); типи лісів (листяні, хвойні, змішані); види рельєфу (рівнинний, рівнинно-хвилястий, горбисто-балочний, горбистий, передгір'я).

При прогнозах поширення НХР зазвичай враховують і рівень вертикальної стійкості приземних шарів атмосфери (СВСП). У цих обставинах стають актуальними такі процеси, як інверсія та ізотермія, які забезпечують збереження високої концентрації НХР у приземному шарі атмосфери та поширення хмари зараженого повітря на значні відстані. Ступінь вертикальної стійкості приземного шару повітряних потоків визначається найчастіше за даними прогнозу погоди [1, додаток 3].

Інверсія (рис. 1) – ступень вертикальної стійкості повітря в приземному шарі, за якого температура поверхні ґрунту менша за температуру повітря на висоті 1-10 м від поверхні. Виникає в ясну погоду за малої швидкості вітру (до 4 м/с) приблизно за годину до заходу сонця та зникає впродовж години після сходу сонця [1].



Рис. 1 – Інверсія

Як відомо, у приземному шарі температура повітря зі збільшенням висоти всупереч усім законам замість зниження підвищується. Найчастіше це інверсійний процес, який відбувається через те, що влітку, в безвітряні ночі, потоки повітря від нагрітої за день земної поверхні піднімаються вгору, а охолоджене на висоті 20-40 м повітря опускається вниз. Затримуючий шар заважає розвитку вертикальних рухів повітря, у зв'язку з чим під ним часто накопичуються пил і водяні пари і, як наслідок, формуються шари туману або диму. Інверсія не сприяє розсіюванню по висоті та утворює найбільш відповідні умови для збереження та поширення високих концентрацій НХР. Ізотермія (рис. 2) – ступінь вертикальної стійкості повітря в приземному шарі, за якого температура поверхні ґрунту дорівнює температурі повітря на висоті 1-10 м від поверхні. Зазвичай спостерігається в хмарну погоду і за снігового покриву [1].



Рис. 2 – Ізотермія

Для ізотермії більш властиві стабільність температури повітря в деякому атмосферному шарі та, відповідно, стабільні рівноважні стани повітря. Отже, ізотермія, в основному, типова для похмурої погоди і, як правило, виникає в ранкові та вечірні години. Також як і інверсія, ізотермія

сприяє тривалому застою аерозолів та пари токсичних речовин у населених пунктах, у промислових зонах, у лісах та парках.

Конвекція (рис. 3) – ступінь вертикальної стійкості повітря в приземному шарі, за якого температура поверхні ґрунту більша за температуру повітря на висоті 1-10 м від поверхні. Виникає в ясну погоду за малої швидкості вітру (до 4 м/с) приблизно через 2 години після сходу сонця і руйнується приблизно за 2-2,5 години до заходу сонця [1].



Рис. 3 – Конвекція

Конвекція – процес вертикального переміщення повітряних мас з одних висот на інші, який визначає рух теплішого повітря вгору, а холодного, що є більш щільним, – вниз. Зазвичай таке явище, що має назву конвекції, можна спостерігати влітку в денні години за безвітряної і ясної погоди. Потоки повітря, що піднімаються вгору, розсіюють хмару токсичних речовин, що перешкоджає поширенню аварійно-хімічно небезпечних речовин. Конвекція викликає розсіювання зараженої хмари, тобто зниження концентрації парів отруйних речовин. З цього випливає, що головну роль у поширенні хмари отруйних речовин відіграють три важливі атмосферні процеси: інверсія, ізотермія та конвекція.

Прогнозування хімічної обстановки та її оцінка за довгостроковим прогнозуванням передбачає, перш за все, визначення ступеня хімічної небезпеки ХНО та адміністративно-територіальної одиниці (АТО). При аварійному прогнозуванні та оцінці хімічної обстановки необхідно більш точно та конкретно враховувати особливості місцевості (а вона в різних частинах прогнозованої зони хімічного забруднення може бути різною) та конкретні метеорологічні умови (рис. 4), що значною мірою буде впливати на зміст рішення щодо організації та проведення аварійно-рятувальних робіт. Для підтвердження факту зміни глибини розповсюдження хмари забрудненого повітря в залежності від метеорологічних умов та характеру місцевості проведено математичне дослідження (прогнозування), наслідки якого представлені в таблицях 1, 2.

Таблиця 1

Глибина розповсюдження первинної хмари забрудненого повітря (хмари НХР), км, хлор, 20 т., період року літо

Характер місцевості: Рослинність/Рельєф	Ступінь вертикальної стійкості повітря								
	Інверсія			Ізотермія			Конвекція		
	Швидкість вітру, м/с								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
+30° С									
Степова/Горбистий	5,38	4,88	3,75	1,80	1,70	1,34	0,72	0,50	0,42
Ліс (лист.)/Рівнинний	6,72	6,10	4,69	2,42	2,27	1,79	1,08	0,76	0,63
+20° С									
Степова/Горбистий	3,84	3,49	2,68	1,30	1,22	0,96	0,53	0,36	0,30
Ліс (лист.)/Рівнинний	4,80	4,36	3,35	1,73	1,62	1,28	0,77	0,55	0,45

За наслідками прогнозу (математичні розрахунки для первинної хмари НХР – табл. 1) та характеру схеми прогнозованої зони хімічного забруднення (рис. 4) маємо:

- зміну глибини розповсюдження первинної хмари забрудненого повітря ($\Gamma_{ПХ-1}$) в залежності від зміни метеорологічних умов з коефіцієнтом зменшення ($K_{ЗМ-1}$);
- зміну глибини розповсюдження первинної хмари забрудненого повітря ($\Gamma_{ПХ-2}$) в залежності від зміни характеру місцевості з коефіцієнтом зменшення ($K_{ЗМ-2}$).

Таблиця 2

Коефіцієнти зменшення глибини розповсюдження первинної хмари забрудненого повітря в залежності від зміни метеорологічних умов та характеру місцевості

Характер місцевості: Рослинність/Рельєф	Ступінь вертикальної стійкості повітря								
	Інверсія			Ізотермія			Конвекція		
	Швидкість вітру, м/с								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Степова/Горбистий	Середнє значення глибини – $\Gamma_{ПХ-1} / K_{ЗМ-1}$								
	При +30 °С								
	4,67/1,0			1,6/2,9			0,55/8,5		
	При +20 °С								
	3,34/1,0			1,16/2,87			0,39/8,56		
Ліс (лист.)/Рівнинний	Середнє значення глибини – $\Gamma_{ПХ-2} / K_{ЗМ-2}$								
	При +30 °С								
	5,84/1,0			2,16/2,7			0,82/7,12		
	При +20 °С								
	4,17/1,0			1,54/2,7			0,59/7,06		

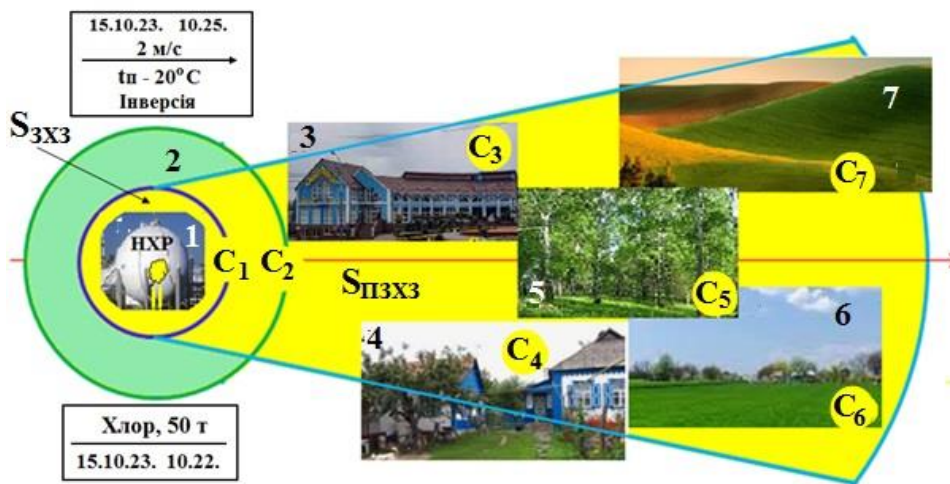


Рис. 4 – Схема прогнозованої зони хімічного забруднення: 1 – хімічно небезпечний об’єкт – промислова зона; 2 – санітарно-захисна зона; 3 – забудова, місто; 4 – забудова, село; 5 – ліс листяний; 6 – рівнинна місцевість; 7 – горбиста місцевість; $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$ – концентрації НХР в різних точках прогнозованої зони хімічного забруднення.

Глибина зони поширення забрудненого повітря залежить від концентрації НХР та швидкості вітру. Наприклад, при швидкості вітру 1 м/с за одну годину хмара від місця аварії переміститься на 5-7 км, при 2 м/с – на 10-14 км, а при 3 м/с – на 16-21 км. Збільшення швидкості вітру сприятиме швидкому розсіюванню хмари НХР. Збільшення температури ґрунту (чи поверхні, на якій розлилась НХР) та навколишнього повітря прискорює випаровування НХР, а, отже, збільшує концентрацію його над забрудненою територією. На глибину поширення хмари НХР та величину його концентрації значною мірою впливатимуть вертикальні переміщення повітряних мас, тобто ступінь вертикальної стійкості повітря. На графіку (рис. 5) показано зміну глибини хімічного забруднення повітря ($\Gamma_{ПЗХ}$), ширини ($\Pi_{ПЗХ}$) та зміну концентрації НХР (C_1, C_2, C_3, C_4)

в межах прогнозованої зони хімічного забруднення в часі і відстані від осевої лінії напрямку вітру (вісь сліду). Із збільшенням відстані від місця аварії та відстані від осі сліду концентрація НХР зменшується. Цей висновок стосується тільки рівнинної місцевості без наявності лісу та забудови. В усіх інших випадках слід враховувати особливості, представлені на рис. 4.

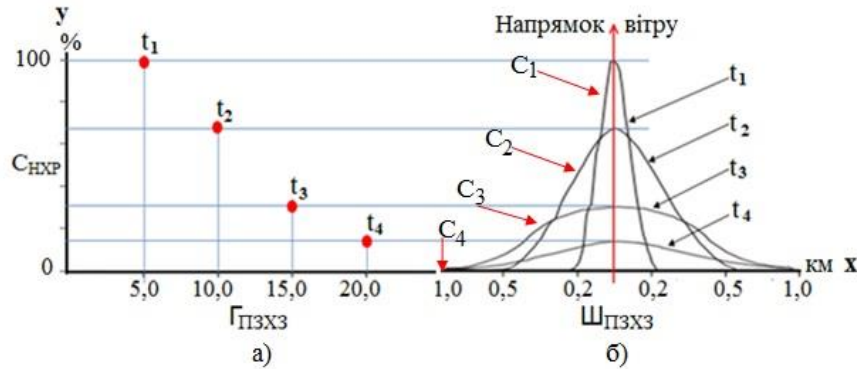


Рис. 5 – Вплив вітру на зміну концентрації в хмарі НХР з часом: а) вид із боку; б) вид у розрізі перпендикулярно до напрямку вітру

Нерівності земної поверхні (рельєф) впливають на турбулентність повітряних мас, які, у свою чергу, здатні змінити концентрацію небезпечних речовин у більшу чи меншу сторону, а наявність рослинності та характер забудови змінюють характер переміщення забруднених повітряних мас, що, в свою чергу, також впливає на глибину забруднення та зміну концентрації НХР і, відповідно, на характер ураження, що переконливо показав своїми дослідженнями В. Маршалл [13]. З цього випливає, що розглянуті параметри суттєво впливають і на загальну площу зони хімічного забруднення НХР. Аналіз вивчених документів та публікацій, проведених математичних та графічних досліджень показав, що висока температура верхнього шару земної кори та нижніх шарів атмосфери забезпечує швидке випаровування токсичних речовин із заражених поверхонь. При цьому вітер «розносить» (розвіює) пари токсичних речовин, знижуючи їхню концентрацію. При цьому необхідно відзначити, що в суху, тиху та прохолодну погоду токсичні речовини швидко осідають на поверхні будівель, асфальтових покриттів, інших предметах і можуть зберігати високу концентрацію тривалий час. Взимку випаровування небезпечних речовин також незначне, отже, і зараження місцевості, де відбувся їхній викид, буде тривалим.

Істотно впливають на поширення НХР і тумани. Це відбувається через те, що багато токсичних речовин добре розчиняються у воді. При великій вологості повітря НХР поглинаються водяними парами і перетворюються на кислоти. Загальновідомим фактом у колі фахівців є приклад перетворення сірчистого газу на сірчану кислоту: $SO_2 + H_2O \rightleftharpoons H_2S O_3$. Інші приклади: $CO_2 + H_2O = H_2CO_3$, $Cl_2 + H_2O = HCl + HClO$, $H_2S + H_2O = H_2SO_4 + H_2$.

У випадку з туманами концентрація небезпечних речовин у навколишньому середовищі може виявитися значно більшою, ніж за його відсутності. Даний факт можна пояснити ще й тим, що на верхній межі туману створюється підвищена інверсія температури, а в самому тумані відзначатиметься зниження температури з висотою або ізометрія. Причому під час туманів у приземному шарі може виявитися повний штиль.

Таким чином, метеорологічні умови істотно впливають на перенесення та розсіювання шкідливих речовин, що надходять в атмосферу. При цьому зміна вмісту шкідливих речовин в атмосфері відбувається під дією атмосферних процесів (зокрема, інтенсивність випаровування). Про летючість і тривалість уражаючої дії прийнято судити за температурою кипіння речовини. Чим вища температура кипіння, тим повільніше випаровується речовина, і стійкість її буде вищою, ніж у речовин, що мають меншу температуру кипіння, при цьому над забрудненою ділянкою можуть утворюватися летальні концентрації НХР. Отже, за певної температури повітря швидкість випаровування НХР різна. Будь-яка конкретна речовина за різних температурних умов випаровується швидше чи повільніше, але, зазвичай, зі зниженням температури стійкість НХР зростає, що, в свою чергу, впливає на час її уражальної дії [1, додаток 15].

Розглянемо вплив характеру місцевості на вітер і концентрацію НХР. Велике значення у разі поширення токсичних речовин грає рельєф місцевості. У знижених формах рельєфу повітряні маси застоюються, у зв'язку з чим відбувається посилення небезпеки зараження території, особливо тими НХР, які важчі за повітря. Нерівності земної поверхні впливають і на турбулентність повітряних мас, які, у свою чергу, здатні змінити концентрацію небезпечних речовин у більшу чи меншу сторону. Окремий хребет (пагорб) відхиляє вітер, сприяє утворенню завихрення на навітряному та особливо підвітряному схилі і посиленню вітру на вершині і бокових схилах. На забруднене повітря хребет (пагорб) впливає через завихрення і розтягування хмари в довжину і ширину (рис. 6). Хребет при достатній його висоті відхиляє вітер на навітряному схилі у бік тупого кута, утвореного напрямком вітру і віссю хребта. У сідловині вітер підсилюється, а на навітряному і підвітряному схилах слабшає. Після подолання хребта вітер вирівнюється і повертається до початкового режиму на відстані, рівній 8-10-кратній висоті хребта. На забруднене повітря хребет впливає внаслідок розтягання хмари в усіх напрямках і посилення вітру в сідловині (рис. 6).

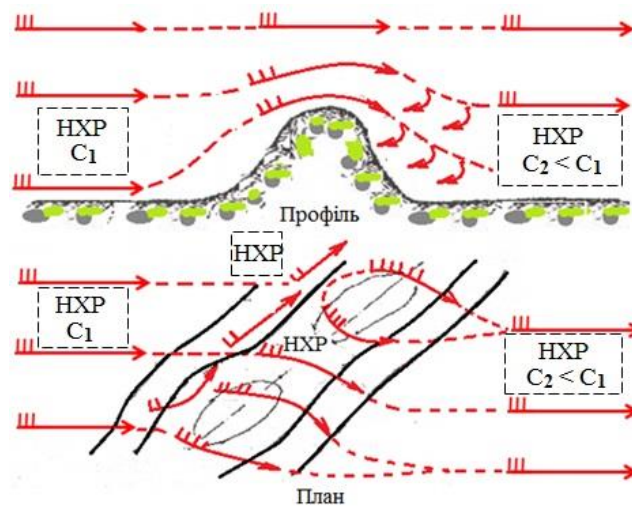


Рис. 6 – Вплив хребта на вітер і концентрацію НХР

Лощина не впливає на напрямок повітряного потоку, але послаблює вітер до повного затишку в її глибині. В лощині можливий застій забрудненого повітря. Глибока лощина при вітрі, спрямованого перпендикулярно до неї, звичайно є місцем застою забрудненого повітря, тому що велика частина повітря проноситься над нею, а в самій лощині вітер слабшає іноді до повного штилю, особливо при інверсії (рис. 7).

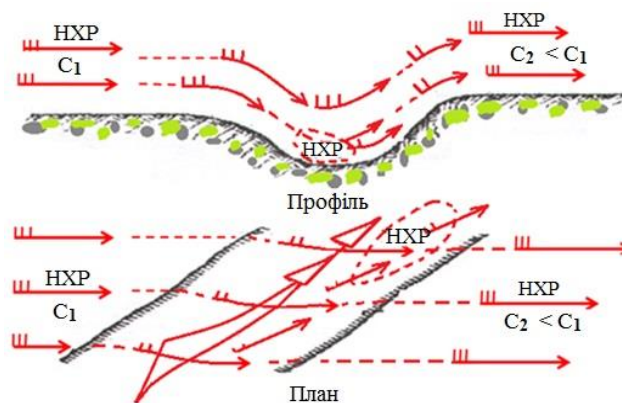


Рис. 7 – Вплив лощини на вітер і концентрацію НХР

Якщо забруднене повітря зустрічає широку лощину з пологими схилами, то він спускається на її дно і піднімається по протилежному схилу без істотних змін в своїх параметрах. Якщо лощина утворить з напрямком вітру гострий кут, то при достатній крутості її країв у лощині виникає місцевий вітер невеликої швидкості, що діє уздовж лощини у бік тупого кута між напрямком вітру і краями лощини. У даному випадку можливе відхилення частини забрудненого повітря від загального напрямку руху. Якщо напрямок вітру близький до напрямку осі лощини, то велика частина забрудненого повітря переміщається уздовж лощини і при тому на великі відстані.

Долини з високими і крутими, на великій відстані берегами являються шляхами глибокого проникнення повітря, зараженого НХР, на незаражену місцевість. В умовах гірського рельєфу вплив окремих вершин, хребтів, лощин і долин загалом аналогічний впливу відповідних форм горбуватого рельєфу, але виявляє себе різко та охоплює шар повітря набагато більшої глибини. Специфічним явищем гірського рельєфу звичайно є місцеві вітри, зокрема, гористо-долинні. Ці вітри спостерігаються в літню пору при ясній погоді на схилах гірських долин (полонин): вночі холодні маси повітря стікають по схилах у долину, а вдень більш тепле долинне повітря піднімається по схилах на гору. Тривалість уражаючої дії НХР в лощинах, долинах значно вище, ніж на вершинах пагорбів і хребтах.

Вплив рослинного покриву на поведінку забрудненого повітря може бути різним. У тому випадку, коли заражене повітря зустрічає на своєму шляху ліс, загальна ефективність зараження знижується. Заражене повітря обтікає ліс в основному над кронами дерев, причому виникають завихрення, що зберігаються і на підвітряній стороні лісу на відстані до 500 м. Завихрення сприяють більш швидкому розсіюванню НХР. Частина забрудненого повітря затікає в ліс з навітряної сторони на глибину до 300 м і створює там зону сильного забруднення (рис. 8).

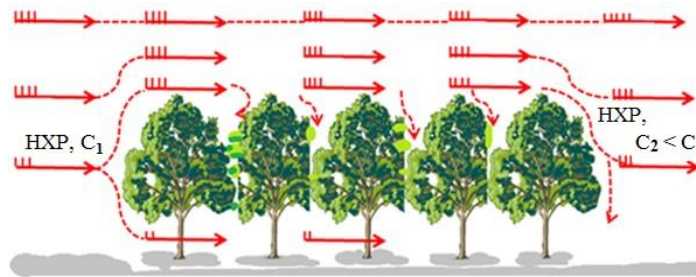


Рис. 8 – Вплив лісу на вітер і концентрацію НХР

У результаті розсіювання парів НХР і утворення їх застою у лісі концентрація НХР у забрудненому повітрі при проходженні лісу знижується, знижується і глибина розповсюдження хмари забрудненого повітря в залежності від ступеня вертикальної стійкості повітря – табл. 3. У тому випадку, коли забруднення повітря виникає в самому лісі, високі концентрації НХР будуть зберігатися досить довго. Рослинний покрив набагато збільшує тривалість забруднення місцевості НХР.

Таблиця 3

Коефіцієнт зменшення глибини розповсюдження хмари НХР [2]			
СВСП	Лісовий масив	Місто	Село
Інверсія	1,8	3,5	3
Ізотермія	1,7	3	2,5
Конвекція	1,5	3	2

Примітка: Кожен кілометр лісу, забудови зменшує глибину розповсюдження хмари НХР на відповідний коефіцієнт

Населені пункти впливають на характер поведінки зараженого повітря аналогічно впливу лісу. Забруднене повітря, обтікаючи населений пункт, розсіюється, а в самому населеному пункті створюються зони часткового застою (рис. 9). Різного роду будівлі в залежності від їх характеру

і розташування в тій чи іншій мірі сприяють підвищенню тривалості зараження НХР (особливо стійкими). Міська чи сільська забудова водночас виступають перешкодою для розповсюдження забрудненого повітря. Коефіцієнти зменшення цієї глибини – табл. 3.

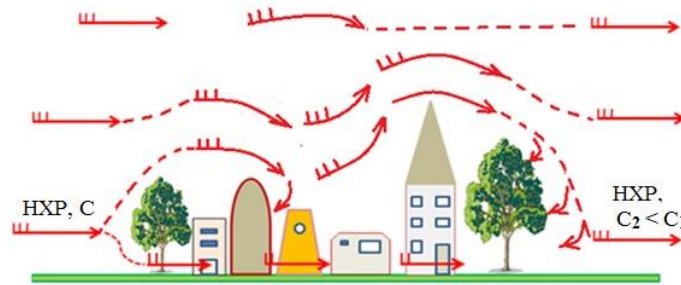


Рис. 9 – Вплив населеного пункту на вітер і концентрацію НХР

Прогнозування масштабів хімічного забруднення повітря в умовах міста тісно пов'язане з його кліматом. До того ж клімат міста неможливо розглядати ізольовано, оскільки він є статистичною сукупністю багатьох щоденних погодних подій, що виникають на території міста. Крім того, слід враховувати той фактор, що на міських вулицях температура повітря завжди на кілька градусів вище, ніж у сільській місцевості. Тому в місті спостерігається інтенсивний рух повітря, пов'язаний зазвичай з його переміщенням від околиць до центру по магістральних вулицях. Це сприяє проникненню токсичних речовин у двори, тупики, колектори, підвали і створює підвищену небезпеку для життя і здоров'я міського населення. Таким чином, при проведенні розрахунків необхідно враховувати той фактор, що стійкість небезпечних хімічних речовин в міських кварталах буде вище, ніж на відкритій місцевості. Погодні умови на будь-якій місцевості регулюються багато масштабними атмосферними явищами. В той же час кожен із районів міста змінює в тій чи іншій мірі локальні умови прирубіжного шару атмосфери. В певних погодних умовах можуть домінувати або масштабні процеси, або локальні, хоч в усіх випадках мають місце і ті, і інші. При наявності розвинутих синоптичних процесів, які характеризуються сильним вітром, хмарністю та опадами, впливом локальних умов можна знехтувати. У тих випадках, коли швидкість вітру мала, небо вдень і вночі безхмарне, вплив локальних умов, обумовлених характером міста, переважає синоптичні процеси і ними нехтувати не можна. Найбільший вплив місто чинить на температуру повітря, що спричиняє виникненню в місті так названого острова тепла. Температурні контрасти більш за все проявляються у вечірні часи, безпосередньо перед заходом сонця і після заходу. Максимальна різниця між температурою в місті і на відкритій місцевості фіксується зазвичай через 2-3 години після заходу сонця і зникає в невеликих містах невдовзі після півночі, а в великих містах острів тепла зберігається усю ніч.

Наявність острова тепла в сукупності з шершавістю підстильної поверхні чинить значний вплив на швидкість і напрямок вітру у поверхні землі і на ступінь вертикальної стійкості повітря, який може не співпадати з СВСП на відкритій місцевості. Острів тепла обумовлює формування в умовах ночі нестійких стратифікацій (розподіл на шари), які викликають підйом повітряних мас, на зміну яким від окраїн міста рухаються більш холодні маси повітря. При цьому необхідно відмітити, що направлений рух повітря вночі до центра міста непостійний. У великих містах ізотерми (лінії на карті, схеми, які відповідають однаковій температурі повітря на місцевості) острова тепла, як правило, згущуються на краю щільно забудованої зони. Ця особливість може приводити до різких пульсацій більш холодного повітря, що проникає в місто. Середня швидкість вітру в місті менша, ніж на відкритій місцевості, і в 65% випадків коефіцієнт зменшення складає біля 0,7, крім того, в місті різко збільшується кількість безвітряних днів, а максимальні швидкості вітру спостерігаються в середньому на 10-20% рідше, тобто на 10 випадків максимальної швидкості вітру на відкритій місцевості, в місті їх буде 9-8.

Особливості розповсюдження НХР тісно пов'язані з розглянутими процесами і повинні визначатися в кожному конкретному випадку з урахуванням властивостей НХР і умов її зберігання.

У випадках зруйнування ємності із зрідженим газом або з НХР, що має низьку температуру кипіння, перевага гравітаційних факторів (властивість матерії, що проявляється у взаємному притяганні тіл) в початковий момент розповсюдження НХР приводить до того, що напрямку руху хмари і швидкість її руху будуть в основному визначатися рельєфом місцевості. Внаслідок застою в низинах і підвалах міських будівель можуть виникати значні концентрації, які будуть уражати усіх, хто опиниться в зоні зараження.

У подальшому розповсюдження НХР буде визначатися швидкістю і напрямком вітру. Напрямок руху, як правило, буде співпадати з міськими магістралями, вулицями. Вночі можливе затікання хмари НХР до центру міста, завдяки руху холодних мас повітря від окраїн.

У випадках співпадіння напрямку руху хмари НХР з напрямком міських транспортних магістралей глибина розповсюдження повинна визначатися як для рівної місцевості, тобто за таблицями, без врахування відповідного коефіцієнту для міської забудови. При неспівпадінні напрямку вітру з напрямком таких магістралей, або ж коли такі відсутні (безсистемна забудова), оцінку глибини розповсюдження хмари НХР необхідно визначити з урахуванням коефіцієнта (табл. 4). На узбережжях морів, великих озер і рік у теплий час року при малоохмарній і тихій погоді виникають місцеві вітри узбережжя – бризи. Бризи характеризуються півдобовою зміною напрямку вітру: уночі вітер дме з берега в море (нічний чи береговий бриз), а вдень – з моря на берег (денний чи морський бриз). При сприятливих умовах погоди і місцевості бризи поширюються на великі відстані і дмухають з помірними швидкостями – до 4-6 м/с. У прибережних районах поведіння хмари забрудненого повітря буде підкорятися режиму бризів.

Висновки

1. Під метеорологічними елементами розуміється загальна назва ряду характеристик стану повітря та деяких атмосферних процесів. До метеорологічних елементів насамперед відносять ті характеристики стану атмосфери та атмосферні процеси, які безпосередньо спостерігаються на метеорологічних станціях: атмосферний тиск, температура та вологість повітря, вітер (горизонтальний рух повітря), хмарність (за кількістю та формами), кількість і вид опадів, що випадають, видимість, тумани, хуртовини та ін. Сюди ж відносяться тривалість сонячного сяйва, температура та стан ґрунту, висота та стан снігового покриву та ін.

2. При зміні метеорологічних умов (ступеня вертикальної стійкості та швидкості вітру, температури повітря) змінюється також швидкість перенесення переднього фронту хмари зараженого повітря. Це, в свою чергу, змінює глибину перенесення повітряних мас і, відповідно, змінює масштаби зони фактичного хімічного забруднення.

3. До основних змінних, що визначають формування рівня забруднення атмосфери, відносяться напрям переносу хмари НХР, швидкість їх перенесення, атмосферна стійкість і пов'язана з нею ступінь вертикального перемішування шкідливих домішок, термічний стан повітряної маси, від якого залежить початковий підйом викидів, вимивання НХР опадами, акумуляція їх у туманах, інерційний фактор.

4. Зона хімічного забруднення – це територія, на якій небезпечні хімічні речовини перебувають в концентраціях, небезпечних для людини та інших живих організмів, що знаходяться в цій зоні. З урахуванням цього фактора і необхідно приймати рішення щодо рятувальних робіт, адже на кожній складовій ділянці забрудненої території будуть і різні концентрації НХР.

5. При виборі заходів та способів захисту населення необхідно враховувати не тільки фізико-хімічні та токсичні властивості НХР, масштаби забруднення, а і метеорологічні умови та характер місцевості, на якій будуть проводитися аварійно-рятувальні роботи.

Перелік використаних джерел:

1. Методика прогнозування наслідків вилу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварії на хімічно небезпечному об'єкті і транспорті : наказ Міністерства внутрішніх справ України від 29.11.2019 р. № 1000. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text> (дата звернення: 15.06.2024).
2. Методика прогнозування наслідків вилу (викиду) небезпечних хімічних речовин при аваріях на промислових об'єктах і транспорті : наказ Міністерства України з питань

- надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи, Міністерства аграрної політики України, Міністерства економіки України, Міністерства екології та природних ресурсів України від 27.03.2001 р. № 73/82/64/122. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0326-01#Text> (дата звернення: 10.06.2024).
3. ДСТУ 3513:2021. Метеорологія. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2021-11-01]. Київ : ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2021.
 4. ДСТУ 3992-2000. Кліматологія. Терміни та визначення основних понять. [Чинний від 2000-10-31]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2001. 40 с.
 5. Настанова з метеорологічного прогнозування. Київ: Український гідрометеорологічний центр, 2019. 35 с. URL: https://www.meteo.gov.ua/f/pro_nas/normativni_akt/Nastanova%20z%20meteoprognozuvannia.pdf (дата звернення: 08.05.2024).
 6. Сипко В. Г., Кондратюк В. М., Плис М. М. Щодо впорядкування деяких положень методики прогнозування наслідків аварій на ХНО. *Сучасні проблеми професійної та цивільної безпеки* : тези доповідей I Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф., м. Дніпро, 28 квіт. 2020 р. Дніпро : ДВНЗ «УДХТУ», 2020. С. 109-111.
 7. Зауваження та пропозиції щодо «Методики прогнозування наслідків вилливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварії на хімічно небезпечному об'єкті і транспорті» / Мітіна Н. Б., Музика І. А., Плис М. М., Сипко В. Г. *Сучасні проблеми професійної та цивільної безпеки* : тези доповідей II Міжнародної наук.-практ. інтернет-конф., м. Дніпро, 24 квіт. 2022 р. Дніпро : ДВНЗ «УДХТУ», 2022. С. 50-60.
 8. Плис М. М., Мітіна Н. Б., Малиновська Н. В. Прогнозування та оцінка хімічної обстановки на хімічно небезпечних об'єктах: навч. посіб. Дніпро: ДВНЗ «УДХТУ», 2024. 135 с.
 9. Аналіз методики прогнозування наслідків аварії на хімічно небезпечних об'єктах на предмет її практичного використання за призначенням / Н. Б. Мітіна та ін. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 5. С. 60-68. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.251022.60.893>.
 10. Стрілець В. В. Попередження надзвичайних ситуацій терористичного характеру, пов'язаних з малооб'ємним вибухом небезпечних хімічних речовин: дис. ... канд. техн. наук : 21.02.03. Харків, 2020. 194 с.
 11. Фізичні особливості розповсюдження забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за умов надзвичайної ситуації на АЕС / О. О. Попов та ін. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2019. Вип. 4(84). С. 88-98. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4\(84\).11](https://doi.org/10.32918/nrs.2019.4(84).11).
 12. Бортняк О. М., Школьнік М. П., Осипчук М. М. Аналітичні дослідження розповсюдження в атмосферному повітрі шкідливих речовин, що містяться у викидах стаціонарних джерел промислових підприємств нафтогазового комплексу. *Нафтогазова енергетика*. 2013. № 1(19). С. 15-25.
 13. Аверин Г. В. Анализ опасностей аммиачных компрессорных установок методом построения «дерева отказов». *Екологічна безпека*. 2008. Вип. 3-4/2008(3-4). С. 9-16.

References:

1. Order of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine. № 1000, 29.11.2019. *Metodyka prohnouzuvannia naslidkiv vylyvu (vykydu) nebezpechnykh khimichnykh rehovyn pid chas avarii na khimichno nebezpechnomu obiekti i transporti* [Methodology for predicting the consequences of a spill (release) of hazardous chemicals during an accident at a chemically hazardous facility and transport]. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20#Text>. Accessed on: June 15, 2024. (Ukr.)
2. Order of the Ministry of Ukraine for Emergencies and Protection of the Population from the Consequences of the Chernobyl Disaster, the Ministry of Agrarian Policy of Ukraine, the Ministry of Economy of Ukraine, the Ministry of Ecology and Natural Resources of Ukraine. № 73/82/64/122, 27.03.2001. *Metodyka prohnouzuvannia naslidkiv vylyvu (vykydu) nebezpechnykh khimichnykh rehovyn pry avariiakh na promyslovykh ob'iektakh i transporti* [Methodology for predicting the consequences of spills (emissions) of hazardous chemicals in accidents at industrial

- facilities and transport]. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0326-01#Text>. Accessed on: June 10, 2024. (Ukr.)
3. *Meteorolohiia. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat* [Meteorology. Terms and definitions of basic concepts], State standart 3513:2021, 2021. (Ukr.)
 4. *Klimatolohiia. Terminy ta vyznachennia osnovnykh poniat* [Climatology. Terms and definitions of basic concepts], State standart 3992-2000, 2001. (Ukr.)
 5. *Nastanova z meteorolohichnoho prohnozuvannia* [Meteorological forecasting guide]. Kyiv, Ukraine: Ukrainyski hidrometeorolohichniy tsentr Publ., 2019. 35 p. [Online]. Available: https://www.meteo.gov.ua/f/pro_nas/normativni_akt/Nastanova%20z%20meteooprognozuvania.pdf. Accessed on: May 08, 2024. (Ukr.)
 6. V.H. Sypko, V.M. Kondratiuk, and M.M. Plis, «Shchodo vporiadkuvannia deiakykh polozhen metodyky prohnozuvannia naslidkiv avarii na KhNO» [«On streamlining some provisions of the methodology for predicting the consequences of accidents at nuclear power plants»], in Proc. I Int. Sci.-Techn. Internet-Conf. «Modern problems of professional and civil safety», Dnipro, 2020, pp. 109-111. (Ukr.)
 7. N.B. Mitina, I.A. Muzyka, M.M. Plis, and V.H. Sypko, «Zauvazhennia ta propozytsii shchodo «Metodyky prohnozuvannia naslidkiv vylyvu (vykydu) nebezpechnykh khimichnykh rehovyn pid chas avarii na khimichno nebezpechnomu obiekty i transporti»» [«Comments and suggestions on the «Methodology for predicting the consequences of a spill (release) of hazardous chemicals during an accident at a chemically hazardous facility and transport»], in Proc. II Int. Sci.-Techn. Internet-Conf. «Modern problems of professional and civil safety», Dnipro, 2022, pp. 50-60. (Ukr.)
 8. M.M. Plis, N.B. Mitina, and N.V. Malynovska, *Prohnozuvannia ta otsinka khimichnoi obstanovky na khimichno nebezpechnykh ob'ektakh: navch. posib.* [Forecasting and assessment of the chemical situation at chemically hazardous facilities: training manual]. Dnipro, Ukraine, 2024. (Ukr.)
 9. N.B. Mitina, M.M. Plis, V.A. Gerasimenko, N.V. Malynovska, and O.V. Smirnova, «Analiz metodyky prohnozuvannia naslidkiv avarii na khimichno nebezpechnykh ob'ektakh na predmet yii praktychnoho vykorystannia za pryznachenniam» [«Analysis of the method for forecasting the consequences of an accident at chemically dangerous objects in the subject of its practical use as intended»], *Ukrainskyi zhurnal budivnytstva ta arkhitektury – Ukrainian Journal of Civil Engineering and Architecture*, № 5, pp. 60-68, 2022. doi: 10.30838/J.BPSACEA.2312.251022.60.893. (Ukr.)
 10. V.V. Strilets, «Poperedzhennia nadzvychainykh sytuatsii terorystychnoho kharakteru, poviazanykh z malo-ob'iemnym vybukhom nebezpechnykh khimichnykh rehovyn» [«Prevention of terrorist emergencies related to small-scale explosions of hazardous chemicals»], PhD Thesis, Kharkiv, Ukraine, 2020. (Ukr.)
 11. O. Popov et al., «Fizychni osoblyvosti rozpovsiudzhennia zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosfernomu povitri za umov nadzvychainoi sytuatsii na AES» [«Physical Features of Pollutants Spread in the Air During the Emergency at NPPs»], *Yaderna ta radiatsiina bezpeka – Nuclear and Radiation Safety*, vol. 4(84), pp. 88-98, 2019. doi: 10.32918/nrs.2019.4(84).11. (Ukr.)
 12. O.M. Bortniak, M.P. Shkolnyi, and M.M. Osypchuk, «Analitichni doslidzhennia rozpovsiudzhennia v atmosfernomu povitri shkidlyvykh rehovyn, shcho mistiatsia u vykydakh statsionarnykh dzherel promyslovykh pidpriemstv naftohazovoho kompleksu» [«Analytical studies of the distribution in atmospheric air of harmful substances contained in emissions from stationary sources of industrial enterprises of the oil and gas complex»], *Naftohazova enerhetyka – Oil And Gas Power Engineering*, № 1(19), pp. 15-25, 2013. (Ukr.)
 13. H.V. Averyn, «Analiz opasnosti ammyachnykh kompressornykh ustanovok metodom postroeniya «dereva otkazov»» [«Analysis of the hazards of ammonia compressor units using the «fault tree» method»], *Ekolohichna bezpeka – Environmental safety*, vol. 3-4/2008(3-4), pp. 9-16, 2008. (Rus.)

Стаття надійшла 08.10.2024

Стаття прийнята 18.11.2024

271 РІЧКОВИЙ ТА МОРСЬКИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 531.43+681.5

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321372

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

МОЖЛИВОСТІ ТРЕНАЖЕРА У ФОРМУВАННІ ПРОФЕСІЙНОЇ КОМПЕТЕНЦІЇ МОРСЬКОГО ФАХІВЦЯ У ВІДПОВІДНОСТІ З ВИМОГАМИ КОНВЕНЦІЇ ПДНВ

Міжнародна морська організація (ІМО), класифікаційні товариства та державні організації звертають особливу увагу навчальних закладів на якість навчання при використанні морських тренажерів, оскільки вони мають потужний ресурс для розвитку когнітивних навичок курсантів завдяки відтворенню високого ступеня реальності при моделюванні технології діяльності морського інженера. У статті досліджується проблема підготовки морського фахівця до діяльності в іншомовному середовищі за допомогою тренажерів відповідно до вимог Міжнародної морської конвенції (ПДНВ). В результаті дослідження питання тренажерної підготовки майбутніх спеціалістів у рамках інтегративно-контекстного підходу, зроблено висновок, що найбільш високим рівнем навчання професійної діяльності в іномовному середовищі є групове навчання на тренажері, оскільки під час цього навчання спілкування відбувається в процесі вирішення оперативних завдань у змодельованих ситуаціях, де інженери практикують реальну професійну діяльність, а також важливу роль відіграє комунікативна складова процесу взаємодії групи спеціалістів. Іншомовна комунікація є засобом вирішення професійних завдань, тому автори розробили технологію підготовки морських фахівців до оперативної адаптації в умовах роботи у змішаному екіпажі. У цій технології з позиції концепції інтегративно-контекстного навчання демонструється специфіка використання ділових ігор на сучасних тренажерах у ситуаціях професійної іншомовної взаємодії. Розкривається роль предметного, соціального та психологічного контекстів ділової гри на тренажері у формуванні професійної компетенції, наводяться результати експериментального навчання. Проектування ділових ігор на тренажері за циклом спеціальних та іншомовних дисциплін на базі моделей технологічних процесів на морському транспорті передбачає розробку адекватного методичного забезпечення за допомогою відтворення предметного, соціокультурного та психологічного змісту професійної діяльності морського фахівця в технологіях освоєння типової задачі праці.

Ключові слова: тренажер, професійна компетенція, відпрацювання штатних та надзвичайних ситуацій, морські спеціалісти, інтегративно-контекстне навчання, ділова гра.

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

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

³ канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0002-1256-8053, dimon150582@gmail.com

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

⁵ канд. техн. наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, ORCID: 0000-0001-8320-329X

I.V. Khudiakov, I.V. Gritsuk, D.S. Pohorletsky, V.V. Chernenko, I.V. Rybalko. Possibilities of the trainer in forming the professional competence of a maritime specialist in accordance with the requirements of the PDNV convention. The International Maritime Organization, classification societies and government organizations pay special attention of educational institutions to the quality of training when using marine simulators, as they have a powerful resource for developing the cognitive skills of cadets due to the reproduction of a high degree of reality when simulating the technology of the marine engineer. The article investigates the problem of training a maritime specialist to work in a foreign language environment using simulators in accordance with the requirements of the International Maritime Convention. As a result of studying the issue of simulator training of future specialists within the framework of an integrative contextual approach, it was concluded that the highest level of training for professional activity in a foreign language environment is group training on a simulator, since during the course of communication in the process of solving operational tasks in situations, model engineers practicing real professional activity and the communicative component of the process of interaction of a group of specialists. Foreign language communication is a means of solving professional tasks, so the authors have developed a technology for training maritime specialists for operational adaptation in mixed crew conditions. This technology, from the perspective of the concept of integrative-contextual learning, demonstrates the specifics of using business games on modern simulators in situations of professional foreign language interaction. The role of the subject, social and psychological contexts of a business game on a simulator in the formation of professional competence is revealed, and the results of experimental training are presented. Designing business games on a simulator according to a cycle of special and foreign language disciplines based on models of technological processes in maritime transport involves the development of adequate methodological support by reproducing the subject, socio-cultural and psychological content of the professional activity of a maritime specialist in the technologies of mastering a typical work task.

Keywords: simulator, professional competence, practice of regular and emergency situations, maritime specialists, integrative-contextual training, business game.

Постановка проблеми. Професія інженера морського транспорту тісно пов'язана з іноземною мовою як засобом регулювання технологічних процесів [1-4]. Рівень його кваліфікації визначається не тільки державними освітніми стандартами України, а також вимогами міжнародних морських конвенцій [5-11]. Наприклад, сфера компетенції інженера-судномеханіка згідно «Міжнародної конвенції про підготовку та дипломування моряків та несення вахти 78/95» (табл. А-III/1) включає використання англійської мови в листі змінної та усної форми, що дозволяє виконувати обов'язки механіка при експлуатації всіх систем внутрішньосуднового зв'язку [1, 3, 7-11]. Міжнародна морська організація (ІМО), класифікаційні товариства та державні організації звертають особливу увагу навчальних закладів на якість навчання при використанні морських тренажерів, оскільки вони мають потужний ресурс для розвитку когнітивних навичок курсантів завдяки відтворенню високої ступеня реальності при моделюванні технології діяльності морського інженера [1, 3, 7-20].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тренажер є технічним засобом професійної підготовки, призначеним для формування та вдосконалення професійних навичок та вмінь оператора для управління матеріальним об'ємом шляхом багаторазового виконання інструментальних дій. Широке використання тренажерів машинного відділення для навчання має на увазі його високу ефективність. Дослідниками відзначається важливість тренажера не лише як успішного навчального, а й екзаменаційного інструменту [1, 3], вказується на необхідність відтворення комунікативного контексту під час тренажерних занять [4, 11]. Однак питання формування операційних механізмів професійної компетенції, способи інтеграції її іншомовного компонента в загальну систему регуляції діяльності в ході тренажерної підготовки не розглядаються.

Тренажерні системи класифікуються за чотирма категоріями, які гарантують, що тренажерна підготовка забезпечить відповідний рівень фізичного та поведінкового реалізму відповідно до цілей навчання та оцінки результатів, як зазначено в розділі А-I/12 Кодексу Міжнародної морської конвенції (ПДНВ). Категорія 1 – технічний тренажер завершеного завдання (Full Mission

type); категорія 2 – багатоцільовий (Multi-Task type); категорія 3 – обмеженої дії (Limited Task type) та категорія 4 – спеціального призначення (Special Task type). Тренажери категорії 1 використовуються для повного занурення з максимально можливим контролем середовища моделювання. На них встановлені повні інженерні системи, включаючи звукові та реалістичні візуальні ефекти, і вони дозволяють відпрацьовувати моделі управління як у штатній ситуації, так і аварійних умовах роботи. Категорія 2 моделює загальне середовище технічної операції. Категорія 3 відтворює середовище для певної інженерної системи, щоб забезпечити попереднє навчання освоєння конкретних завдань. Категорія 4 забезпечує ознайомлювальну підготовку для подальшого відпрацювання задач підвищеної складності на інших тренажерах [4].

У Херсонській державній морській академії використовуються тренажери різних категорій, наприклад, на судномеханічному факультеті встановлені багатоцільові тренажери Transas 5000, що дозволяють здійснювати відпрацювання алгоритмів діяльності з більшою швидкістю та ефективністю. Можливість повторів дозволяє розібрати поточну ситуацію для уточнення та обговорення способів відпрацювання штатних та надзвичайних ситуацій, наприклад, аварійну зупинку головного двигуна, аварійний режим роботи, пожежу в машинному відділенні, обезточування судна тощо [4].

І найефективніший спосіб моделювання професійних ситуацій в іншомовному середовищі – це організація ділових ігор на тренажері, в яких у максимально повному обсязі можуть бути відтворені контексти майбутньої професійної діяльності курсанту з позицій теорії контекстного навчання. Ділова гра є формою відтворення в освітньому процесі предметного та соціального змісту конкретної професійної діяльності, моделювання технологій виробництва та систем відносин працівників, характерних для даного виду праці, а також знання його предметно-технологічного та соціального контекстів. Вона складається з двох моделей – імітаційної та ігрової, що задають контексти засвоєної курсантами реальної професійної діяльності [3].

Метою дослідження є вирішення проблеми оперативної адаптації до умов професійної діяльності в іншомовному середовищі змішаного за національними та мовними ознаками екіпажу.

Виклад основного матеріалу. Досліджуючи питання тренажерної підготовки майбутніх спеціалістів у рамках інтегративно-контекстного підходу [19, 21-23], ми дійшли висновку, що найбільш високим рівнем навчання професійної діяльності в іномовному середовищі є групове навчання на тренажері, оскільки під час цього навчання спілкування відбувається в процесі вирішення оперативних завдань у змодельованих ситуаціях, де інженери практикують реальну професійну діяльність, а також важливу роль відіграє комунікативна складова процесу взаємодії групи спеціалістів.

У процесі відпрацювання професійних операцій наявні розрізнені блоки навичок та умінь з іноземної мови та спеціальних предметів інтегруються в загальну систему діяльності – модельовану технологічну та реальну іншомовну, які становлять основу стандартних алгоритмів управління системами та способів оперативного прийняття рішень, у тому числі у «нештатних» ситуаціях. Предметний зміст ділової гри на тренажері є типовим завданням праці морського фахівця в умовах полікультурного середовища змішаного екіпажу, під час освоєння якого з використанням іноземної мови відбувається формування професійних смислів, що становлять професійну компетенцію майбутнього спеціаліста. Типові виробничі завдання пов'язані з використанням іноземної мови, що освоюються в рамках ділових ігор на тренажері в ході відпрацювання способів регуляції технологічних процесів та освоєння комунікативних ролей на основі фразеологічного матеріалу стандартного словника-розмовника, що відображає комунікативну складову професійної діяльності морського фахівця.

Дослідження ефективності тренажерної підготовки на основі циклу ділових ігор проводилося на базі Херсонської державної морської академії у 2019 році з використанням програмного забезпечення, яке імітує роботу на судні паром типу Ro-Pax:

The simulator is modeling the Propulsion Plant, Electric Power Plant, Control & Monitoring System (CMS), auxiliary systems, equipment, units and mechanisms of a general Ro-Pax ferry.

Table 1

Ship general characteristics

Max. continuous power	4 000 kW at 750 RPM
Length overall	125 meters
Breadth, moulded	23.4 meters
Designed draft, moulded	5.3 meters
Dead weight	3 000 dwt
Service speed	~ 18.8 knots at 90% MCR

The Propulsion Plant of the Ro-Pax ferry is a twin MAN B&W Marine 8L 32/40 DE, medium speed, four-stroke cycle, singleacting, non-reversible, direct injection, two-stage sequential exhaust turbo charging L-formation diesel engine with CPP.



Рис. 1 – Загальний вигляд парому типу Ro-Pax

У ньому брали участь 70 курсантів п'ятого курсу судномеханічного факультету, у тому числі в умовах спільної тренажерної підготовки з курсантами-судноводіями [1, 3, 11]. Заняття на тренажерах проводилися в дев'ятому семестрі навчання спільно з викладачами кафедри експлуатації суднових енергетичних установок та англійської мови загалом у кількості 108 годин. Методика проведення ділових ігор зводилася до моделювання міждисциплінарної діяльності курсанта в іншомовному середовищі, що досягалося відпрацюванням певних стандартних професійних операцій, що виконуються вахтовим інженером-судномеханіком у процесі спільної діяльності в іншомовному середовищі. Відпрацьовувалися основні алгоритми діяльності вахтенного механіка, такі як підготовка та введення в експлуатацію паливної системи дизель-генераторів, системи стисненого повітря, системи змащення дизель-генераторів, підготовка та пуск дизель-генератора та його підключення до шин, переведення на основні насоси охолодження та запуск основних відповідальних споживачів і т.п.

Підсумковий контроль та оцінка результатів освітнього процесу здійснювались у процесі складання державного іспиту також за допомогою моделювання в діловій грі штатних та аварійних ситуацій в іншомовному середовищі на тренажері автоматизованої суднової енергетичної установки (СЕУ) Transas 5000, який є комплексом пульта управління інструктора; обладнання центрального та інших постів управління СЕУ; комп'ютера для реалізації математичної моделі СЕУ у реальному масштабі часу; а також мнемосхеми всіх систем та обладнання машинного відділення. З пульта управління, який оснащений дисплеєм, інструктор-викладач має можливість змінювати задані умови та створювати проблемні задачі, також можуть бути змодельовані аварійні ситуації, введені несправності в системах та процесах СЕУ, створено імітацію шуму в машинному відділенні за допомогою підсилювачів звуку, змінені умови плавання, завантаження судна, масштаби часу тощо.

Як приклад наведемо моделювання процедури підготовки головного двигуна до запуску. В основі цієї операції лежать оригінальні перевірочні листи, розроблені згідно з міжнародними вимогами морської конвенції SOLAS.

У разі підготовки головного двигуна до запуску він включає цілу низку етапів: від отримання англійською мовою дозволу старшого механіка, роль якого виконує інструктор, на підготовку обладнання та двигунів до запуску, включаючи перевірку всіх засобів зв'язку машинного відділення з навігаційним містком та іншими постами управління, запис англійською мовою у вахтовому журналі розпорядження старшого механіка, команд вахтових помічників та капітана, а також результатів всіх вимірів та перевірок та часу виконання основних операцій.

У ході експериментальної роботи курсанти відтворювали професійні дії і вирішували професійні завдання з використанням морської англійської мови [1, 3, 11, 24-33].

Курсант повинен був оглянути двигун і доповісти вахтовому механіку про будь-які несправності; підтримувати зв'язок з «містком» і виконувати сумісні з ним дії для визначення відключення дистанційного приводу управління з рульової рубки та підготовки двигуна до запуску.

Кожна правильно виконана дія курсанта супроводжувалася спрацюванням ламп індикації, включенням шуму, що імітує роботу тієї чи іншої системи. «Неспрацьовування» системи означало, що процедуру було виконано неправильно. Курсанту необхідно було повернутися на попередні шаблі виконуємої операції і з'ясувати причину. У ході вирішення завдання визначалося, наскільки правильно та оперативно виконуються алгоритми професійних дій відповідно до ситуації.

На початку ділових ігор на тренажері було виявлено відсутність готовності до майбутньої діяльності у більшості курсантів, яка була викликана незнанням алгоритму тестування обладнання; особливостями вимови англійською мовою інструктора та членів команди; відсутністю оперативності прийняття рішення у разі виникнення несправності та прийняття невірного рішення для її усунення. Анкетування курсантів показало, що для 65,7% з них найбільшими труднощами є завдання на усунення несправностей, що вимагають емоційної напруженості, яка обумовлена необхідністю включення механізму оперативності з ухвалення рішення. Курсанти відчували недолік професійних навичок, слабо орієнтувалися у професійно предметній стороні процесу і в результаті боялися зробити помилку в серії виконання дій, при цьому 21,4% з них зіткнулися з проблемою складності розуміння іноземної мови на слух і висловлювання своїх дій на англійській мові – вони боялися зробити помилку граматичного чи лексичного плану.

Для визначення рівня професійної підготовки курсантів використовувалась методика компонентного аналізу процесу рішення операторських задач в іншомовному середовищі. Виділили такі компоненти, як точність розуміння сенсу іншомовної інформації (Т); оперативність прийняття рішення (О), яка оцінювалася за фактом дотримання тимчасового регламенту, що відводиться на виконання операції; адекватність виконання модельованої операції (А); дотримання регламенту спілкування (РС). В процесі виконання завдання на основі іншомовної інформації, курсантам потрібно було самостійно визначити завдання і знайти способи її оперативного рішення. Результати вирішення завдання у вигляді оцінок в умовних балах «1» або «0», суми умовних балів за засвоєння компонента і показника засвоєння компоненти у відсотках заносилися в карту компонентного аналізу, подану в табл. 1, та протокол тестування. Спостережені якості оцінювалися як виражені за умов засвоєння компонента від 85 до 100%.

Таблиця 1

Карта компонентного аналізу вирішення професійного завдання

Відомості про ділову гру	Компоненти			
	Т	О	А	РС
Операції				
	Оцінки в умовних балах («1» або «0»)			
1. Аналіз завдання та прийняття рішення				
2. Виконання дії з обслуговування системи				
3. Доповідь про виконані дії, тощо.				
Сума умовних балів за засвоєння компонента				
Показник засвоєння компонента, %				

У ході взаємодії та взаємовпливу різних компонентів освоєння типової задачі праці відбувалося формування алгоритмів професійної діяльності в іншомовному середовищі. В результаті участі у ділових іграх у курсантів знизився бар'єр напружених психічних станів, виробилися

вміння оперативно сприймати інформацію та на її основі адекватно виконувати професійні дії, пов'язані з іншомовним спілкуванням.

Після завершення ділових ігор на тренажері 94,29% курсантів відзначили в анкетах, що вони набули впевненості в собі при спілкуванні з іншим оператором іноземною мовою, таким чином формування навичок колективної роботи при вирішенні оперативних завдань та проблем призвело до зниження бар'єра напружених психічних станів. На це вказують і результати зміни середніх показників засвоєння компонента оперативності прийняття рішення, що за підсумками трьох ділових ігор на тренажері наведено у табл. 2. Середній показник засвоєння компонента оперативності виконання діяльності за підсумками третьої ділової гри склав 86%, що дозволило оцінити цей параметр як виражений відповідно до вимог професійних стандартів.

Таблиця 2

Зведена таблиця змін середніх показників засвоєння компонента оперативності

Середній показник засвоєння компонента, % за підсумками першої ділової гри	Середній показник засвоєння компонента, % за підсумками другої ділової гри	Середній показник засвоєння компонента, % за підсумками третьої ділової гри
47,14	71,43	86,00

Загалом ділові ігри на тренажері, що проводяться на судномеханічному факультеті академії з 2016 року, дозволили підвищити якість підготовки судномеханіків у порівнянні з традиційною моделлю навчання – за чотири роки навчання середній бал курсантів на інтегрованому державному іспиті зріс на 0,43 одиниці і склав у 2019 році 4,53 бали.

В умовах глобалізації роботи морського фахівця зростає важливість його підготовки відповідно до Конвенції ПДНВ, в якій покладено міжнародні стандарти до його кваліфікації, що включають високий рівень розвитку професійної компетенції, в яку глибоко і адекватно інтегрована іншомовна компонента. Вимоги українських стандартів компетентності та Конвенції ПДНВ можуть бути виконані, якщо в ході навчання будуть реалізовані професійні модулі, включно з діловими іграми на тренажері на основі інтегративно-контекстної педагогічної моделі, яка дозволяє відтворити у навчальній діяльності технологічні процеси, які регулюються іншомовною діяльністю студента.

Висновки

Проектування ділових ігор на тренажері за циклом спеціальних та іншомовних дисциплін на базі моделей технологічних процесів на морському транспорт передбачає розробку адекватного методичного забезпечення за допомогою відтворення предметного, соціокультурного та психологічного змісту професійної діяльності морського фахівця в технологіях освоєння типової задачі праці. Ділові ігри на тренажері виступають як системотворчий фактор міждисциплінарної інтеграції, оскільки відповідають вимогам стандартів нового покоління та Конвенції ПДНВ, і саме у діловій грі, що відтворює предметну, соціокультурну та ситуаційно-психологічну подібність праці майбутнього фахівця, формується його професійна компетенція, розвивається готовність до діяльності в іншомовному середовищі, яка проявляється у його здібності оперативно вирішувати професійні завдання та вирішувати проблемні ситуації у штатних та напружених ситуаціях засобами іноземного мови.

Перелік використаних джерел:

1. Peculiarities of ship power plant diagnostics using the ERS-500 Techsim Transas MIP LTD simulator complex in the process of ship engineers' training / I.V. Khudyakov et al. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*. 2023. Vol. 47. Pp. 273-280. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300113>.
2. The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Vol. 2018-01-1773. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
3. Aspects of Forming the Information V2I Model of the Transport Vessel / A. Golovan et al. *MEES : 2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, Kremenchuk, Ukraine, 23-25 September 2019*. Pp. 390-393. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES.2019.8896595>.

4. Information Model of V2I System of the Vehicle Technical Condition Remote Monitoring and Control in Operation Conditions / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Vol. 2018-01-0024. Pp. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0024>.
5. Koch F. W., Haubner F. G. Cooling System Development and Optimization for DI Engines. *SAE Technical Paper Series*. 2000. Vol. 2000-01-0283. Pp. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0283>.
6. Low-heat rejection engines – a concept review / Churchill R. A., Smith J. E., Clarc N. N., Turton R. A. *SAE Technical Paper Series*. 1989. № 890153. Pp. 25-36. DOI: <https://doi.org/10.4271/880014>.
7. Костишин В. С. Моделювання режимів роботи відцентрових насосів на основі електрогидравлічної аналогії : дис. ... д-ра техн. наук : 05.15.13. Івано-Франківськ, 2003. 163 с.
8. Service letter SL2019-671/JAP. URL: <https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019-671.pdf> (дата звернення: 11.08.2023).
9. Service Letter SL2019-687/NHN. URL: https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019-687.pdf?sfvrsn=4fba319_6 (дата звернення: 11.08.2023).
10. Service Experience - MAN B&W Two-stroke Engines. URL: <https://maritimeexpert.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/08/service-experience.pdf> (дата звернення: 11.08.2023).
11. Худяков І. В. Можливість застосування різних видів датчиків тиску для управління робочим процесом в ДВЗ. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. Херсон: вид. ХДМА, 2014. № 1(10). С. 255-262.
12. Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems) / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2020. Vol. 2020-01-2031. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-01-2031>.
13. Говорущенко Н. Я., Варфоломій В. М. Технічна кібернетика транспорту: навчальний посібник. Харків: ХДАДТУ, 2001. 271 с.
14. Кадильникова Т.М. Моніторинг технологічного стану як фактор забезпечення безаварійної роботи. *Вісник Донбаської академії будівництва і архітектури. Технологія, організація, механізація та геодезичне забезпечення будівництва*. 2002. № 5(36). С. 38-41.
15. Information Security Risk Management of Vehicles / D. Klets et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Vol. 2018-01-0015. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>.
16. Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2019. Vol. 2019-01-0906. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0906>.
17. Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів / В. П. Матейчик та ін. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2014. Вип. 13. С. 126-138.
18. Cognitive Model of the Internal Combustion Engine / V. Vychuzhanin et al. *SAE Technical Paper*. 2018. Vol. 2018-01-1738. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
19. Худяков І. В. Моделі бази даних інформаційної системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів. *Наукові нотатки*. 2019. Вип. 67. С. 141-148. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.67.22>.
20. Закалов О. В., Закалов І. О. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.
21. Positive Energy District Replication – Case Study of the City of Trencin / V. Ondrejicka et al. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1203(2). Article 022087. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1203/2/022087>.
22. Approach and structure of special organizational, methodological and technological components of project and program portfolio management systems / I. Teslia et al. *Scientific Journal of Astana IT University*. 2022. Vol. 10. Pp. 119-132. DOI: <https://doi.org/10.37943/ahfo5398>.
23. Development of the concept of building project management systems in the context of digital transformation of project-oriented companies / I. Teslia et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 6. No. 3(120). Pp. 14-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.268139>.

24. Kaidolov R., Omelchnko V., Podrygalo M. Analysis of existing constructions of road trains with active trailers. *Modern technologies in mechanical engineering and transport*. 2022. Vol. 2(17). Pp. 11-16. DOI: <https://doi.org/10.36910/automash.v2i17.629>.
25. Absulgazis A., Podrygalo M. A new approach to assessment of vehicles traction dynamics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Machine Science, Mechanization, Automation and Robotics*. 2020. Vol. 971. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/5/052100>.
26. Подригало М. А., Кайдалов Р. О., Омельченко В. І. Оцінка коефіцієнта корисної дії колісного рушія автомобіля. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2022. Вип. 21. Рр. 31-39. DOI: <https://doi.org/10.30977/АТ.2019-8342.2022.21.08>.
27. Kaidolov R., Omelchnko V., Podrygalo M. Rational choice of torques distribution between the front and back electric motors of automobile wheels drive. *Modeling and Computer Engineering in Mechanical Engineering: Theory, Practice, and Innovation (MCEME-2022)* : International Scientific and Theoretical Conference, Lviv, Ukraine, 28 September – 21 October 2022. Vol. 1277. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1277/1/012023>.
28. Поляков В. М., Сахно В. П. Триланкові автопоїзди. Маневреність : монографія. Луганськ : Ноулідж, 2014. 206 с.
29. Measurement of industrial robot pose repeatability / I. Kuric et al. *Innovative Technologies in Engineering Production (ITEP'18)* : MATEC Web of Conferences, Bojnice, Slovak Republic, 11-13 September 2018. Vol. 244. Article 01015. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824401015>.
30. Подригало М. А., Кайдалов Р. О. Рациональна динамічна характеристика автомобіля. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2017. № 2. С. 78-85.
31. Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator / Gritsuk I., Gutarevych Y., Mateichyk V., Volkov V. *SAE Technical Paper*. 2016. Vol. 2016-01-0204. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
32. Estimation Parameters of Braking of Vehicles Category M1 at Definition of Circumstances Road Accidents / A. Kashkanov et al. *SAE Technical Paper*. 2022. Article 2022-01-1166. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.4271/2022-01-1166>.
33. Improving Fuel Economy of Spark Ignition Engines Applying the Combined Method of Power Regulation / Gutarevych Y. et al. *Energies*. 2020. Vol. 13. Article 1076. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13051076>.

References:

1. I.V. Khudyakov, I.V. Gritsuk, D.S. Pohorletskyi, M.P. Bulgakov, V.V. Chernenko, and 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», *Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, vol. 47, pp. 273-280, 2023. doi: **10.31498/2225-6733.47.2023.300113**.
2. I. Gritsuk et al., «The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units», *SAE Technical Paper*, vol. 2018-01-1773, pp. 1-10, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1773**.
3. 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 Proc. IEEE Int. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), Kremenchuk, Ukraine, 2019, pp. 390-393. doi: **10.1109/MEES.2019.8896595**.
4. I. Gritsuk et al., «Information Model of V2I System of the Vehicle Technical Condition Remote Monitoring and Control in Operation Conditions», *SAE Technical Paper*, vol. 2018-01-0024, pp. 1-17, 2018. doi: **10.4271/2018-01-0024**.
5. F.W. Koch, and F.G. Haubner, «Cooling System Development and Optimization for DI Engines», *SAE Technical Paper Series*, vol. 2000-01-0283, pp. 1-16, 2000. doi: **10.4271/2000-01-0283**.
6. R.A. Churchill, J.E. Smith, N.N. Clarc, and R.A. Turton, «Low-heat rejection engines – a concept review», *SAE Technical Paper Series*, № 890153, pp. 25-36, 1989. doi: **10.4271/880014**.

7. V.S. Kostyshyn, «Modeliuvannia rezhymiv roboty vidtsentrovnykh nasosiv na osnovi elektrohidravlichnoi analogii» [«Modeling of centrifugal pump operating modes based on electrohydraulic analogy»], PhD thesis, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 2003. (Ukr.)
8. Service letter SL2019-671/JAP. [Online]. Available: <https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019-671.pdf>. Accessed on: August 11, 2023.
9. Service Letter SL2019-687/NHN. [Online]. Available: https://www.man-es.com/docs/default-source/service-letters/sl2019-687.pdf?sfvrsn=4fba319_6. Accessed on: August 11, 2023.
10. Service Experience - MAN B&W Two-stroke Engines. [Online]. Available: <https://maritimeexpert.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/08/service-experience.pdf>. Accessed on: August 11, 2023.
11. I.V. Khudiakov, «Mozhlyvist zastosuvannia riznykh vydiv datchykv tysku dlia upravlinnia robochym protsesom v DVZ» [«The possibility of applying different types of pressductors for workflow management in ICE»], *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii – Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, № 1(10), pp. 255-262, 2014. (Ukr.)
12. I. Gritsuk et al., «Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems)», *SAE Technical Paper*, vol. 2020-01-2031, pp. 1-13, 2020. doi: **10.4271/2020-01-2031**.
13. N.Ya. Hovorushchenko, and V.M. Varfolomiiv, *Tekhnichna kibernetyka transportu: navchalnyi posibnyk* [Technical Cybernetics of Transport: A Textbook]. Kharkiv, Ukraine: KhDADTU Publ., 2001. (Ukr.)
14. T.M. Kadylnykova, «Monitorynh tekhnolohichnoho stanu yak faktor zabezpechennia bezavariinoi roboty» [«Monitoring of technological status as a factor in ensuring trouble-free operation»], *Visnyk Donbaskoi akademii budivnytstva i arkhitektury. Tekhnolohiia, orhanizatsiia, mekhanizatsiia ta heodezychne zabezpechennia budivnytstva – Bulletin of the Donbass Academy of Civil Engineering and Architecture. Technology, organization, mechanization and geodetic support of construction*, № 5(36), pp. 38-41, 2002. (Ukr.)
15. D. Klets et al., «Information Security Risk Management of Vehicles», *SAE Technical Paper*, vol. 2018-01-0015, pp. 1-11, 2018. doi: **10.4271/2018-01-0015**.
16. I. Gritsuk et al., «Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators», *SAE Technical Paper*, vol. 2019-01-0906, pp. 1-13, 2019. doi: **10.4271/2019-01-0906**.
17. 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, Systems Analysis and Logistics*, vol. 13, pp. 126-138, 2014. (Ukr.)
18. V. Vychuzhanin et al., «Cognitive Model of the Internal Combustion Engine», *SAE Technical Paper*, vol. 2018-01-1738, pp. 1-10, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1738**.
19. I.V. Khudiakov, «Modeli bazy danykh informatsiinoi systemy monitorynhu parametriv tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv» [«Monitoring information system database models vehicle technical parameters»], *Naukovi notatki*, vol. 67, pp. 141-148, 2019. doi: **10.36910/6775.24153966.2019.67.22**. (Ukr.)
20. O.V. Zakalov, and I.O. Zakalov, *Osnovy tertia i znoshuvannia v mashynakh: Navchalnyi posibnyk* [Fundamentals of Friction and Wear in Machinery: A Study Guide]. Ternopil, Ukraine: TNTU im. I. Puliuia Publ., 2011. (Ukr.)
21. V. Ondrejicka, M. Hajduk, L. Jamecny, M. Husar and M. Jasso, «Positive Energy District Replication – Case Study of the City of Trencin», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1203(2), article 022087, pp. 1-11, 2021. doi: **10.1088/1757-899x/1203/2/022087**.
22. I. Teslia, N. Yehorchenkova, I. Khlevna, O. Yehorchenkov, S. Biloshchytska, and Y. Kataieva, «Approach and structure of special organizational, methodological and technological components of project and program portfolio management systems», *Scientific Journal of Astana IT University*, vol. 10, pp. 119-132, 2022. doi: **10.37943/ahfo5398**.
23. I. Teslia et al., «Development of the concept of building project management systems in the context of digital transformation of project-oriented companies», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 6, no. 3(120), pp. 14-25, 2022. doi: **10.15587/1729-4061.2022.268139**.

24. R. Kaidolov, V. Omelchnko, and M. Podrygalo, «Analysis of existing constructions of road trains with active trailers», *Modern technologies in mechanical engineering and transport*, vol. 2(17), pp. 11-16, 2022. doi: **10.36910/automash.v2i17.629**.
25. A. Absulgazis, and M. Podrygalo, «A new approach to assessment of vehicles traction dynamics», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Machine Science, Mechanization, Automatization and Robotics*, vol. 971, pp. 1-7, 2020. doi: **10.1088/1757-899X/971/5/052100**.
26. M. Podryhalo, R. Kaidalov, and V. Omelchenko, «Otsinka koefitsiienta korysnoi dii kolisnoho rushiia avtomobilia» [«Efficiency estimation of wheel automobile propulsion unit»], *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii – Vehicle and electronics. Innovative technologies*, vol. 21, pp. 31-39, 2022. doi: **10.30977/AT.2019-8342.2022.21.08**. (Ukr.)
27. R. Kaidolov, V. Omelchnko, and M. Podrygalo, «Rational choice of torques distribution between the front and back electric motors of automobile wheels drive», in Proc. Int. Sci. and Theoretical Conf. «Modeling and Computer Engineering in Mechanical Engineering: Theory, Practice, and Innovation» (MCEME-2022), Lviv, Ukraine, 2022, vol. 1277, pp. 1-8. doi: **10.1088/1757-899X/1277/1/012023**.
28. V.M. Poliakov, and V.P. Sakhno, *Trylankovi avtopoizdy. Manevrenist : monohrafiia* [Three-link road trains. Maneuverability: monograph]. Luhansk, Ukraine: Noulidzh Publ., 2014. (Ukr.)
29. I. Kuric, V. Tlach, Z. Ságová, M. Císar, and I. Gritsuk, «Measurement of industrial robot pose repeatability», in Proc. MATEC Web of Conferences, Bojnice, Slovak Republic, 2018, vol. 244, article 01015, pp. 1-9. doi: **10.1051/mateconf/201824401015**.
30. M.A. Podryhalo, and R.O. Kaidalov, «Ratsionalna dynamichna kharakterystyka avtomobilia» [«Rational dynamic characteristic of the vehicle»], *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu – Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, № 2, pp. 78-85, 2017. (Ukr.)
31. I. Gritsuk, Y. Gutarevych, V. Mateichyk, and V. Volkov, «Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator», *SAE Technical Paper*, vol. 2016-01-0204, pp. 1-9, 2016. doi: **10.4271/2016-01-0204**.
32. A. Kashkanov, A. Kashkanova, M. Podrygalo, D. Klets, O. Saraiev, M. Mikhalevich, and A. Korobko, «Estimation Parameters of Braking of Vehicles Category M1 at Definition of Circumstances Road Accidents», *SAE Technical Paper*, article 2022-01-1166, pp. 1-6, 2022. doi: **10.4271/2022-01-1166**.
33. Y. Gutarevych et al., «Improving Fuel Economy of Spark Ignition Engines Applying the Combined Method of Power Regulation», *Energies*, vol. 13, article 1076, 2020. doi: **10.3390/en13051076**.

Стаття надійшла 15.07.2024

Стаття прийнята 03.08.2024

UDC 629.05:519.21

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321374

© Abramov G.S.¹, Plotnikov V.I.²

APPLICATION OF BAYESIAN APPROACH FOR DETERMINING THE RELIABILITY OF THE NAVIGATION COMPLEX

The paper discusses the methodology based on the Bayesian approach to the assessment of posterior probabilities of various hypotheses regarding the reliability of technical system elements. The problem of estimating posterior probabilities of failures for a system with two nodes is considered. Mathematical modeling of Bayesian probabilities of hypotheses

¹Ph.D. in Physics and Mathematics, associate professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0000-0003-0333-8819, gennadabra@gmail.com

²postgraduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, ORCID: 0009-0003-1836-5462, vladplotnikov895@gmail.com

depending on the probabilities of trouble-free operation of each node was carried out. The modeling results were visualized and it was shown that the posteriori probabilities of the hypotheses significantly exceed the a priori ones. This allows you to use them as more accurate for calculating the probabilities of future events.

Keywords: Bayesian probability, navigation complex, reliability, trouble-free operation, mathematical modeling.

Абрамов Г.С., Плотніков В.І. Застосування підходу Байєса для визначення надійності навігаційного комплексу. В роботі обговорюється методологія, заснована на Байєсівському підході, до оцінки апостеріорних ймовірностей різних гіпотез щодо надійності елементів технічної системи. Такий підхід дозволяє досліджувати причинно-наслідкові зв'язки, поглибити розуміння проблемної області та прогнозувати ймовірність відмови навігаційного обладнання при виході з ладу його компонентів. Розглянута задача по оцінці апостеріорних ймовірностей відмов для системи з двох вузлів. Здійснено математичне моделювання Байєсівських ймовірностей гіпотез в залежності від ймовірностей безвідмовної роботи кожного вузла. Проведена візуалізація результатів моделювання і показано, що апостеріорні ймовірності гіпотез значно перевищують апіорні, і це перевищення тим більше, чим ближче добуток ймовірностей безвідмовної роботи вузлів до одиниці. Отримано результати, які відображають низку закономірностей: ймовірності того, що перший вузол вийшов з ладу, а другий працює, зменшуються зі збільшенням надійності першого пристрою та зростають із збільшенням надійності другого, тоді як ймовірності того, що другий вузол вийшов з ладу, а перший працює, зменшуються зі збільшенням надійності другого пристрою і зростають зі збільшенням надійності першого. При цьому ймовірність того, що обидва вузли відмовили, зменшується як зі збільшенням надійності першого пристрою, так і зі збільшенням надійності другого. Це дозволяє використовувати апостеріорні ймовірності гіпотез, як більш точні, для розрахунків ймовірностей майбутніх подій, таких як відмови навігаційного обладнання, на основі наявної інформації про його надійність. Наприклад, якщо після дослідів, в результаті якого мала місце подія А, здійснюється дослід, в результаті якого відбувається або не відбувається подія В, то умовна ймовірність події В розраховується по формулі повної ймовірності, в яку підставлені замість початкових (апіорних) ймовірностей гіпотез, нові (апостеріорні) ймовірності гіпотез.

Ключові слова: Байєсівська ймовірність, навігаційний комплекс, надійність, безвідмовна робота, математичне моделювання.

Description of the problem. Electronic transport systems play a role in numerous transportation systems. The safety and efficiency of transporting humans and cargo are greatly affected by their effective operation. Safety hazards can occur due to the unreliability of electrical equipment and errors made by operators [1-4]. The concept of unreliability focuses on studying how equipment damage and operator errors affect specific measures of unreliability. The theory of safety focuses on the outcomes of harm and mistakes that result in safety risks. The correct identification of permissible and impermissible states in the system is crucial from a safety perspective.

The state of safety hazard can sometimes be reversed by taking actions to restore full worthiness, such as diagnosing damage and attempting repairs, correcting operator errors, or neutralizing external events. The counter-measure must be carried out within the time it is accessible. If the counter-measure doesn't work or is too slow, the system transitions from the safety hazard state to the hazard state, also known as the safety unreliability state.

Enhancing the reliability parameters of electronic transport systems can lead to a boost in their safety levels. Improved reliability can result from the enhanced reliability of components or by implementing redundant structures [5-8]. The initial solution focuses on avoiding harm. In the second scenario, employing double or triple redundancy may increase the size of the system but allows for the acceptance of any damages that may occur. Redundancy can apply to the components of devices, system modules, and computers that oversee transportation operations. The importance of the data received by sensors for the systems is also crucial. Certain research papers suggest utilizing fuzzy logic [9] or

artificial neural networks [10]. Vibrations have a significant impact on electronic transport systems [11], however, they are not discussed in this article.

Analysis of the latest research and publications. Understanding system reliability is crucial for effective maintenance strategies, offering valuable information on machinery performance and the consequences of failures on machinery availability, extending to system-wide effects [12-14]. Reliability analysis tools are commonly utilized to aid in determining maintenance strategies that align with organizational goals. They typically assess the impact and potential for failure by analyzing both quantitative and qualitative aspects of maintenance and operational data from machinery [15].

Various techniques like Bayesian belief networks, Monte Carlo simulation, Markov chains, Petri Nets, and Weibull analysis have been utilized for modeling maintenance planning [16-18]. Conversely, analyzing the reliability of complex systems that involve non-binary inputs and continuous stochastic failure behavior would necessitate a unique approach to consider the temporal state of the system or a repairable mechanical system that can function acceptably even when degraded. Recent studies have also concentrated on real-time anomaly detection in ship machinery for diagnosing faults [19]; utilizing Bayesian and machine learning for fault detection and diagnostics; evaluating real-time data-driven imputation of missing data in short-term sensor data from marine systems [19]; and creating a time series imaging method for fault classification [20]. Hence, more flexibility will be needed to create a model that represents all possible factors.

As a result, researchers have turned to various tools to address system dependencies and complexities in multi-system setups [19-22]. This approach allows for the utilization of various data types for conducting reliability analysis and employing tools in a more adaptable way [23]. In this research, there will be a thorough assessment to examine the pros and cons of the reliability tools that have been utilized.

It is believed that the true failure rate of a physical process can be determined using Bayesian analysis rather than the traditional method [24]. Although a confidence distribution can be generated by extending the traditional idea of a confidence interval, this method has not been fully formalized according to Fraser [25]. The advantage of using the Bayesian approach is that it provides a more intuitive way of representing the posterior distribution of the estimated random parameter. In addition, considering this factor as constantly changing and unpredictable simplifies the analysis of situations where the method is appropriate.

Purpose and objectives of the publication. Consider the task of estimating Bayesian posterior probabilities of failure for a two-node system. Carry out mathematical modeling of Bayesian probabilities of hypotheses depending on the trouble-free operation of each node.

Summary of the main material. The navigation complex of a sea vessel is a complex system of interconnected devices, nodes, and elements, the failure of each of which can lead to a whole series of consequences that will significantly worsen the reliability and stability of the system as a whole.

In this regard, to calculate the probability of failures or the probability of failure-free operation of both individual elements and the navigation complex as a whole, it is necessary to use the concept of full probability and Bayesian probabilities of the corresponding hypotheses.

If n mutually exclusive hypotheses $H_1, H_2, \dots, H_i, \dots, H_n$ can be made about the circumstances of system functioning (in our case, the elements of the navigation complex) and if the event A that interests us (for example, system failure) can appear together with one from these hypotheses, the full probability of this event $P(A)$ is calculated by the so-called full probability formula:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(H_i)P_{H_i}(A), \quad (1)$$

where $P(H_i)$ – the probability of the hypothesis H_i , a $P_{H_i}(A)$ – conditional probability of event A under this hypothesis.

Essentially (1) is the sum of the products of the probabilities of the hypotheses on the conditional probability of the event under this hypothesis.

If event A occurred as a result of the experiment, then the new (conditional) probabilities of hypotheses $P_A(H_i)$ can be calculated using the Bayes' formula:

$$P_A(H_i) = \frac{P(H_i)P_{H_i}(A)}{\sum_{i=1}^n P(H_i)P_{H_i}(A)}. \quad (2)$$

The initial (pre-experimental) probabilities of the hypotheses $P(H_i)$ are called a priori, and the post-experimental ones, calculated according to Bayes, $P_A(H_i)$ are called a posteriori.

Based on the above theory, consider the following problem. Consider a device consisting of two nodes, in which the functioning of both nodes is necessary for the operation of the device as a whole. Let the reliability (probability of trouble-free operation during the given time) of the first device be P_1 , and of the second P_2 . Let the device be tested, and it turned out that it failed.

Let's find the following probabilities:

1. Only the first node failed, the second is working;
2. The second node failed, the first one is working;
3. Both nodes failed.

Before the test, the following hypotheses were likely:

- $H_0 = \{\text{both nodes are working}\}$
- $H_1 = \{\text{the first node has failed, the second is working}\}$
- $H_2 = \{\text{the second node has failed, the first is working}\}$
- $H_3 = \{\text{both nodes failed}\}$

Let's determine the a priori probabilities of the hypotheses:

$$P(H_0) = P_1P_2; P(H_1) = (1 - P_1)P_2; P(H_2) = P_1(1 - P_2); P(H_3) = (1 - P_1)(1 - P_2). \quad (3)$$

An event $A = \{\text{device failure}\}$ was observed, and since the conditional probabilities in this case are equal to $P_{H_0}(A) = 0, P_{H_1}(A) = P_{H_2}(A) = P_{H_3}(A) = 1$, then the full probability $P(A)$ is equal to:

$$P(A) = \sum_{i=1}^3 P(H_i)P_{H_i}(A) = (1 - P_1)P_2 + P_1(1 - P_2) + (1 - P_1)(1 - P_2) = 1 - P_1P_2. \quad (4)$$

Then the posterior probabilities of the hypotheses, according to the Bayes' formula:

$$P_A(H_1) = \frac{(1-P_1)P_2}{1-P_1P_2}; \quad (5)$$

$$P_A(H_2) = \frac{P_1(1-P_2)}{1-P_1P_2}; \quad (6)$$

$$P_A(H_3) = \frac{(1-P_1)(1-P_2)}{1-P_1P_2}. \quad (7)$$

Thus, the posterior probabilities of hypotheses increase by $(1 - P_1P_2)^{-1}$ times, that is, the closer P_1 and P_2 are to 1, the larger this multiplier is.

In the work, expressions (5)-(7) are tabulated for different values of P_1 and P_2 , and in fig. 1-6 they are visualized and compared with the a priori probabilities $P(H_i)$ ($i=1, 2, 3$).

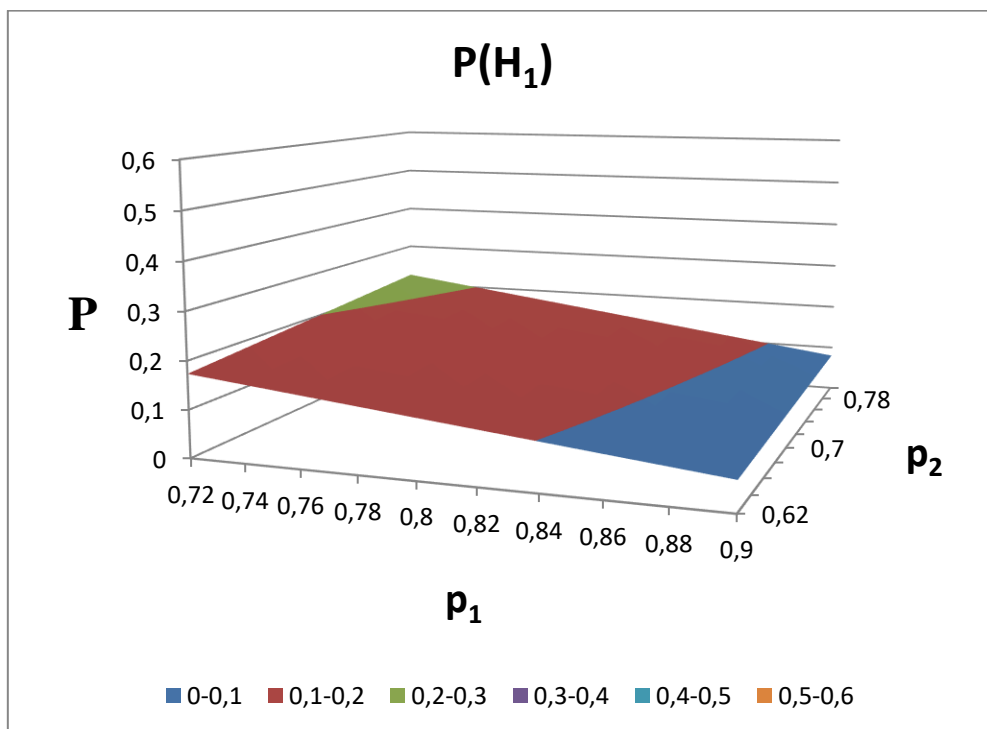


Fig. 1 – A priori probabilities of the hypothesis H_1

It can be seen that the surfaces of the posterior probabilities $P_A(H_i)$ are located much higher than the a priori ones.

It can also be seen that the a priori and a posteriori probability of the hypothesis H_1 decrease with the growth of P_1 and increase with the increase of P_2 , while the probabilities of the hypothesis H_2 , on the contrary, decrease with the growth of P_2 and increase with the increase of P_1 .

The probability of the hypothesis H_3 decreases both with the growth of P_1 and with the growth of P_2 .

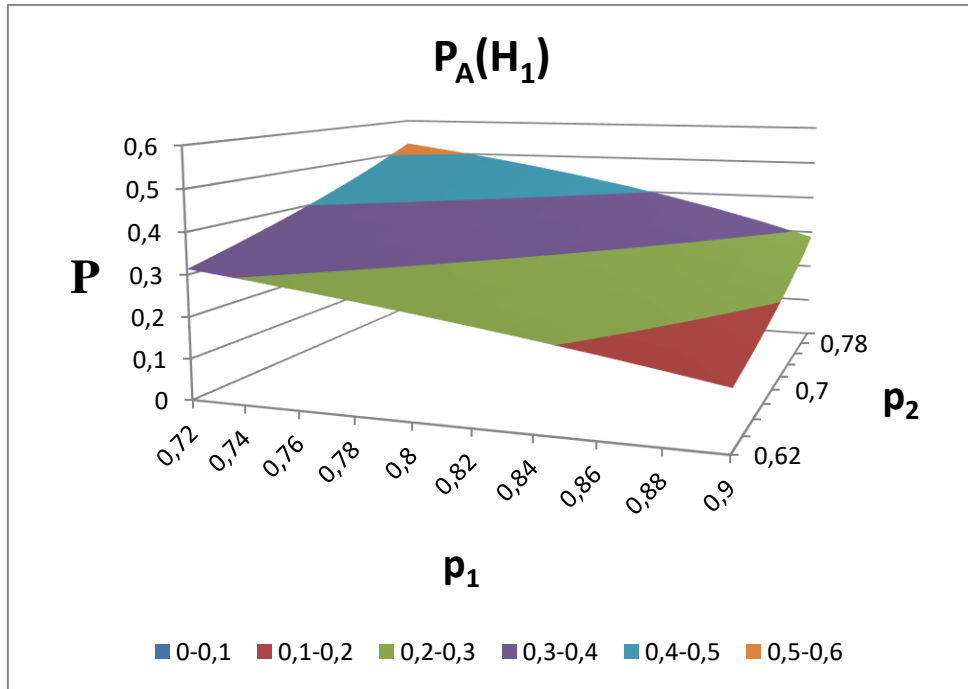


Fig. 2 – A posteriori probabilities of the hypothesis H_1

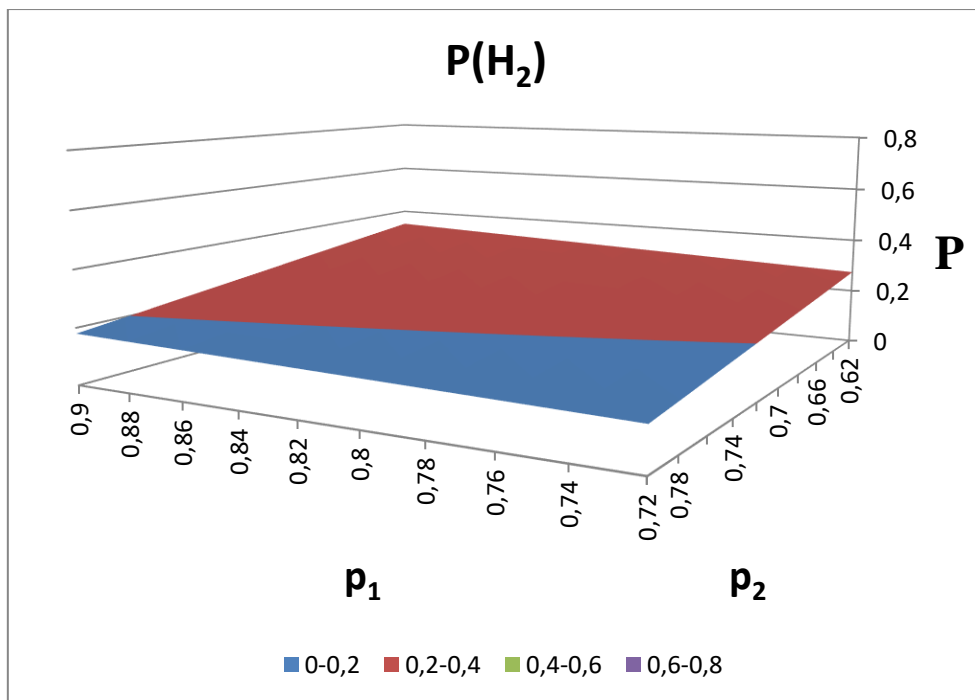


Fig. 3 – A priori probabilities of the hypothesis H_2

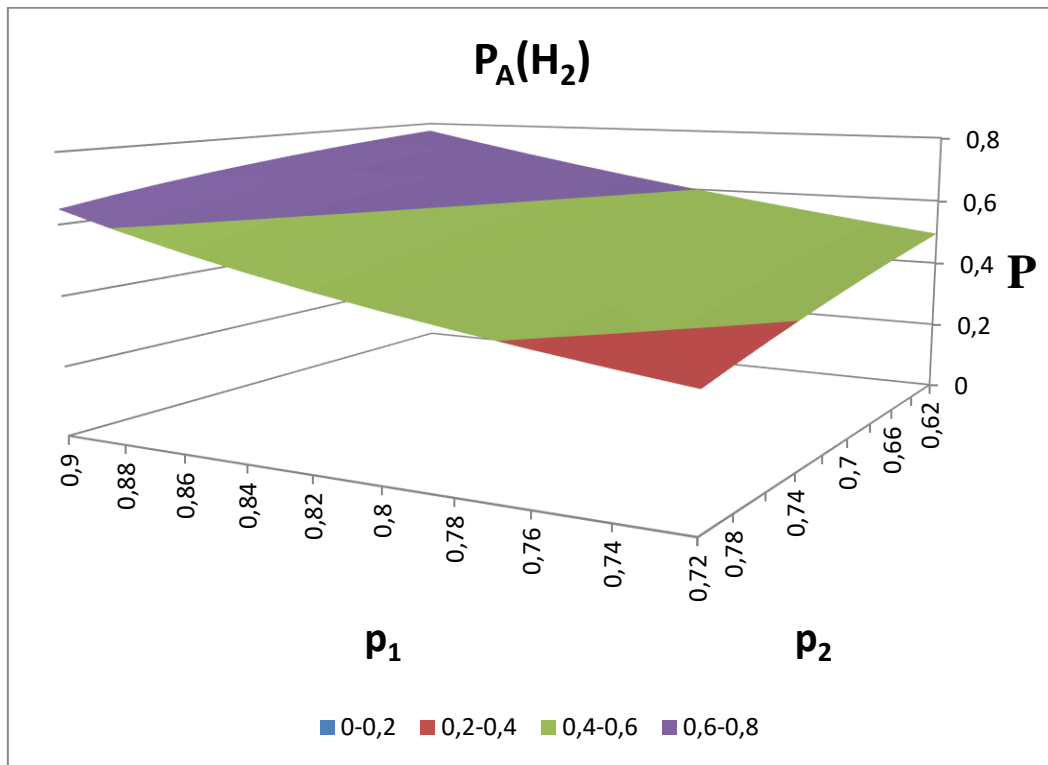


Fig. 4 – A posteriori probabilities of the hypothesis H_2

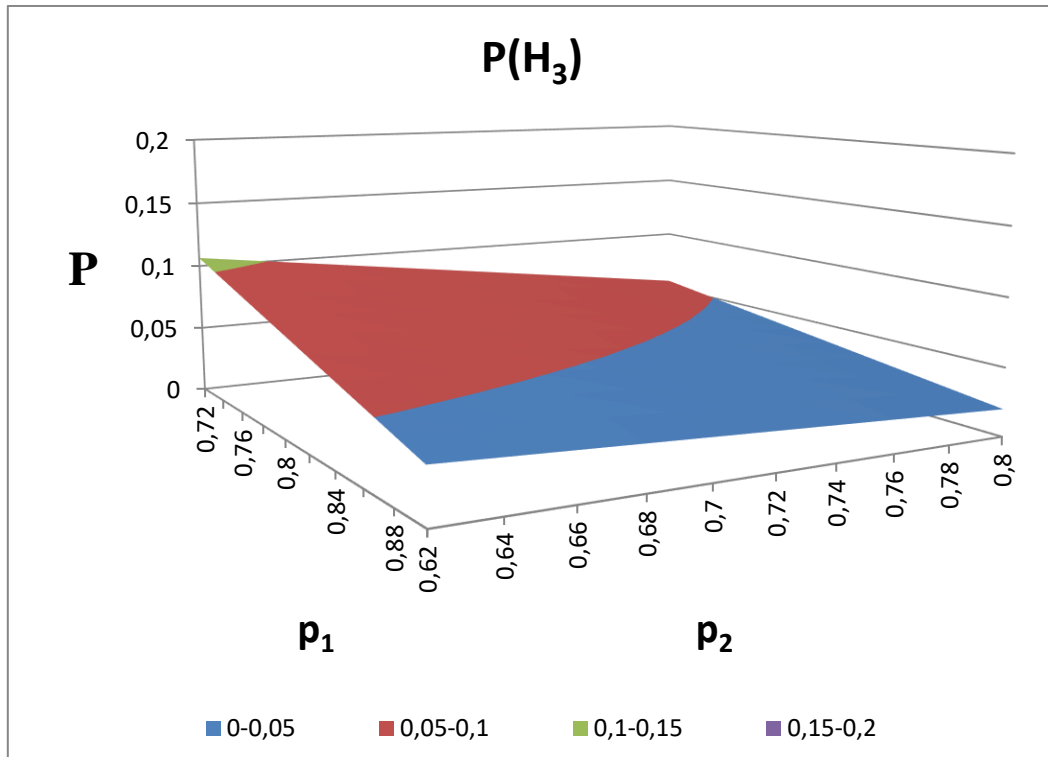


Fig. 5 – A priori probabilities of the hypothesis H_3

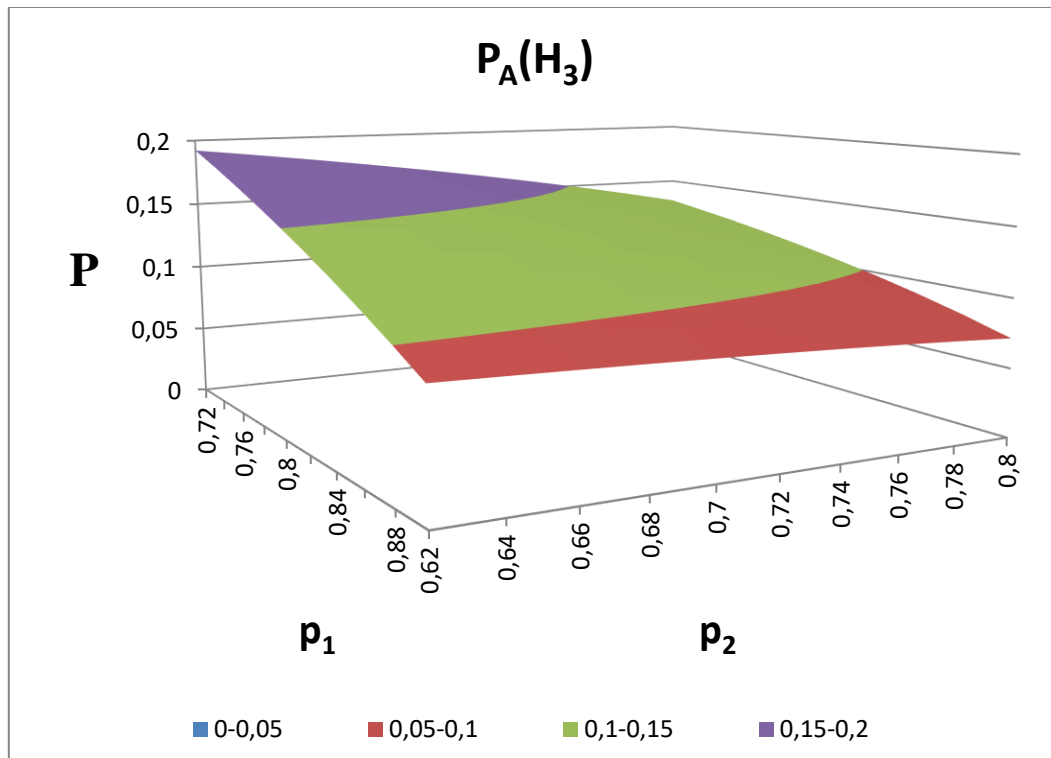


Fig. 6 – A posteriori probabilities of the hypothesis H_3

The obtained values of the posterior probabilities of the hypotheses are important because they can be used to calculate the probabilities of future events.

So, if after an experiment, as a result of which event A occurred, an experiment is carried out, as a result of which event B occurs or does not occur, then the conditional probability of event B is calculated according to the formula of full probability, in which the initial (a priori) probabilities of hypotheses $P(H_i)$, are substituted new (posterior) probabilities of hypotheses $P_A(H_i)$:

$$P_A(B) = \sum_{i=1}^n P_A(H_i)P_{H_iA}(B). \quad (8)$$

Therefore, formula (8) is called the formula for probabilities of future events. It can be used to predict the probability of failure of navigation equipment based on available information about its reliability.

Conclusions

The effectiveness of the Bayesian approach in assessing the reliability of a navigation complex is demonstrated. This approach makes it possible to study causal relationships, deepen understanding of the problem area, and predict the probability of failure of navigation equipment when its components fail.

It is evident that the posteriori probabilities of the hypotheses significantly exceed the a priori ones, and this excess is greater the closer the product of the probabilities of failure-free operation of the nodes is to one. As shown in fig. 1-6, the obtained results reflect a number of regularities: the probabilities that the first node has failed and the second one is working decrease with increasing reliability of the first device and increase with increasing reliability of the second; and vice versa, the probabilities that the second node has failed and the first one is working decrease with increasing reliability of the second device and increase with increasing reliability of the first; in turn, the probability that both nodes failed decreases both with increasing reliability of the first device and with increasing reliability of the second.

The Bayesian approach is highly effective in assessing the reliability of a navigation complex due to its ability to handle uncertainty, incorporate prior knowledge, and update reliability estimates as new information becomes available.

References:

1. P. Łubkowski, and D. Laskowski, «Selected issues of reliable identification of object in transport systems using video monitoring services», *Communication in Computer and Information Science*, vol. 471, pp. 59-68, 2015. doi: **10.1007/978-3-662-45317-9_7**.
2. J. Paś, *Operation of electronic transportation systems*. Radom, Poland: Publishing House University of Technology and Humanities, 2015.
3. T. Perzyński, A. Łukasik, and Z. Lewiński, «Safety analysis of accidents call system especially related to in-land water transport based on new telematic solutions», in Proc. 15th International Conference on Transport Systems Telematics «Tools of Transport Telematics» (TST 2015), Wrocław, Poland, 2015, pp. 90-98. doi: **10.1007/978-3-319-24577-5_9**.
4. M. Sumiła, and A. Miszkiewicz, «Analysis of the problem of interference of the public network operators to GSM-R», in Proc. 15th International Conference on Transport Systems Telematics «Tools of Transport Telematics» (TST 2015), Wrocław, Poland, 2015, pp. 76-82. doi: **10.1007/978-3-319-24577-5_25**.
5. M. Siergiejczyk, K. Krzykowska, and A. Rosiński, «Reliability assessment of cooperation and replacement of surveillance systems in air traffic», in Proc. 9-th Int. Conf. Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, Brunów, Poland, 2014, vol. 286, pp. 403-411. doi: **10.1007/978-3-319-07013-1_39**.
6. M. Siergiejczyk, K. Krzykowska, and A. Rosiński, «Reliability assessment of integrated airport surface surveillance system», in Proc. of the 10-th Int. Conf. on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX «Theory and Engineering of Complex Systems and Dependability», Brunów, Poland, 2015, vol. 365, pp. 435-443. doi: **10.1007/978-3-319-19216-1_41**.
7. M. Siergiejczyk, A. Rosiński, and K. Krzykowska, «Reliability assessment of supporting satellite system EGNOS», in Proc. 8th Int. Conf. on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX «New Results in Dependability and Computer Systems», Brunów, Poland, 2013, pp. 353-363. doi: **10.1007/978-3-319-00945-2_32**.
8. A. Weintrit, P. Dziula, M. Siergiejczyk, and A. Rosiński, «Reliability and exploitation analysis of navigational system consisting of ECDIS and ECDIS back-up systems», *Activities in Navigation*, pp. 109-115, 2015. doi: **10.1201/b18513-17**.
9. J. Skorupski, and P. Uchroński, «A fuzzy reasoning system for evaluating the efficiency of cabin luggage screening at airports», *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 54, pp. 157-175, 2015. doi: **10.1016/j.trc.2015.03.017**.
10. S. Duer, K. Zajkowski, R. Duer, and J. Paś, «Designing of an effective structure of system for the maintenance of a technical object with the using information from an artificial neural network», *Neural Computing & Applications*, vol. 23(3), pp. 913-925, 2012. doi: **10.1007/s00521-012-1016-0**.
11. R. Burdzik, Ł. Konieczny, and T. Figlus, «Concept of on-board comfort vibration monitoring system for vehicles», in Proc. 13th International Conference on Transport Systems Telematics «Activities of Transport Telematics» (TST 2013), Katowice-Ustron, Poland, 2013, pp. 418-425. doi: **10.1007/978-3-642-41647-7_51**.
12. S.I. Ahn, R.E. Kurt, and E. Akyuz, «Application of a SPAR-H based framework to assess human reliability during emergency response drill for man overboard on ships», *Ocean Engineering*, vol. 251, article 111089, 2022. doi: **10.1016/j.oceaneng.2022.111089**.
13. A. BahooToroody, M. M. Abaei, O. Valdez Banda, P. Kujala, F. De Carlo, and R. Abbassi, «Prognostic Health Management of Repairable Ship Systems through Different Autonomy Degree; from Current Condition to Fully Autonomous Ship», *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 221, article 108355, 2022. doi: **10.1016/j.ress.2022.108355**.
14. A.A. Daya, and I. Lazakis, «Investigating ship system performance degradation and failure criticality using FMECA and Artificial Neural Networks», *Trends in Maritime Technology and Engineering*, vol. 2, pp. 185-195, 2022. doi: **10.1201/9781003320289-20**.
15. Ç. Karatug, and Y. Arslanoğlu, «Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems», *Ocean Engineering*, vol. 256, article 111515, 2022. doi: **10.1016/j.oceaneng.2022.111515**.

16. S. Kabir, and Y. Papadopoulos, «Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: a review», *Safety Science*, vol. 115, pp. 154-175, 2019. doi: **10.1016/j.ssci.2019.02.009**.
17. M. Leimeister, and A. Kolios, «A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 1065-1076, 2018. doi: **10.1016/j.rser.2018.04.004**.
18. A.H.A. Melani, C.A. Murad, A.C. Netto, G.F.M. de Souza, and S.I. Nabeta, «Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant», *Energy*, vol. 147, pp. 767-781, 2018. doi: **10.1016/j.energy.2018.01.048**.
19. C. Velasco-Gallego, and I. Lazakis, «RADIS: a real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery», *Expert Systems with Applications*, vol. 204, article 117634, 2022. doi: **10.1016/j.eswa.2022.117634**.
20. C. Velasco-Gallego, and I. Lazakis, «A real-time data-driven framework for the identification of steady states of marine machinery», *Applied Ocean Research*, vol. 121, article 103052, 2022. doi: **10.1016/j.apor.2022.103052**.
21. A.B. Marving Rausand, and A. Hoyland, *System Reliability Theory Models, Statistical Methods and Application*, 3-d ed. Wiley, 2021.
22. F. Piadeh, M. Ahmadi, and K. Behzadian, «Reliability assessment for hybrid systems of advanced treatment units of industrial wastewater reuse using combined event tree and fuzzy fault tree analyses», *Journal of Cleaner Production*, vol. 201, pp. 958-973, 2018. doi: **10.1016/j.jclepro.2018.08.052**.
23. M. Leimeister, and A. Kolios, «A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 1065-1076, 2018. doi: **10.1016/j.rser.2018.04.004**.
24. J. Neyman, «Outline of a Theory of Statistical Estimation Based on the Classical Theory of Probability», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A*, vol. 236, pp. 333-380, 1937. doi: **10.1098/rsta.1937.0005**.
25. D.A.S. Fraser, «Is Bayes Posterior just quick and dirty confidence?», *Statistical Science*, vol. 26, pp. 299-316, 2011. doi: **10.1214/11-STS352**.

Перелік використаних джерел:

1. Łubkowski P., Laskowski D. Selected issues of reliable identification of object in transport systems using video monitoring services. *Communication in Computer and Information Science*. 2015. Vol. 471. Pp. 59-68. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-45317-9_7.
2. Paś J. Operation of electronic transportation systems. Radom: Publishing House University of Technology and Humanities, 2015.
3. Perzyński T., Łukasik A, Lewiński Z. Safety analysis of accidents call system especially related to in-land water transport based on new telematic solutions. *Tools of Transport Telematics : 15th International Conference on Transport Systems Telematics (TST 2015)*, Wrocław, Poland, 15-17 April 2015. Pp. 90-98. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24577-5_9.
4. Sumiła M., Miskiewicz A. Analysis of the problem of interference of the public network operators to GSM-R. *Tools of Transport Telematics : 15th International Conference on Transport Systems Telematics (TST 2015)*, Wrocław, Poland, 15-17 April 2015. Pp. 76-82. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-24577-5_25.
5. Siergiejczyk M., Krzykowska K., Rosiński A. Reliability assessment of cooperation and replacement of surveillance systems in air traffic. *Proceedings of the Ninth International Conference Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX*, Brunów, Poland, 30 June - 4 July 2014. Vol. 286. Pp. 403-411. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-07013-1_39.
6. Siergiejczyk M., Krzykowska K., Rosiński A. Reliability assessment of integrated airport surface surveillance system. *Theory and Engineering of Complex Systems and Dependability : Proceedings of the Tenth International Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX*, Brunów, Poland, 29 June - 3 July 2015. Vol. 365. Pp. 435-443. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-19216-1_41.
7. Siergiejczyk M., Rosiński A., Krzykowska K. Reliability assessment of supporting satellite system EGNOS. *New Results in Dependability and Computer Systems : Proceedings of the 8th International*

- Conference on Dependability and Complex Systems DepCoS-RELCOMEX, Brunów, Poland, 9-13 September 2013. Pp. 353-363. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-00945-2_32.
8. Reliability and exploitation analysis of navigational system consisting of ECDIS and ECDIS back-up systems / Weintrit A., Dziula P., Siergiejczyk M., Rosiński A. *Activities in Navigation*. 2015. Pp. 109-115. DOI: <https://doi.org/10.1201/b18513-17>.
 9. Skorupski J., Uchroński P. A fuzzy reasoning system for evaluating the efficiency of cabin luggage screening at airports. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2015. Vol. 54. Pp. 157-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.03.017>.
 10. Designing of an effective structure of system for the maintenance of a technical object with the using information from an artificial neural network / Duer S., Zajkowski K., Duer R., Paś J. *Neural Computing & Applications*. 2012. Vol. 23(3). Pp. 913-925. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00521-012-1016-0>.
 11. Burdzik R., Konieczny Ł., Figlus T. Concept of on-board comfort vibration monitoring system for vehicles. *Activities of Transport Telematics : Proceedings of the 13th International Conference on Transport Systems Telematics (TST 2013)*, Katowice-Ustron, Poland, 23-26 October 2013. Pp. 418-425. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-41647-7_51.
 12. Ahn S. I., Kurt R. E., Akyuz E. Application of a SPAR-H based framework to assess human reliability during emergency response drill for man overboard on ships. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 251. Article 111089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111089>.
 13. Prognostic Health Management of Repairable Ship Systems through Different Autonomy Degree; from Current Condition to Fully Autonomous Ship / T. BahooToroody et al. *Reliability Engineering & System Safety*. 2022. Vol. 221. Article 108355. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108355>.
 14. Daya A. A., Lazakis I. Investigating ship system performance degradation and failure criticality using FMECA and Artificial Neural Networks. *Trends in Maritime Technology and Engineering*. 2022. Vol. 2. Pp. 185-195. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003320289-20>.
 15. Karatug Ç., Arslanoğlu Y. Development of condition-based maintenance strategy for fault diagnosis for ship engine systems. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 256. Article 111515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111515>.
 16. Kabir S., Papadopoulos Y. Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: a review. *Safety Science*. 2019. Vol. 115. Pp. 154-175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.009>.
 17. Leimeister M., Kolios A. A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. Pp. 1065-1076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004>.
 18. Criticality-based maintenance of a coal-fired power plant / A. H. A. Melani et al. *Energy*. 2018. Vol. 147. Pp. 767-781. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.01.048>.
 19. Velasco-Gallego C., Lazakis I. RADIS: a real-time anomaly detection intelligent system for fault diagnosis of marine machinery. *Expert Systems with Applications*. 2022. Vol. 204. Article 117634. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117634>.
 20. Velasco-Gallego C., Lazakis I. A real-time data-driven framework for the identification of steady states of marine machinery. *Applied Ocean Research*. 2022. Vol. 121. Article 103052. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2022.103052>.
 21. Marving Rausand A. B., Hoyland A. *System Reliability Theory Models, Statistical Methods and Application*. 3-d ed. Wiley, 2021. 864 p.
 22. Piadeh F., Ahmadi M., Behzadian K. Reliability assessment for hybrid systems of advanced treatment units of industrial wastewater reuse using combined event tree and fuzzy fault tree analyses. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 201. Pp. 958-973. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.052>.
 23. Leimeister M., Kolios A. A review of reliability-based methods for risk analysis and their application in the offshore wind industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. Pp. 1065-1076. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.004>.
 24. Neyman J. Outline of a Theory of Statistical Estimation Based on the Classical Theory of Probability. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A*. 1937. Vol. 236. Pp. 333-380. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.1937.0005>.

25. Fraser D. A. S. Is Bayes Posterior just quick and dirty confidence? *Statistical Science*. 2011. Vol. 26. Pp. 299-316. DOI: <https://doi.org/10.1214/11-STS352>.

Стаття надійшла 15.10.2024

Стаття прийнята 29.10.2024

УДК 551.46.077:629.584:681.518.3

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321376

© Томчаковський Г.Г.*

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ОКЕАНОМ: АНАЛІЗ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Океани відіграють ключову роль у формуванні клімату Землі та підтримці глобальних екосистем, однак їх вивчення пов'язане зі значними труднощами через величезні розміри та складність процесів, що в них відбуваються. Створення комплексної системи спостережень, яка б забезпечувала отримання точних і оперативних даних про стан океану в глобальному масштабі, є актуальною проблемою сучасної океанології. Традиційні методи дослідження океану за допомогою науково-дослідних суден мають обмежені можливості і не дозволяють отримувати дані з достатньою просторово-часовою роздільною здатністю. Мета статті – систематизація та аналіз сучасних технологій спостереження за океаном, визначення їх можливостей, обмежень та перспектив розвитку для формування цілісного уявлення про комплекс методів і засобів дистанційного моніторингу океану. У статті проаналізовано основні типи технологій спостереження за океаном: заякорені буї, океанські дрейфтери, глайдери та супутникові технології. Розглянуто їх принципи роботи, переваги та обмеження. Виявлено основні напрямки розвитку технологій спостереження за океаном, включаючи вдосконалення датчиків та вимірювальних систем, розробку нових типів автономних платформ, розвиток методів обробки даних з використанням штучного інтелекту та інтеграцію різних систем спостереження в єдину глобальну мережу. Підкреслено важливість створення нових типів платформ, таких як автономні апарати типу надводних та підводних глайдерів, здатних здійснювати тривалі місії з мінімальними витратами енергії. Зроблено висновок, що комплексне використання різних технологій спостереження дозволяє отримувати найбільш повну картину стану океану. Підкреслено важливість міжнародного співробітництва у створенні глобальної системи моніторингу океану, прикладом якого є глобальна система спостережень за океаном. Визначено перспективні напрямки подальших досліджень, зокрема розробку методів комплексного аналізу даних від різних систем спостереження, вдосконалення алгоритмів обробки супутникових даних, дослідження можливостей використання нових технологій для підвищення точності вимірювань океанографічних параметрів.

Ключові слова: океанографія, дистанційне зондування, буї, дрейфтери, супутникові технології, моніторинг океану, глобальна система спостережень, альтиметрія, глайдери, обробка даних.

G.G. Tomchakovsky. Modern technologies for ocean observation: analysis and development prospects. The oceans play a key role in shaping the Earth's climate and maintaining global ecosystems, but their study is fraught with significant difficulties due to the enormous size and complexity of the processes taking place in them. The creation of a comprehensive observation system that would provide accurate and timely data on the state

* ст. викладач, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-9799-4368, gtomchakovsky@gmail.com

of the ocean on a global scale is an urgent problem of modern oceanology. Traditional methods of ocean research using research vessels have limited capabilities and do not allow obtaining data with sufficient spatial and temporal resolution. The purpose of the article is to systematize and analyze modern ocean observation technologies, identify their capabilities, limitations and development prospects in order to form a holistic view of the complex of methods and means of remote ocean monitoring. The article analyses the main types of ocean observation technologies: moored buoys, ocean drifters, gliders and satellite technologies. Their operating principles, advantages and limitations are considered. The main areas of development of ocean observation technologies are identified, including the improvement of sensors and measurement systems, the development of new types of autonomous platforms, the development of data processing methods using artificial intelligence, and the integration of various observation systems into a single global network. The author emphasizes the importance of creating new types of platforms, such as autonomous vehicles such as surface and underwater gliders, capable of carrying out long-term missions with minimal energy consumption. It is concluded that the integrated use of various observation technologies allows to obtain the most complete picture of the ocean state. The importance of international cooperation in the creation of a global ocean monitoring system, as exemplified by the Global Ocean Observing System, is emphasized. Promising areas for further research have been identified, including the development of methods for integrated analysis of data from various observation systems, improvement of satellite data processing algorithms, and exploration of the possibilities of using new technologies to improve the accuracy of oceanographic measurements.

Keywords: *oceanography, remote sensing, buoys, drifters, satellite technology, ocean monitoring, global observing system, altimetry, gliders, data processing.*

Постановка проблеми. Океан відіграє ключову роль у формуванні клімату землі, підтримці глобальних екосистем та економічній діяльності людства. Він займає близько 71% поверхні планети і містить приблизно 97% усієї води на землі. Океан є головним регулятором глобального вуглецевого циклу, поглинаючи значну частину антропогенних викидів CO₂. Крім того, океанічні течії відіграють важливу роль у перерозподілі тепла на планеті, впливаючи на континентальний клімат.

Вивчення океану пов'язане зі значними труднощами через його величезні розміри та складність процесів, що в ньому відбуваються. Традиційні методи дослідження океану за допомогою науково-дослідних суден мають обмежені можливості і не дозволяють отримувати дані з достатньою просторово-часовою роздільною здатністю.

Проблема полягає у необхідності створення комплексної системи спостережень, яка б забезпечувала отримання точних і оперативних даних про стан океану в глобальному масштабі.

Це має важливе значення для:

- розуміння та прогнозування кліматичних змін;
- вдосконалення методів прогнозування погоди;
- вивчення та моніторингу океанічних екосистем;
- забезпечення безпеки мореплавства;
- раціонального використання морських ресурсів;
- оцінки впливу антропогенної діяльності на океан;
- раннього попередження про небезпечні явища (тропічні циклони, льодову обстановку, цунамі, штормові нагони тощо).

Вирішення цієї проблеми тісно пов'язане з такими важливими науковими та практичними завданнями:

1. Розробка нових технологій дистанційного зондування океану.
2. Створення глобальної мережі автономних платформ для спостереження за океаном.
3. Розвиток методів обробки та аналізу великих масивів океанографічних даних.
4. Вдосконалення моделей циркуляції океану та взаємодії океан-атмосфера.
5. Інтеграція різних систем спостереження в єдину глобальну мережу.

- б. Стандартизація методів вимірювань та форматів даних для забезпечення їх сумісності з метою створення гідрометеорологічної інформаційної системи.

Актуальність дослідження обумовлена важливою роллю океану у формуванні клімату планети та необхідністю більш точного прогнозування його стану для вирішення широкого кола наукових та практичних завдань. В умовах глобальних кліматичних змін розуміння процесів, що відбуваються в океані, стає критично важливим для розробки стратегій адаптації та пом'якшення наслідків цих змін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження технологій спостереження за океаном активно розвивається протягом останніх десятиліть. Значний внесок у розвиток методів дистанційного зондування океану зробили роботи, які проаналізували еволюцію супутникових технологій від перших штучних супутників до сучасних систем спостереження за океаном [1]. Було розглянуто основні етапи розвитку супутникового дистанційного зондування, включаючи запуск перших метеорологічних супутників серії TIROS у 1960-х роках, створення супутників серії LANDSAT для спостереження за поверхнею землі у 1970-х роках та розробку спеціалізованих океанографічних супутників, таких як TOPEX/POSEIDON та JASON, у 1990-2000-х роках.

Дослідження методів визначення температури поверхні океану за допомогою багатоканальних радіометрів призвело до значного прогресу в цій галузі [2]. Були розроблені алгоритми, що дозволяють враховувати вплив атмосфери на вимірювання температури поверхні океану, що значно підвищило точність супутникових даних.

Питання розробки та застосування дрейфуючих буїв детально розглянуті в ряді важливих досліджень. Зокрема, було описано методику та результати використання дрейфтерів для вивчення прибережних течій в рамках експерименту CODE (Coastal Ocean Dynamics Experiment) [3]. Цей експеримент, проведений у 1981-1982 роках біля узбережжя Каліфорнії, дозволив отримати унікальні дані про структуру та динаміку прибережних течій.

Інші дослідження виявили проблему виникнення помилкових трендів у даних глобальної мережі дрейфтерів, що має важливе значення для інтерпретації отриманих результатів [4]. Було встановлено, що зміни в конструкції дрейфтерів та методах обробки даних можуть призводити до виникнення артефактів у довгострокових рядах даних про поверхневі течії. Це дослідження підкреслило важливість ретельного калібрування та валідації даних дрейфтерів.

Огляд програми поверхневих дрейфтерів SVP (Surface Velocity Program) представив основу глобальної мережі спостережень за поверхневими течіями, що є важливим компонентом сучасної системи океанографічних спостережень [5]. Було описано конструкцію дрейфтерів, методи обробки даних та основні наукові результати, отримані за допомогою цієї програми.

Сучасний стан та перспективи розвитку комплексних систем спостереження за океаном аналізуються в ряді ключових робіт. Дослідження методів вимірювання метеорологічних параметрів та потоків на межі океан-атмосфера представило важливі результати для розуміння взаємодії океану та атмосфери [6]. Описано сучасні технології, що використовуються на заякорених буях для вимірювання таких параметрів, як швидкість вітру, температура повітря та води, вологість, атмосферний тиск, сонячна радіація та опади.

Дослідження точності вимірювань, з використанням заякорених буїв у Гольфстрімі дозволило оцінити надійність отриманих даних в умовах інтенсивної океанічної динаміки [7]. Було проведено детальний аналіз даних, отриманих за допомогою буя, встановленого в зоні інтенсивної взаємодії океану та атмосфери. Це дослідження дозволило оцінити точність вимірювань різних параметрів та виявити фактори, що впливають на якість даних.

Огляд сучасних технологій конструювання океанографічних буїв представив важливу інформацію про технічні аспекти цих пристроїв [8]. Розглянуто різні типи буїв, методи їх закріплення, системи енергозабезпечення та передачі даних. Особливу увагу приділено проблемам забезпечення довготривалої автономної роботи буїв в складних умовах відкритого океану.

Інженерні аспекти створення океанічних обсерваторій розглянуто в дослідженні, яке висвітлює ключові технічні проблеми та їх можливі рішення [9]. Проаналізовано проблеми, пов'язані з розробкою та встановленням донних кабельних систем для довготривалого моніторингу океану, включаючи питання енергозабезпечення, передачі даних та захисту обладнання від корозії та біобростання.

Огляд сучасних методів дистанційного зондування океану та їх застосування для фізичних океанографічних досліджень представив комплексний аналіз цієї важливої галузі [10].

Розглянуто принципи роботи різних типів супутникових датчиків, включаючи радіометри, альтиметри, скаттерометри та спектродіометри, а також методи обробки та інтерпретації супутникових даних.

Незважаючи на значний обсяг досліджень, залишається актуальним питання комплексного аналізу сучасних технологій спостереження за океаном та перспектив їх розвитку в контексті створення глобальної системи моніторингу океану. Зокрема, недостатньо вивченими залишаються питання інтеграції даних різних систем спостереження, розробки нових типів автономних платформ для дослідження океану, а також застосування методів штучного інтелекту для аналізу великих масивів океанографічних даних.

Мета даної роботи полягає у систематизації та аналізі сучасних технологій спостереження за океаном, визначенні їх можливостей, обмежень та перспектив розвитку для формування цілісного уявлення про комплекс методів і засобів дистанційного моніторингу океану.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

1. Проаналізувати основні типи технологій спостереження за океаном – заякорені буї, океанські дрейфтери та супутникові датчики.
2. Визначити їх можливості, переваги та обмеження у вимірюванні різних параметрів океану.
3. Оцінити перспективи розвитку комплексних систем моніторингу океану.
4. Розробити рекомендації щодо вдосконалення існуючих систем спостереження за океаном.

Наукова новизна дослідження полягає у комплексному аналізі сучасних технологій спостереження за океаном з урахуванням останніх досягнень у цій галузі та визначенні перспективних напрямків їх розвитку. На відміну від попередніх досліджень, які зазвичай фокусувалися на окремих типах технологій, дана робота розглядає весь спектр методів спостереження за океаном у їх взаємозв'язку. Це дозволяє сформулювати цілісне уявлення про можливості та обмеження сучасних систем моніторингу океану та визначити шляхи їх вдосконалення.

Виклад основного матеріалу.

Заякорені буї. Заякорені буї (рис. 1) є важливим елементом сучасних систем спостереження за океаном. Вони являють собою стаціонарні платформи, закріплені на морському дні за допомогою якорної системи. Основною перевагою заякорених буїв є можливість проведення довготривалих спостережень у фіксованій точці океану.

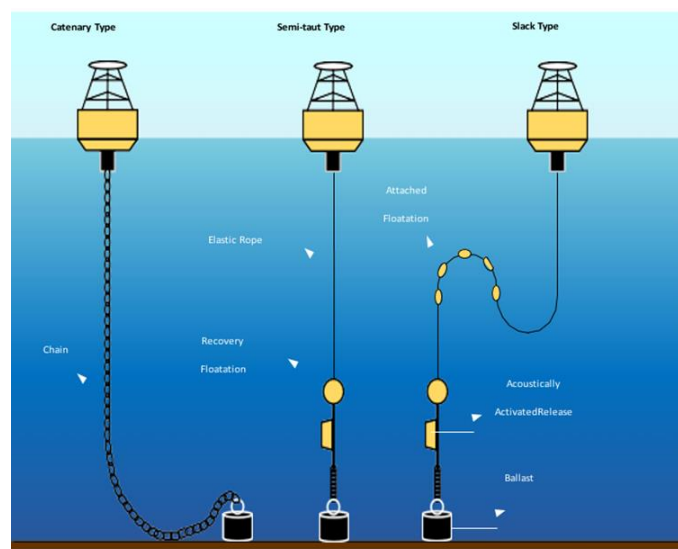


Рис. 1 – Типи заякорених буїв

Історія застосування заякорених буїв для океанографічних досліджень почалася в 1960-х роках. Одним з перших великих проєктів був експеримент BOMEX (Barbados Oceanographic and

Meteorological Experiment), проведений у 1969 році. Цей експеримент включав розгортання мережі заякорених буїв у тропічній Атлантиці для вивчення взаємодії океану та атмосфери.

Значним кроком у розвитку систем заякорених буїв стала програма «Глобальна Атмосфера Тропічного Океану» (TOGA), започаткована наприкінці 1970-х років [11]. В рамках цієї програми було створено мережу буйкових станцій у тропічній зоні Тихого океану для вивчення явища Ель-Ніньо. Ця мережа, відома як ТАО (Tropical Atmosphere Ocean), згодом була розширена на інші райони Світового океану [12].

Сучасні заякорені буї оснащуються комплексом датчиків для вимірювання різноманітних параметрів:

- метеорологічних (температура повітря, вологість, атмосферний тиск, швидкість і напрямок вітру);
- океанографічних (температура і солоність води на різних горизонтах, швидкість і напрямок течій);
- параметрів хвилювання (висота, період і напрямок хвиль).

Крім того, деякі буї обладнані датчиками для вимірювання біогеохімічних параметрів, таких як концентрація хлорофілу, розчиненого кисню, Ph води тощо.

Важливою особливістю сучасних буйкових станцій є можливість передачі даних в режимі реального часу через супутникові канали зв'язку. Це дозволяє оперативно отримувати інформацію про стан океану і атмосфери. Наприклад, дані буїв ТАО передаються кожну годину і використовуються для оперативного прогнозування погоди та моніторингу стану тропічного Тихого океану.

Сучасні заякорені буї здатні працювати автономно протягом тривалого часу (до року і більше) завдяки використанню енергоефективної електроніки, систем енергозабезпечення на основі сонячних батарей та інших відновлювальних джерел енергії. Наприклад, буї ATLAS (Autonomous Temperature Line Acquisition System), що використовуються в мережі ТАО, можуть працювати без обслуговування до 12 місяців.

Основні переваги заякорених буїв:

- Можливість довготривалих спостережень у фіксованій точці.
- Висока точність вимірювань.
- Можливість вимірювання параметрів на різних глибинах.
- Оперативна передача даних в режимі реального часу.

Обмеження заякорених буїв:

- Висока вартість установки та обслуговування.
- Обмежене просторове покриття.
- Вразливість до пошкоджень (шторми, вандалізм, зіткнення з суднами).

Океанські дрейфтери. Океанські дрейфтери (дрейфуючі буї) є важливим доповненням до мережі стаціонарних заякорених буїв. Їх головною перевагою є можливість охоплення великих акваторій при відносно невеликих витратах енергії.

Історія використання дрейфтерів для океанографічних досліджень почалася ще в ХІХ столітті, коли для вивчення течій використовувалися так звані «пляшкові пошти». Однак справжній прорив у цій галузі відбувся в другій половині ХХ століття з розвитком супутникових систем зв'язку та позиціонування.

Сучасні дрейфтери являють собою автономні платформи, що вільно переміщуються під дією течій [13]. Вони оснащуються датчиками для вимірювання температури і солоності води, атмосферного тиску. Деякі моделі також мають можливість вимірювати профіль температури у верхньому шарі океану.

Типова конструкція дрейфтера включає (рис. 2):

1. Поверхневий буй з антеною GPS та супутникового зв'язку.
2. Підповерхнє «вітрило» для забезпечення дрейфу разом з водними масами.
3. Датчики температури, солоності та інших параметрів.

Важливою особливістю дрейфтерів є наявність системи визначення координат (як правило, на основі IRIDIUM, GPS) та передачі даних через супутникові канали зв'язку. Це дозволяє відстежувати траєкторію руху буя і отримувати інформацію про течії.

Масове застосування дрейферів почалося в рамках експерименту з динаміки прибережної зони США (CODE) у 1980-х роках [3]. Цей експеримент дозволив отримати унікальні дані про циркуляцію вод у прибережних районах.

Спочатку глобальна мережа дрейфуючих буїв налічувала кілька тисяч одиниць. Однією з таких програм є Global Drifter Program (GDP), яка підтримує мережу з близько 1500 дрейферів, рівномірно розподілених по світовому океану. Ці буї забезпечують оперативною інформацією служби погоди, океанографічні центри, системи пошуку і рятування на морі.

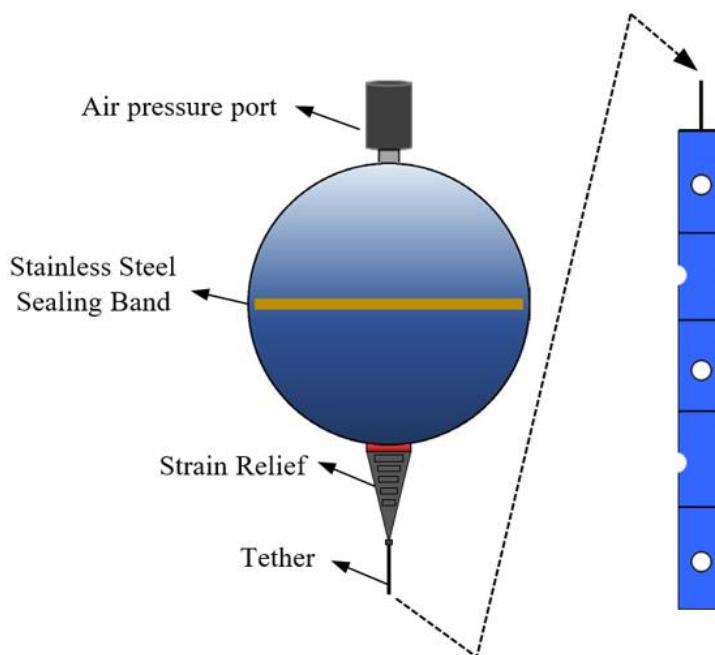


Рис. 2 – Тип дрейфуючого буя

Але найбільшим кроком у розвитку глобальної системи спостережень за океаном стало створення програми ARGO (рис. 3). Ця програма передбачає розгортання мережі автономних дрейфуючих буїв, здатних вимірювати вертикальні профілі температури і солоності до глибини 2000 м. На сьогодні в рамках програми ARGO функціонує більше 4000 буїв, що забезпечують глобальне покриття світового океану.

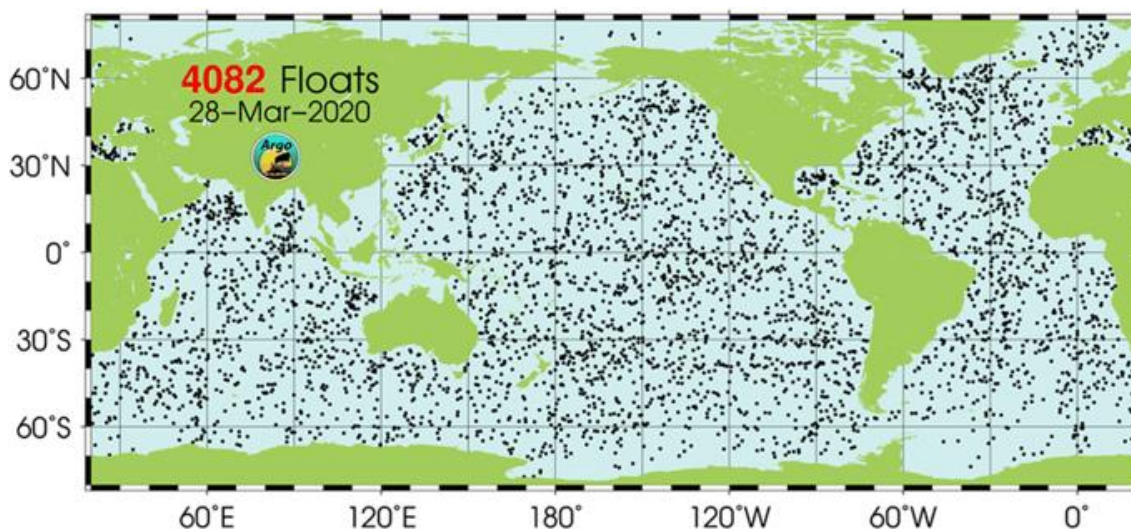


Рис. 3 – Схема мережі дрейферів ARGO

Дані дрейфтерів широко використовуються для валідації супутникових вимірювань та чисельних моделей океану. Вони є особливо цінними для вивчення поверхневої циркуляції океану, включаючи великомасштабні течії, вихори та фронтальні зони.

Автономні глайдери. Особливої уваги заслуговують автономні глайдери, які представляють собою новий клас платформ для спостереження за океаном. Одним з найбільш успішних прикладів таких систем є Wave Glider, розроблений компанією Liquid Robotics (рис. 4).

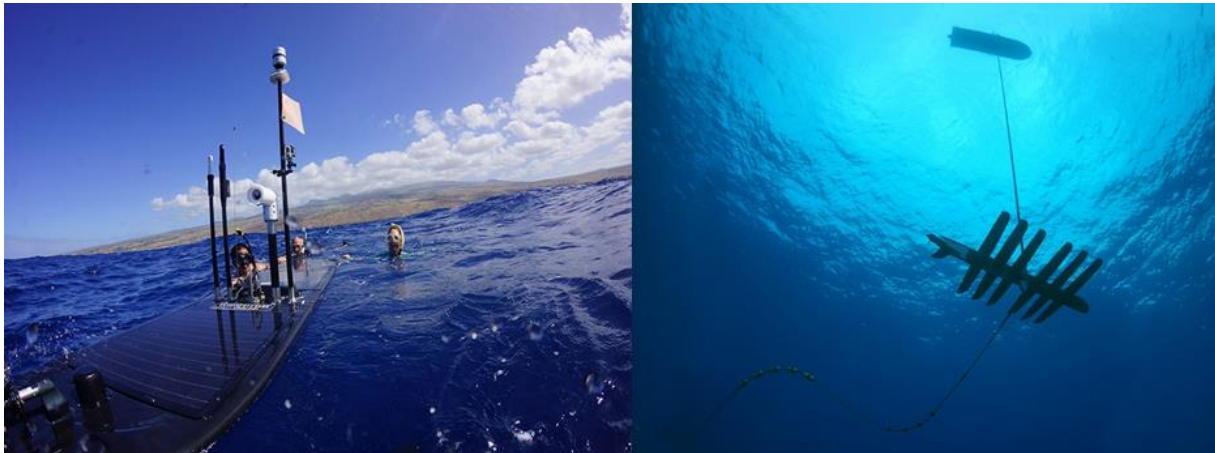


Рис. 4 – Безпілотний надводний апарат «Wave Glider»

Wave Glider використовує енергію океанських хвиль для руху, перетворюючи різницю в русі між поверхнею океану та спокійнішими глибинними водами у поступальний рух. Сонячні батареї забезпечують живлення бортової електроніки, датчиків та комунікаційних систем. Така гібридна система енергозабезпечення дозволяє апарату функціонувати протягом багатьох місяців без необхідності повернення на базу.

На борту Wave Glider встановлюється широкий спектр датчиків:

- метеорологічні та океанографічні сенсори;
- сейсмічні датчики для виявлення землетрусів і цунамі;
- відеокамери та акустичні системи;
- системи моніторингу навколишнього середовища.

Глайдери дозволяють отримувати дані у важкодоступних районах океану та здійснювати тривалі спостереження з мінімальними експлуатаційними витратами. Вони особливо ефективні для дослідження мезомасштабних процесів та моніторингу змін океанічного середовища.

Супутникові засоби дослідження океану. Супутникові технології відіграють ключову роль у сучасних системах спостереження за океаном. Вони дозволяють отримувати дані з глобальним охопленням та високою періодичністю оновлення.

Історія супутникових спостережень за океаном почалася в 1960-х роках з запуском перших метеорологічних супутників. Однак справжній прорив відбувся в 1970-80-х роках з розвитком спеціалізованих океанографічних супутників.

Основними типами супутникових датчиків для дослідження океану є:

1. радіометри – вимірюють температуру поверхні океану;
2. альтиметри – визначають висоту морської поверхні;
3. скаттерометри – вимірюють швидкість і напрямок приповерхневого вітру;
4. спектродіаметри – визначають колір океану (для оцінки концентрації хлорофілу).

Супутникова альтиметрія є одним з найважливіших методів дистанційного зондування океану [14] (рис. 5). Вона дозволяє вимірювати висоту морської поверхні з точністю до кількох сантиметрів. На основі цих даних визначаються аномалії рівня моря, геострофічні течії, параметри хвилювання. Принцип роботи супутникового альтиметра базується на вимірюванні часу проходження радіоімпульсу від супутника до поверхні океану і назад. Знаючи точні координати супутника, можна визначити висоту морської поверхні. Сучасні альтиметри, такі як ті, що

встановлені на супутниках серії JASON, забезпечують точність вимірювання висоти морської поверхні до 2-3 см.

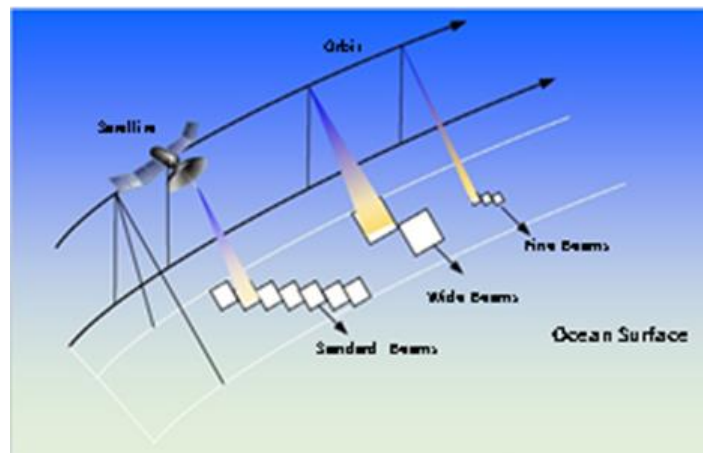


Рис. 5 – Дистанційне зондування за допомогою супутника

Важливою особливістю супутникових вимірювань є необхідність врахування численних джерел похибок, таких як вплив атмосфери, похибки орбіти супутника тощо. Для цього розроблені складні алгоритми обробки даних.

Сучасні супутникові системи дозволяють вимірювати такі параметри океану:

- температура поверхні (точність 0,3-0,5°C)
- солоність поверхневого шару (точність 0,2-0,4 psu)
- висота морської поверхні (точність 2-4 см)
- швидкість приповерхневого вітру (точність 1,5-2 м/с)
- висота хвиль (точність 0,5 м або 10%)
- концентрація хлорофілу (точність 30-50%).

Важливим напрямком розвитку супутникових технологій є створення угруповань супутників, що дозволяє підвищити просторово-часову роздільну здатність вимірювань. Прикладом такого підходу є система JASON для альтиметричних вимірювань, яка включає кілька супутників на орбіті одночасно.

Основні переваги супутникових методів:

- Глобальне охоплення.
- Висока періодичність спостережень.
- Можливість отримання даних у важкодоступних районах.
- Довгострокова стабільність вимірювань.

Обмеження супутникових методів:

- Обмежена просторова роздільна здатність.
- Вплив атмосфери на вимірювання.
- Складність калібрування та валідації даних.
- Висока вартість розробки та запуску супутників.

Перспективи розвитку технологій спостереження за океаном. Аналіз сучасного стану технологій спостереження за океаном дозволяє визначити основні напрямки їх подальшого розвитку:

1. Вдосконалення датчиків та вимірювальних систем. Це дозволить підвищити точність вимірювань та розширити спектр параметрів, що вимірюються. Перспективним напрямком є розробка нових типів датчиків, зокрема, хімічних та біологічних сенсорів для моніторингу екосистем океану.

2. Розвиток систем енергозабезпечення автономних платформ. Використання більш ефективних відновлювальних джерел енергії, наприклад сонячних батарей, дозволить збільшити тривалість автономної роботи буїв та дрейфтерів. Наприклад, розробляються системи, що використовують енергію хвиль для живлення буїв.

3. Вдосконалення систем зв'язку та передачі даних. Це забезпечить отримання більших обсягів даних в режимі реального часу. Перспективним є використання нових супутникових систем зв'язку, а також створення підводних акустичних мереж для передачі даних.

4. Створення нових типів платформ для спостереження за океаном. Перспективним напрямком є розробка автономних підводних апаратів типу глайдерів, здатних здійснювати тривалі місії з мінімальними витратами енергії [15]. Ці апарати можуть долати тисячі кілометрів, періодично спливаючи на поверхню для передачі даних.

5. Розвиток методів обробки та аналізу даних. Використання методів машинного навчання та штучного інтелекту дозволить більш ефективно обробляти великі масиви даних, отримуваних від різних систем спостереження. Це особливо важливо для інтеграції даних з різних джерел та виявлення складних взаємозв'язків у океанічних процесах.

6. Інтеграція різних систем спостереження в єдину глобальну мережу. Це дозволить отримувати більш повну і точну картину стану океану. Важливим кроком у цьому напрямку є створення глобальної системи спостережень за океаном, яка об'єднує дані з різних національних та міжнародних програм.

Перспективним напрямком є також розвиток прибережних систем спостереження, що поєднують різні типи датчиків – від донних станцій до радарних систем [16]. Такі системи дозволяють отримувати детальну інформацію про процеси в прибережній зоні, що має велике значення для управління прибережними ресурсами та забезпечення безпеки мореплавства.

Важливу роль у розвитку технологій спостереження за океаном відіграє міжнародне співробітництво. Прикладом такого співробітництва є глобальна система спостережень за океаном, що об'єднує зусилля багатьох країн у створенні комплексної системи моніторингу світового океану.

Висновки

Проведений аналіз сучасних технологій спостереження за океаном дозволяє зробити ряд важливих висновків. Насамперед, слід відзначити, що сучасні системи моніторингу океану базуються на комплексному використанні різноманітних технологій, які включають як автономні буйкові станції, так і супутникові системи дистанційного зондування поверхні океану. Така інтеграція забезпечує отримання даних про стан океану з високою просторово-часовою роздільною здатністю.

Заякорені буї відіграють ключову роль у здійсненні довготривалих спостережень у фіксованих точках океану. Їх дані є незамінними для калібрування супутникових вимірювань та валідації чисельних моделей. Висока точність вимірювань та можливість отримання вертикальних профілів океанографічних параметрів є основними перевагами цих пристроїв. Проте їх застосування обмежується значними витратами на встановлення та обслуговування.

Океанські дрефтери, у свою чергу, забезпечують економічно ефективний збір даних про температуру, солоність та течії на великих акваторіях. Глобальна мережа дрефтерів стала критичним компонентом системи оперативної океанографії, особливо цінним для вивчення поверхневої циркуляції океану. Однак їх можливості щодо вимірювання параметрів на глибині залишаються обмеженими.

Супутникові технології надають унікальні можливості для глобального охоплення та високої періодичності спостережень. Вони дозволяють вимірювати широкий спектр параметрів, включаючи температуру поверхні океану, висоту морської поверхні, швидкість вітру та концентрацію хлорофілу. Супутникові дані є незамінними для вивчення великомасштабних процесів в океані, але мають обмежену просторову роздільну здатність та вимагають складних алгоритмів обробки та інтерпретації.

Перспективні напрямки розвитку технологій океанічного спостереження охоплюють удосконалення датчиків та вимірювальних систем, розробку нових типів автономних платформ, зокрема глайдерів, розвиток методів обробки даних з використанням алгоритмів машинного навчання, а також інтеграцію різних систем спостереження в єдину глобальну мережу.

Міжнародне співробітництво відіграє вирішальну роль у розвитку систем спостереження за океаном, дозволяючи об'єднати зусилля різних країн у створенні глобальної системи моніторингу. Програми ARGO та GOOS демонструють ефективність такого підходу.

Незважаючи на значний прогрес, існують суттєві прогалини у розумінні океанічних процесів. Недостатньо вивченими залишаються глибинні шари океану, полярні регіони та дрібномаштабні процеси, які мають важливе значення для формування клімату та океанічних екосистем. Розвиток технологій спостереження за океаном має критичне значення для вирішення глобальних проблем, пов'язаних зі зміною клімату, збереженням морських екосистем та ефективним використанням океанічних ресурсів.

Отримані результати мають вагомe значення для подальшого розвитку систем спостереження за океаном і можуть бути використані при плануванні нових проєктів з моніторингу океану, розробці перспективних технологій та методів обробки даних.

Перспективні напрямки подальших досліджень включають розвиток методів асиміляції даних для інтеграції безпосередніх вимірювань на місці та супутникових спостережень у чисельні моделі океану, вдосконалення алгоритмів обробки супутникових даних, розробку нових підходів до візуалізації та інтерпретації великих масивів океанографічних даних. Особливу увагу слід приділити дослідженню можливостей використання квантових сенсорів для підвищення точності вимірювань, а також вивченню впливу кліматичних змін на океанічні процеси та розробці методів довгострокового прогнозування стану океану.

Реалізація цих напрямків досліджень сприятиме створенню більш ефективної та всеохоплюючої системи спостереження за океаном, що є критично важливим для розуміння та прогнозування глобальних змін навколишнього середовища.

Перелік використаних джерел:

1. Cracknell A. P., Varotsos C. A. Editorial and cover: Fifty years after the first artificial satellite: from Sputnik 1 to ENVISAT. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28(10). Pp. 2071-2072. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160701347147>.
2. McClain E. P. Multiple Atmospheric-Window Techniques for Satellite-Derived Sea Surface Temperatures. *Oceanography from Space. Marine Science* / ed. by J. F. R. Gower. 1981. Vol. 13. Pp. 73-85. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4613-3315-9_11.
3. Davis R. E. Drifter observations of coastal surface currents during CODE: The method and descriptive view. *Journal of Geophysical Research*. 1985. Vol. 90. Iss. C3. Pp. 4741-4755. DOI: <https://doi.org/10.1029/jc090ic03p04741>.
4. Grodsky S. A., Lumpkin R., Carton J. A. Spurious trends in global surface drifter currents. *Geophysical Research Letters*. 2011. Vol. 38. No. 10. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1029/2011gl047393>.
5. Lumpkin R., Pazos M. Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results. *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics* / ed. by A. Griffa et al. Cambridge : Cambridge University Press, 2007. Pp. 39-67. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535901.003>.
6. Weller R. A. Observing Surface Meteorology and Air-Sea Fluxes. *Observing the Oceans in Real Time* / ed. by R. Venkatesan, A. Tandon, E. D'Asaro, M. Atmanand. Springer, Cham, 2018. Pp. 17-35. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66493-4_2.
7. A Surface Mooring for Air-Sea Interaction Research in the Gulf Stream. Part II: Analysis of the Observations and Their Accuracies / S. P. Bigorre et al. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 2013. Vol. 30. No. 3. Pp. 450-469. DOI: <https://doi.org/10.1175/jtech-d-12-00078.1>.
8. Hamilton A. Buoy Technology. *Springer Handbook of Ocean Engineering* / ed. by M. R. Dhanak, N. I. Xiros. Springer, Cham, 2016. Pp. 937-962. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-16649-0_40.
9. Ocean observatories: an engineering challenge / A. B. Baggeroer et al. *The Bridge: Journal of the National Academy of Engineering*. 2018. Vol. 48. Iss. 3. Pp. 17-34.
10. Ocean Remote Sensing: Concept to Realization for Physical Oceanographic Studies / Misra T., Sharma R., Kumar R., Pal P. K. *Observing the Oceans in Real Time* / ed. by R. Venkatesan, A. Tandon, E. D'Asaro, M. Atmanand. Springer, Cham, 2018. Pp. 165-202. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-66493-4_9.
11. Earth Observing Laboratory (EOL): Tropical Ocean – Global Atmosphere (TOGA) and Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment (COARE). URL: https://www.eol.ucar.edu/field_projects/toga-coare (дата звернення: 29.03.2020).

12. «Bai-long»: A TAO-hybrid on RAMA / R. Cole et al. *Oceans'11 MTS/IEEE KONA*, Waikoloa, HI, USA, 19-22 September 2011. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.23919/OCEANS.2011.6106952>.
13. Trials of an autonomous profiling buoy system / S. Aracri et al. *Journal of Operational Oceanography*. 2016. Vol. 9. Iss. sup1. Pp. 176-184. DOI: <https://doi.org/10.1080/1755876x.2015.1115631>.
14. Пустовойтенко В. В., Запєвалов А. С. Оперативная океанография: современное состояние, перспективы и проблемы спутниковой альтиметрии. *Современные проблемы океанологии*. 2012. Вып. 11. 217 с.
15. Гладких И. И., Капочкина М. Б., Зорин В. Ю. Концептуальные положения мониторинга подводной обстановки морской акватории Азово-Черноморского региона. *Перший незалежний науковий вісник*. 2015. № 3. С. 88-94.
16. Современные изменения уровня Черного моря как основа стратегии строительного освоения прибрежий / В. И. Михайлов и др. Одеса: Астропринт, 2010. 165 с.

References:

1. A.P. Cracknell, and C.A. Varotsos, «Editorial and cover: Fifty years after the first artificial satellite: from Sputnik 1 to ENVISAT», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28(10), pp. 2071-2072, 2007. doi: **10.1080/01431160701347147**.
2. E. P. McClain, «Multiple Atmospheric-Window Techniques for Satellite-Derived Sea Surface Temperatures», in *Oceanography from Space. Marine Science*, J.F.R. Gower, Ed., 1981, vol. 13, pp. 73-85. doi: **10.1007/978-1-4613-3315-9_11**.
3. R.E. Davis, «Drifter observations of coastal surface currents during CODE: The method and descriptive view», *Journal of Geophysical Research*, vol. 90, iss. C3, pp. 4741-4755, 1985. doi: **10.1029/jc090ic03p04741**.
4. S.A. Grodsky, R. Lumpkin, and J.A. Carton, «Spurious trends in global surface drifter currents», *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 10, pp. 1-6, 2011. doi: **10.1029/2011gl047393**.
5. R. Lumpkin, and M. Pazos, «Measuring surface currents with Surface Velocity Program drifters: the instrument, its data, and some recent results», in *Lagrangian Analysis and Prediction of Coastal and Ocean Dynamics*, A. Griffa, A.D. Kirwan Jr., A.J. Mariano, T. Özgökmen, H.T. Rossby, Eds., Cambridge: Cambridge University Press, 2007, pp. 39-67. doi: **10.1017/CBO9780511535901.003**.
6. R.A. Weller, «Observing Surface Meteorology and Air-Sea Fluxes», *Observing the Oceans in Real Time*, R. Venkatesan, A. Tandon, E. D'Asaro, M. Atmanand, Eds., Springer, Cham, 2018, pp. 17-35. doi: **10.1007/978-3-319-66493-4_2**.
7. S.P. Bigorre, R.A. Weller, J.B. Edson, and J.D. Ware, «A Surface Mooring for Air–Sea Interaction Research in the Gulf Stream. Part II: Analysis of the Observations and Their Accuracies», *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 450-469, 2013. doi: **10.1175/jtech-d-12-00078.1**.
8. A. Hamilton, «Buoy Technology», *Springer Handbook of Ocean Engineering*, M.R. Dhanak, N.I. Xiros, Eds., Springer, Cham, 2016, pp. 937-962. doi: **10.1007/978-3-319-16649-0_40**.
9. H. Schmidt, J. L. Orcutt, P. Mikhalevsky, B. Howe, and A. Baggeroer, «Ocean observatories: an engineering challenge», *The Bridge: Journal of the National Academy of Engineering*, vol. 48, iss. 3, pp. 17-34, 2018.
10. T. Misra, R. Sharma, R. Kumar, and P.K. Pal, «Ocean Remote Sensing: Concept to Realization for Physical Oceanographic Studies», *Observing the Oceans in Real Time*, R. Venkatesan, A. Tandon, E. D'Asaro, M. Atmanand, Eds., Springer, Cham, 2018, pp. 165-202. doi: **10.1007/978-3-319-66493-4_9**.
11. Earth Observing Laboratory (EOL): Tropical Ocean – Global Atmosphere (TOGA) and Coupled Ocean Atmosphere Response Experiment (COARE). [Online]. Available: https://www.eol.ucar.edu/field_projects/toga-coare. Accessed on: March 29, 2020.
12. R. Cole, J. Kinder, C. L. Ning, W. Yu, and Y. Chao, ««Bai-long»: A TAO-hybrid on RAMA», in Proc. *Oceans'11 MTS/IEEE KONA*, Waikoloa, HI, USA, 2011, pp. 1-10. doi: **10.23919/OCEANS.2011.6106952**.
13. S. Aracri et al., «Trials of an autonomous profiling buoy system», *Journal of Operational Oceanography*, vol. 9, iss. sup1, pp. 176-184, 2016. doi: **10.1080/1755876x.2015.1115631**.
14. V.V. Pustovoitenko, and A.S. Zapevalov, «Operativnaia okeanohrafiya: sovremennoe sostoianye, perspektyvi y problemi sputnykovoi altymetriyu» [«Operational Oceanography: Current Status,

- Prospects and Problems of Satellite Altimetry», in *Sovremennye problemi okeanolohyy – Modern problems of oceanology*, 2012, vol. 11. (Rus.)
15. I.I. Hladkykh, M.B. Kapochkina, and V.Yu. Zorin, «Kontseptualnye polozheniya monytorynha podvodnoi obstanovky morskoi akvatoryu Azovo-Chernomorskoho rehyona» [«Conceptual provisions for monitoring the underwater situation in the marine waters of the Azov-Black Sea region »], *Pershyi nezalezhnyi naukovyi visnyk – The first independent scientific journal*, № 3, pp. 88-94, 2015. (Rus.)
16. V.Y. Mykhailov, V.S. Dorofeev, V.N. Yaroshenko, B.B. Kapochkyn, and N.T. Kucherenko, *Sovremennye yzmeneniya urovnia Chernoho moria kak osnova stratehyu stroytelnoho osvoeniya pryberezhzyi* [Current changes in the Black Sea level as a basis for the strategy of coastal development]. Odesa, Ukraine: Astroprint Publ., 2010. (Rus.)

Стаття надійшла 28.10.2024

Стаття прийнята 15.11.2024

УДК 681.51:004.89

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321378

© Голубєва С.М.¹, Гороховська О.К.²

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ГРЕБНОЇ ДИЗЕЛЬ-ЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З УНІПОЛЯРНИМИ МАШИНАМИ

У статті удосконалена динамічна модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, яка, на відміну від відомих моделей, враховує наявність трьох керуючих контурів, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта, що дозволяє виконати синтез регуляторів контурів управління з заданим динамічним характеристикам. При побудові суднових електроенергетичних систем набувають широкого застосування єдині суднові електроенергетичні системи, які поєднують значну сукупність електротехнічних пристроїв, що функціонально можна розділити на пристрої, які забезпечують електроенергією власні потреби судна, та системи, які забезпечують рух та називаються гребними електричними установками. Метою статті є необхідність удосконалити динамічну модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, що дозволить виконати синтез регуляторів контурів управління з заданим динамічним характеристикам. В якості рушія у дослідженні використані ГРК. У даній статті розглядаються елементи гребної дизель-електричної установки з позицій теорії динамічних систем, на базі яких складається математична модель гребної дизель-електричної установки. Побудована динамічна модель, що має три керуючих контури, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта. Ця система у подальшому дозволить провести синтез регуляторів контурів управління, що відповідають заданим критеріям оптимізації.

Ключові слова: асинхронні суднові двигуни, електричний кабель, енергоефективність, морський транспорт, напівпровідникові прилади, силова електроніка, суднові двигуни, суднові електроенергетичні установки, діагностування, ефективна потужність, передача потужності, судновий дизель, енергетична установка, судно.

¹ ст. викладач, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0001-8285-7566, glbvnu@gmail.com

² здобувачка ступеня PhD, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ

S. Golubieva, O. Horokhovska. Dynamic model of a propulsion diesel-electric plant with unipolar machines. The article presents an improved dynamic model of a diesel-electric propulsion unit with unipolar machines, which, unlike the known ones, takes into account the presence of three control loops that form the magnetic fluxes of the generator, the propulsion electric motor, the speed of the diesel engine and one control (output) variable: the speed of the propeller, which allows for the synthesis of control loop regulators with given dynamic characteristics. When constructing ship electrical power systems, single ship electrical power systems are widely used, which combine a significant set of electrical devices that can be functionally divided into devices that provide electricity for the ship's own needs and systems that provide movement and are called propulsion electrical units. The purpose of the article is the need to improve the dynamic model of a diesel-electric propulsion unit with unipolar machines, which will allow for the synthesis of control loop regulators with given dynamic characteristics. The research used GRC as the engine. This article considers the elements of a diesel-electric propulsion plant from the perspective of dynamic systems theory, on the basis of which a mathematical model of a diesel-electric propulsion plant is developed. A dynamic model has been constructed that has three control loops that form the magnetic fluxes of the generator, the propulsion electric motor, the diesel engine rotation speed and one control (output) variable: the propeller rotation speed. This system will subsequently allow for the synthesis of control loop regulators that meet the specified optimization criteria.

Keywords: *asynchronous marine engines, electric cable, energy efficiency, marine transport, semiconductor devices, power electronics, marine engines, marine power plants, diagnostics, effective power, power transmission, marine diesel, power plant, ship.*

Постановка проблеми. На теперішній час при побудові суднових електроенергетичних систем набувають широкого застосування єдині суднові електроенергетичні системи, які поєднують значну сукупність електротехнічних пристроїв, що функціонально можна розділити на пристрої, які забезпечують електроенергією власні потреби судна, та системи, які забезпечують рух та називаються гребними електричними установками (ГЕУ). При цьому потужність, що витрачається на власні потреби судна, досить мала і знаходиться в діапазоні 10..20% у порівнянні з потужністю, переданої на забезпечення руху. У той самий час, ГЕУ мають ряд переваг при порівнянні установок з механічною передачею енергії від теплового двигуна через валопровід до гвинта. Зокрема, при регулюванні швидкості гвинта і маневруванні судна. Тому ГЕУ знаходять усе більше поширення і використання в якості рушійного комплексу судна, що вимагає побудови відповідної динамічної моделі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На теперішній час проєктувальники ГЕУ почали шукати альтернативні варіанти побудови структур суднових енергосистем, які б дозволили зробити систему більш компактною та енергоефективною [1-5] Одним з перспективних варіантів побудови ГЕУ є застосування замість машин змінного струму, уніполярних машин Фарадея, Барлоу [6, 7]. Найбільш детально розглядаються уніполярні машини в якості ГЕУ підводних човнів у розробках американської компанії General Atomics Electromagnetic Systems [8]. Дослідженням уніполярних машин у складі перспективних видів гребних установок займаються такі підприємства та автори як: А.Б. Захаренко, А.К. Надкін, Rene Fuger, Arkadiy Matsekh, John Kells та ін., компанія Guina Energy Research Pty Ltd, компанія General Atomics Electric Electromagnetic Systems Division; компанія Guina Energy Technologies Pty Ltd; Ккомпанія ThyssenKrupp Marine Systems [9-11].

Дані дослідники пропонують різні методи оптимізації та управління ГЕУ, однак відсутні єдині підходи до управління за критерієм втрати енергії.

Мета статті – удосконалити динамічну модель гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами, що дозволить виконати синтез регуляторів контурів управління з заданим динамічним характеристикам.

Виклад основного матеріалу. Вважаємо, що гребна дизель-електрична установка складається з дизеля, електричного генератора зі збудженням з боку ротора постійним струмом, електродвигуна так само зі збудженням з боку ротора постійним струмом, електричних перетворювачів.

В якості рушія використовується гвинт регульованого кроку (ГРК). У даній статті розглядаються елементи гребної дизель-електричної установки з позицій теорії динамічних систем, на базі яких складається математична модель гребної дизель-електричної установки. Принципова схема гребної дизель-електричної установки наведена на рис. 1.

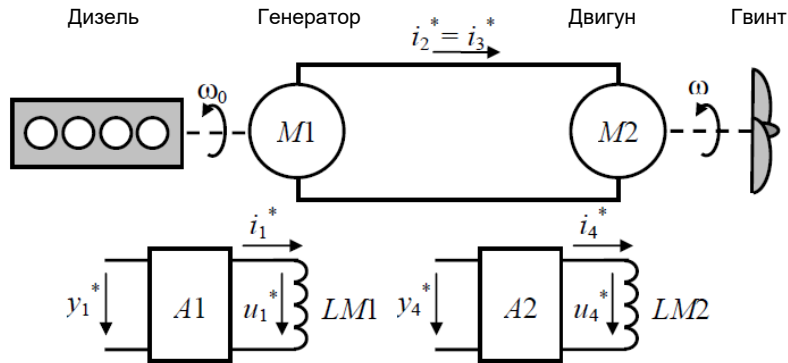


Рис. 1 – Принципова схема гребної дизель-електричної установки з уніполярними машинами

Розглянемо формальний опис навантаження на електродвигун гребної дизель-електричної установки, що створює рушій судна – гвинт. Дана характеристика використовується для моделювання та оптимізації режимів роботи гребної дизель-електричної установки. В якості математичної моделі навантаження будемо використовувати механічну характеристику гвинта – залежність швидкості обертання гвинта від моменту сили опору. Механічну характеристику гвинта визначимо, вважаючи, що при швидкості гвинта $\omega^* = 1$ момент опору гвинта дорівнює [7]:

$$M_{cV}^* = k_v \cdot M_{HV}^*, \quad (1)$$

де k_v – коефіцієнт, що характеризує режим роботи гвинта; $M_{HV}^* = 1 - R_z^*$ – номінальний момент гвинта; R_z^* – опір ланцюга якорів двигуна в умовних одиницях.

Величина $k_v = k_{v1}$ максимальна при роботі гвинта у швартовому режимі, а величина $k_v = k_{v0}$ мінімальна при роботі гвинта у вільній воді. Відношення k_{v0}/k_{v1} , як правило, складає 0,6...0,75. Вибір конкретного значення k_v залежить від призначення судна. Для суден, що працюють в основному у швартових режимах, наприклад, буксирів, криголамів, він вище. Для суден, основний режим роботи яких відбувається у вільній воді, він менше.

При моделюванні коефіцієнт k_v розглядається як зовнішній збуджуючий вплив, величина якого залежить від режиму роботи гвинта. Механічну характеристику гвинта будемо далі апроксимувати квадратичною залежністю вигляду [7]:

$$M_{cV}^* = k_v \cdot M_{HV}^* \cdot \omega^{*2} \cdot \text{sign}(\omega^*). \quad (2)$$

Вигляд механічної характеристики гвинта $\omega(M_{cV}^*)$ наведено на рис. 2.

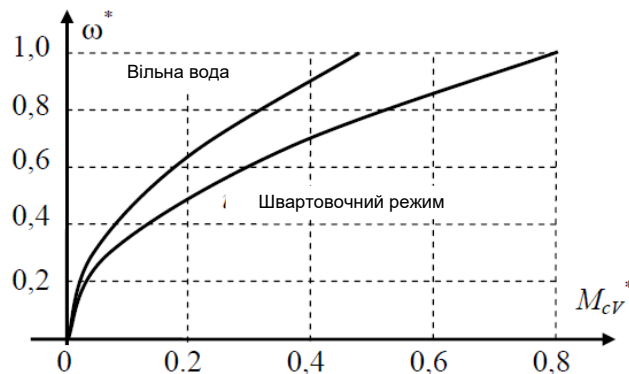


Рис. 2 – Механічна характеристика гвинта

Схема моменту опору гвинта на структурній схемі наведено на рис. 3.

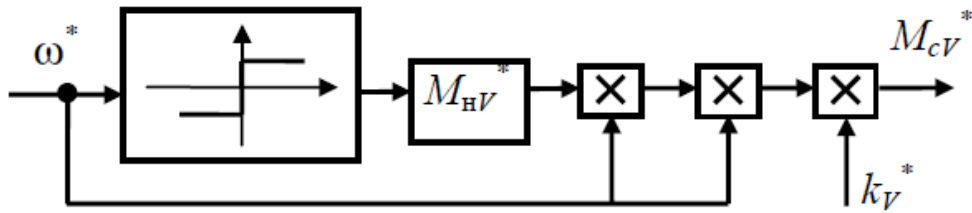


Рис. 3 – Схема моменту опору гвинта на структурній схемі

Структурна схема, наведена на рис. 3, використовується далі для моделювання динамічного поведіння дизель-електричних гребних установках (ДЕГУ) з уніполярними машинами.

Динамічна модель системи «генератор»-«двигун».

Електромеханічний перетворювач ДЕГУ складається з двох уніполярних машин, одна з яких працює в режимі генератора, а інша – у режимі двигуна. Виберемо в якості базових величин номінальні параметри генератора. Рівняння генератора запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot pi_1; \\ u_2 &= R_2 \cdot i_2 + L_2 \cdot pi_2 + L_{21} \cdot \omega \cdot i_1, \end{aligned} \quad (3)$$

- де R_1 – опір обмотки збудження;
- L_1 – індуктивність обмотки збудження;
- i_1 – струм обмотки збудження;
- R_2 – опір обмотки якоря;
- L_2 – індуктивність розсіювання обмотки якоря;
- i_2 – струм обмотки якоря;
- L_{21} – взаємна індуктивність обмоток якоря та збудження;
- ω – швидкість обертання якоря.

Рівняння двигуна має вигляд:

$$\begin{aligned} u_4 &= R_4 \cdot i_4 + L_4 \cdot pi_4; \\ u_3 &= R_3 \cdot i_3 + L_3 \cdot pi_3 + L_{34} \cdot \omega_0 \cdot i_4, \end{aligned} \quad (4)$$

- де R_4 – опір обмотки збудження;
- L_4 – індуктивність обмотки збудження;
- i_4 – струм обмотки збудження;
- L_3 – опір обмотки якоря;
- L_3 – індуктивність розсіювання обмотки якоря;
- L_{34} – взаємна індуктивність обмоток якоря та збудження;
- ω_0 – швидкість обертання якоря.

Позначимо потокозчеплення обмотки якоря з обмоткою збудження генератора $\psi_{12} = L_{21} \cdot i_1$, а потокозчеплення обмотки якоря з обмоткою двигуна $\psi_{34} = L_{34} \cdot i_4$.

Тоді електрорушійна сила (ЕРС) двигуна $E_2 = \psi_{34} \cdot \omega$. Змінимо напрям струму двигуна на протилежний. Оскільки обмотки якоря з'єднані послідовно, то $u_3 = u_2$. З урахуванням цих зауважень рівняння системи генератор-двигун приймуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned} u_1 &= R_1 \cdot i_1 + L_1 \cdot pi_1; \\ 0 &= R_z \cdot i_2 + L_z \cdot pi_2 + E_1 - E_2; \\ u_4 &= R_4 \cdot i_4 + L_4 \cdot pi_4, \end{aligned} \quad (5)$$

де $R_z = R_1 + R_3$; $L_z = L_2 + L_3$; i_4 – струм обмотки збудження генератора; i_1 – струм обмотки збудження двигуна; u_1 – напруга обмотки збудження двигуна; u_4 – напруга обмотки збудження генератора; ω_0 – кутова швидкість обертання ротора генератора; ω – кутова швидкість обертання ротора двигуна.

Рівнянню (5) відповідає схема заміщення системи генератор-двигун, наведена на рис. 4.

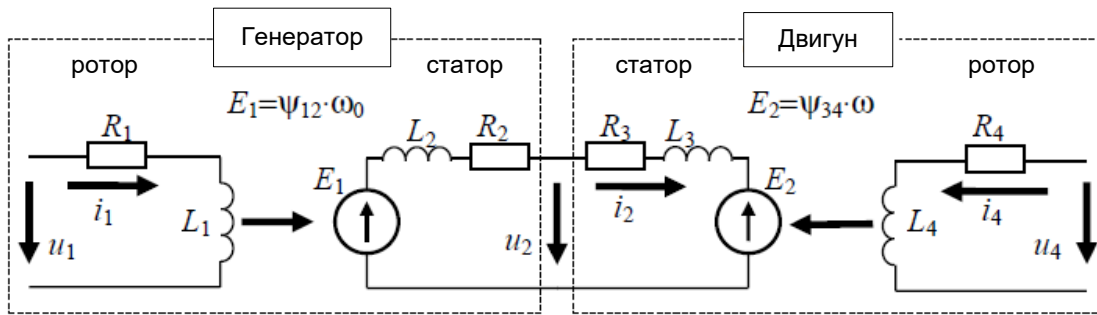


Рис. 4 – Схема заміщення обмоток системи генератор-двигун

Рівнянням (5) й схемі заміщення (рис. 4) може бути поставлена у відповідність структурна схема, наведена на рис. 5.

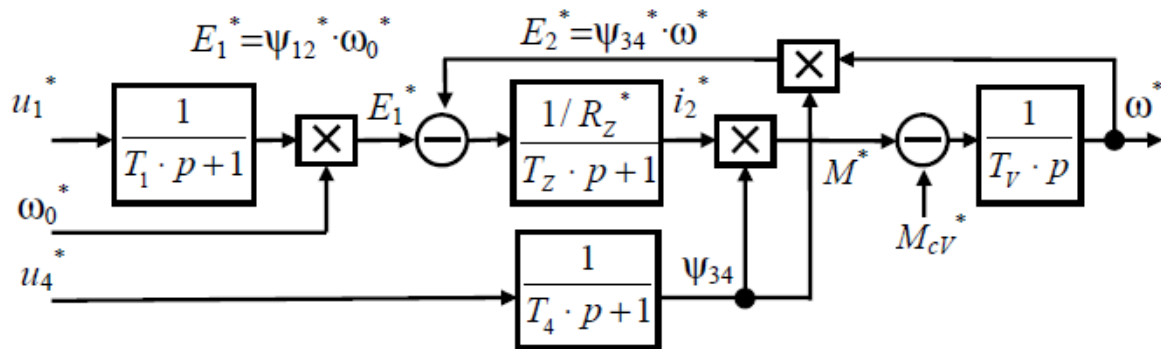


Рис. 5 – Структурна схема системи генератор-двигун

Уніполярний генератор розвиває електромагнітний момент, який є моментом опору для дизеля:

$$M_{cD}^* = \psi_{12}^* \cdot i_2^* = L_{12}^* \cdot i_1^* \cdot i_2^*, \quad (6)$$

де $\psi_{12}^* = L_{12}^* \cdot i_1^* \in [0,1]$ – потокозчеплення обмотки збудження з обмоткою якоря; i_1^* – струм обмотки збудження; i_2^* – струм обмотки якоря.

Уніполярний двигун розвиває електромагнітний момент, який є рушійним моментом для гвинта [12]:

$$M^* = \psi_{34}^* \cdot i_4^* = L_{34}^* \cdot i_4^* \cdot i_2^*, \quad (7)$$

де $\psi_{34}^* = L_{34}^* \cdot i_4^* \in [0,1]$ – потокозчеплення обмотки збудження з обмоткою якоря; i_4^* – струм обмотки збудження.

Рівняння руху якоря і гвинта:

$$J \cdot p \cdot \omega = M - M_{Vc}, \quad (8)$$

де J – інтегральний момент інерції якоря двигуна, валопроводу та гвинта; M_{Vc} – момент опору гвинта.

У відносних одиницях рівняння руху прийме наступний вигляд:

$$T_V \cdot p \cdot \omega^* = M^* - M_{Vc}^*, \quad (9)$$

де M_{Vc}^* – момент опору в відносних одиницях; $T_V = J \cdot \omega_6 / M_6$ – механічна постійна часу двигуна, валопроводу та гвинта.

Динамічна модель перетворювачів.

Сучасні перетворювачі будуються на основі силової електроніки й мають імпульсний принцип дії. Динамічна модель перетворювача достатньо складна. Тому розглядається наближена передатна функція перетворювача, яка використовується у динамічній моделі ДЕГУ. Структурно перетворювач можна розділити на силову частину й систему управління [7, 8]. Силова частина реалізується на електронних ключах, що періодично включаються й модулюють вихідну змінну. Нехай період проходження імпульсів, які моделюють вихідну змінну перетворювача, дорівнює T_i . Тоді передатну функцію силової частини перетворювача можна представити елементом затримки: $e^{-T_i p}$.

Оскільки період слідування імпульсів T_i малий, то елемент затримки можна представити наближено двома членами ряду:

$$e^{-T_i p} \approx 1 - T_i \cdot p \approx \frac{1}{1+T_i p} \tag{10}$$

З даних викладень випливає, що динамічну поведінку силової частини перетворювача можна представити аперіодичною функцією першого порядку.

Система управління перетворювача зазвичай реалізується на основі мікропроцесора і має істотно більшу швидкодію, ніж силова частина. Отже, її можна вважати безінерційним елементом. Однак в алгоритм системи управління доцільно штучно включити аперіодичний елемент з постійною часу T_{cy} .

Тоді перетворювач буде аперіодичним елементом другого порядку:

$$W_{cy} = \frac{1}{T_i p + 1} \cdot \frac{k}{T_{cy} p + 1} \tag{11}$$

де k – коефіцієнт передачі перетворювача.

Використання мікропроцесорної техніки дозволяє завжди зробити перетворювач лінійним елементом, а штучне включення в систему аперіодичного елементу згладжує помилки, пов'язані з апроксимацією силової частини перетворювача. За базове значення будемо приймати таке значення вихідної величини системи управління U_6 , якому відповідає базове значення вихідної величини електричного перетворювача. З іншого боку, електричний перетворювач формується так, щоб базове значення вихідної величини дорівнювало відповідному базовому значенню електродвигуна U_n .

Отже, статичний коефіцієнт передачі U_n/U_6 встановлює коефіцієнт приведення між базовими величинами силової частини електроприводу та керуючого пристрою.

Таким чином, при синтезі системи управління коефіцієнт передачі між електричним перетворювачем та управляючим пристроєм у відносних одиницях приймає одиничне значення. При надходженні на вхід електричного перетворювача одиничного (базового) сигналу на виході також буде одиничний (базовий) сигнал. Структурна схема перетворювача буде мати вигляд, наведений на рис. 6.

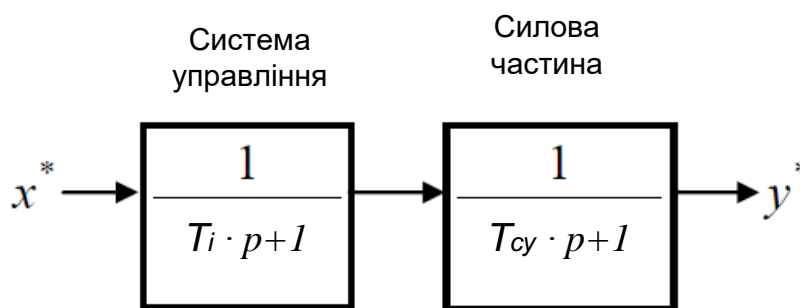


Рис. 6 – Передаточна функція перетворювача

Таким чином, при синтезі системи управління коефіцієнт передачі між електричним перетворювачем та управляючим пристроєм у відносних одиницях приймає одиничне значення. При надходженні на вхід електричного перетворювача одиничного (базового) сигналу на виході

також буде одиничний (базовий) сигнал. Представлення перетворювача на структурній схемі буде мати вигляд, як на рис. 6.

Перетворювачі А1 та А2 (див. рис. 1) підключаються до обмоток збудження уніполярних машин. Отже, на структурній схемі їх можна навести у вигляді послідовно включених аперіодичних елементів (рис. 7).

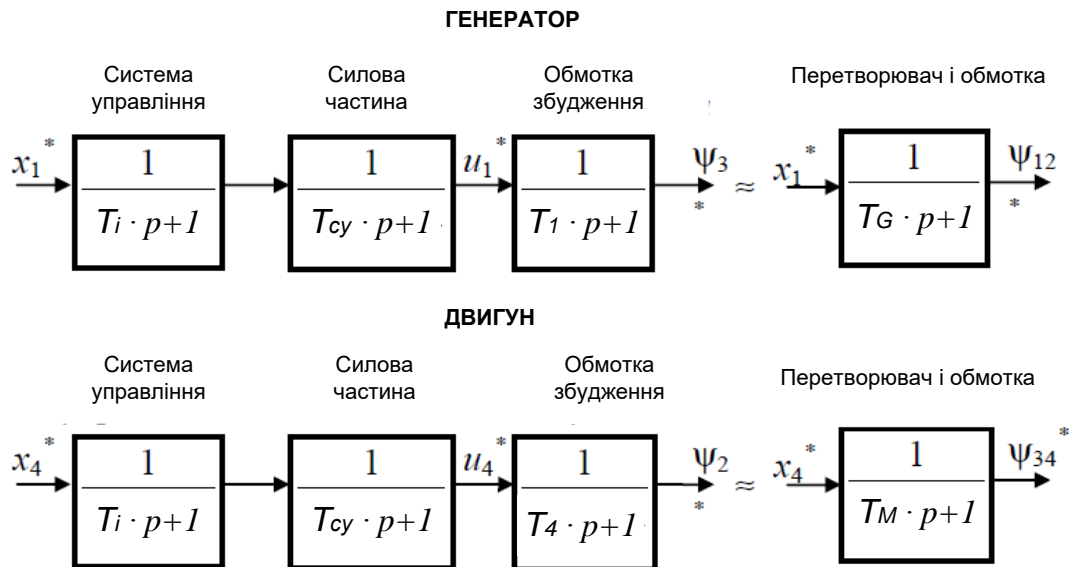


Рис. 7 – Передатні функції перетворювачів і обмоток збудження генератора та двигуна

Передатна функція перетворювачів та обмоток збудження генератора та двигуна будуть аперіодичним елементом третього порядку. Аперіодичний елемент третього порядку досить добре апроксимується аперіодичними елементами першого порядку (рис. 7), постійна часу якого дорівнює сумі постійних часу ланок:

$$\begin{aligned} T_G &= T_i + T_{cy} + T_1; \\ T_M &= T_i + T_{cy} + T_4. \end{aligned} \quad (12)$$

Похибка апроксимації перехідної функції у випадку рівних значень постійних часу не перевищує 2%. У випадку нерівних постійних часу похибка буде менше.

Таким чином, при моделюванні перехідних процесів у ГДЕУ в структурній схемі перетворювачі об'єднуються з обмотками збудження генератора й двигуна та наводяться аперіодичним елементом першого порядку. Коефіцієнти передачі елементів мають одиничне значення, а постійні часу визначаються формулою (12).

Динамічна модель дизеля.

Будемо розглядати дизель як масу, до якої прикладається сумарний момент сили. Величину моменту рушійної сили M_D визначимо, як функцію витрати палива в одиницю часу, споживаного дизелем G_0 :

$$M_D = k_M \cdot G_0, \quad (13)$$

де k_M – коефіцієнт пропорційності.

Момент внутрішнього опору дизеля M_{c0} будемо розглядати як силу сухого тертя:

$$M_{c0} = M_0 \cdot \text{sign}(\omega_0). \quad (14)$$

При дослідженнях використовуються відносні одиниці. У відносних одиницях моменту рушійної сили:

$$M_D^* = k_M^* \cdot G_0^*. \quad (15)$$

Крім моменту сили внутрішнього опору, на дизель діє зовнішня сила з боку генератора виду (6).

Обертання вала дизель-генератора описується рівняння руху Ньютона:

$$T_D \cdot p \cdot \omega_0^* = M_D^* - M_{cD}^* - M_{c0}^* \quad (16)$$

де $T_D = J_D \cdot \omega_6 / M_6$ – механічна постійна часу дизель-генератора;

J_D – сумарний момент інерції дизель-генератора;

ω_6 – базове значення швидкості;

M_6 – базове значення моменту.

Представимо, що дизель має контур швидкості з пропорційним регулятором типу Уатта [5] та коефіцієнтом зворотного зв'язку $k_{oc}^* = 1$. Структурна схема, яка характеризує динамічну поведінку дизеля, наведена на рис. 8.

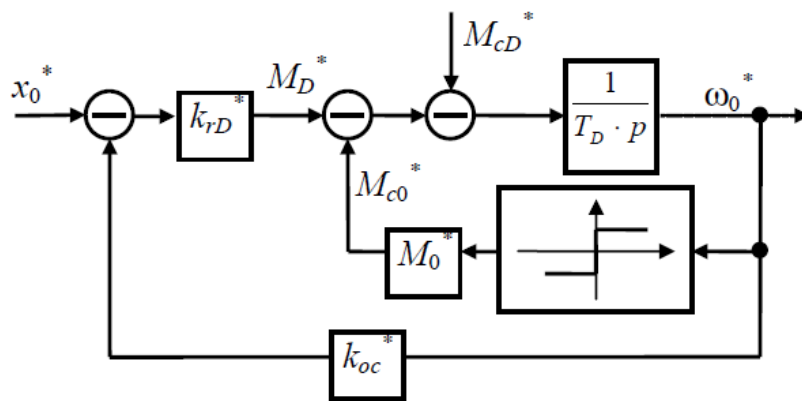


Рис. 8 – Структурна схема дизеля з пропорційним регулятором швидкості

Внутрішній зворотний зв'язок за швидкістю визначає мінімальне значення витрати палива в одиницю часу, що споживається дизелем на холостому ходу і гарантує стійку роботу двигуна: $G_0^* > M_0^*$.

Управляюча змінна x_0^* задає величину швидкості обертання дизеля. Статична механічна характеристика дизеля $\omega_0^*(M_{cD}^*)$ знаходиться з рівняння:

$$(x_0^* - k_{oc}^* \cdot \omega_0^*) \cdot k_{rD}^* - M_0^* - M_{cD}^* = 0. \quad (17)$$

Зовнішній зворотний зв'язок за швидкістю формує жорстку механічну характеристику дизеля:

$$\omega_0^*(M_{cD}^*) = \frac{x_0^*}{k_{oc}^*} - \frac{(M_0^* + M_{cD}^*)}{k_{oc}^* \cdot k_{rD}^*}. \quad (18)$$

При наборі моменту навантаження M_{cD}^* швидкість дизеля провалюється на величину:

$$\omega_0^* = \frac{M_{cD}^*}{k_{oc}^* \cdot k_{rD}^*}. \quad (19)$$

З даної формули можна зробити висновок, що провал частоти обертання дизеля визначається коефіцієнтом зворотного зв'язку k_{rD}^* . Оскільки величина k_{rD}^* , як правило, достатньо значна, то величина ω_0^* достатньо мала.

Передатна функція дизеля по керуючому впливі при пропорційному регуляторі швидкості дорівнює:

$$W_D = \frac{1}{T_{rD0} \cdot p + 1}, \quad (20)$$

де $T_{rD0} = T_D / k_{rD}^*$.

Динамічна модель ГДЕУ з уніполярними машинами формується на базі динамічних моделей її елементів: дизеля, генератора-двигуна та гвинта. Структурні схеми цих елементів наведені відповідно на рис. 3, 5, 8. Структурна схема ГДЕУ наведена на рис. 9.

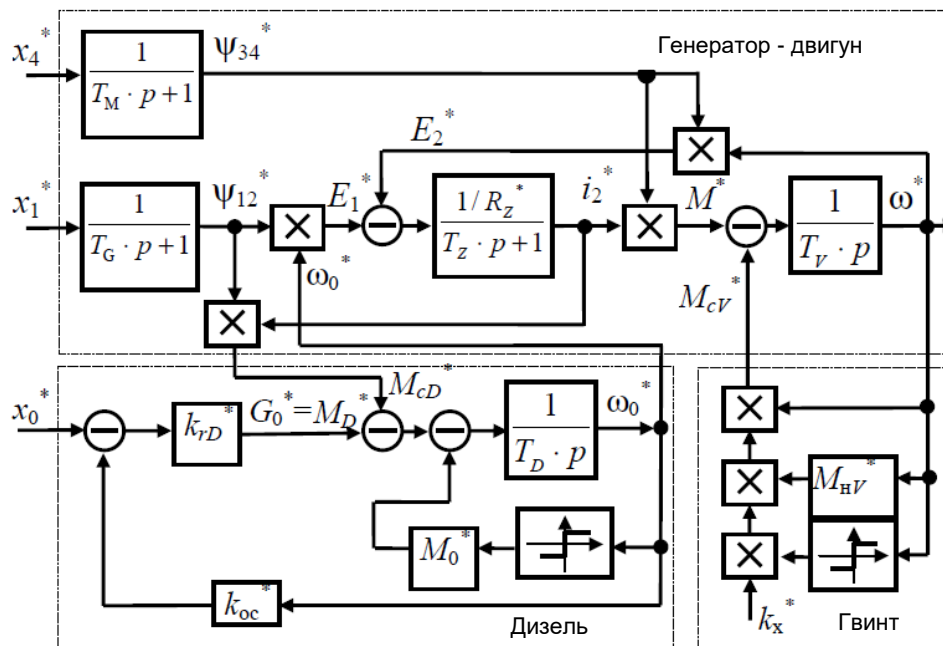


Рис. 9 – Структурна схема системи дизель-генератор-двигун-гвинт

Дана структурна схема відображає математичну модель системи.

Висновки

Таким чином, побудована динамічна модель, що має три керуючих контури, які формують магнітні потоки генератора, гребного електродвигуна, швидкість обертання дизеля та одну керуючу (вихідну) змінну: швидкість обертання гвинта. Ця система у подальшому дозволить провести синтез регуляторів контурів управління, що відповідають заданим критеріям оптимізації.

Перелік використаних джерел:

1. Енергоефективність суднових енергетичних установок в Україні: стан та перспективи розвитку / О. Россомаха та ін. *Science and Practice: Implementation to Modern Society* : Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Conference, Manchester, Great Britain, 26-28 April 2023. С. 517-520.
2. Включение синхронных генераторов в многоагрегатную судовую электростанцию / Вишневский Л. В., Веретенник А. М., Войтецкий И. Е., Козырев И. П. *Електромашинобудування та електрообладнання*. 2007. № 68. С. 26-29.
3. Electric power generation with magnetically geared machine: pat. 8044527 USA: F03D9/00, H02P9/14. № 11/861,759; filed 26.09.2007; publ. 25.10.2011. 16 p.
4. Power Factor Correction. Power Factor Controller BR7000-I series. URL: <http://www.processtechnique.com> (дата звернення: 10.05.2024).
5. Acomi N., Acomi O. C. The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index. Union General Assembly. *Energy Procedia*. 2014. № 59. Pp. 243-248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.373>.
6. Бурбело М.Й. Компенсация реактивной мощности асинхронных двигателей в різкозмінних режимах навантаження. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2008. № 1. С. 65-68.
7. Спосіб управління автономною електроенергетичною системою та пристрій для його здійснення: пат. 116656 Україна: МПК (2006.01), G05F 1/70, H02J 3/18, H02J 3/38, H02P 9/46. № a201511808; заявл. 30.11.2015; опубл. 25.04.2018, Бюл. № 8. 7 с.

8. Serra P., Fancello G. Towards the IMO's GHG Goals: A Critical Overview of the Perspectives and Challenges of the Main Options for Decarbonizing International Shipping. *Sustainability*. 2020. № 12(8). Article 3220. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12083220>.
9. Вишневикий Л. В., Муха Н. И., Павленко С. С. Пуск асинхронных электродвигателей с компенсацией реактивной мощности: Монография. Одесса : НУ «ОМА», 2016. 161 с.
10. Дранкова А. О., Муха Н. И. Использование нейронных сетей прямого распространения для прогнозирования технического состояния судовых дизель-генераторов. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. 2013. № 36. С. 505-506.
11. Determining energy-efficient operation modes the propulsion electrical motor of an autonomous swimming apparatus / Volyanskaya Y., Volyanskiy S., Volkov A., Onishchenko O. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 6/8 (90). Pp. 11-16. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118984>.
12. Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts / Yuan Y., Li Z., Malekian R., Yan X. *Journal of Marine Engineering & Technology*. 2017. Vol. 16. № 3. Pp. 150-159. DOI: <https://doi.org/10.1080/20464177.2017.1307716>.

References:

1. O. Rossomakha et al., «Enerhoefektyvnist sudnovykh enerhetychnykh ustanovok v Ukraini: stan ta perspektyvy rozvytku» [«Energy efficiency of ship power plants in Ukraine: status and development prospects»], in Proc. 14th Int. Sci. and Pract. Conf. «Science and Practice: Implementation to Modern Society», Manchester, Great Britain, 2023, pp. 517-520. (Ukr.)
2. L.V. Vyshnevskiy, A.M. Veretennyk, Y.E. Voitetskiy, and Y.P. Kozyrev, «Vkliucheniye synkhronnykh heneratorov v mnogoahrehatnuiu sudovuiu elektrostantsiyu» [«Inclusion of synchronous generators in a multi-unit marine power plant»], *Elektromashynobuduvannia ta elektroobladnannia. – Electrical engineering and electrical equipment*, № 68, pp. 26-29, 2007. (Rus.)
3. J. Mari, M.-W. Waszak, and S. Schramm, «Electric power generation with magnetically geared machine», *U.S. Patent 8044527 Appl. 11/861,759*, Oct. 25, 2011.
4. Power Factor Correction. Power Factor Controller BR7000-I series. [Online]. Available: <http://www.processtechnique.com>. Accessed on: May 10, 2024.
5. N. Acomi, and O.C. Acomi, «The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index», *Energy Procedia*, № 59, pp. 243–248, 2014. doi: **10.1016/j.egypro.2014.10.373**.
6. M.I. Burbelo, «Kompensatsiia reaktyvnoi potuzhnosti asynkhronnykh dvyhuniv v rizkozminnykh rezhymakh navantazhennia» [«Compensation of reactive power of induction motors in rapidly changing load conditions»], *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Visnyk of Vinnytsia Polytechnical Institute*, № 1, pp. 65-68, 2008. (Ukr.)
7. L.V. Vyshnevskiy, M.I. Mukha, and O.P. Tumolskiy, «Sposib upravlinnia avtonomnoiu elektroenerhetychnoiu systemoiu ta prystrii dlia yoho zdiisnennia» [«Method of controlling an autonomous electric power system and device for its implementation»], *UA Patent 116656 Appl. № a201511808*, Apr. 25, 2018. (Ukr.)
8. P. Serra, G. Fancello, «Towards the IMO's GHG Goals: A Critical Overview of the Perspectives and Challenges of the Main Options for Decarbonizing International Shipping», *Sustainability*, № 12(8), article 3220, 2020. doi: **10.3390/su12083220**.
9. L.V. Vyshnevskiy, N.Y. Mukha, and S.S. Pavlenko, *Pusk asynkhronnykh elektrodyhatelei s kompensatsyei reaktyvnoi moshchnosti: Monohrafiya* [Starting of asynchronous electric motors with reactive power compensation: Monograph]. Odessa: NU «ОМА» Publ., 2016. (Rus.)
10. A.O. Drankova, and N.Y. Mukha, «Yspolzovanye neironnykh setei priamoho rasprostraneniya dlia prohozyrovaniya tekhnicheskoho sostoiannya sudovykh dyzel-heneratorov» [«Using Feedforward Neural Networks to Predict the Technical Condition of Marine Diesel Generators»], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*. Serii: Problemy avtomatyzovanoho elektropryvodu. Teoriia i praktyka – Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: Problems of automated electrodrive. Theory and practice, № 36, pp. 505-506, 2013.
13. Y. Volyanskaya, S. Volyanskiy, A. Volkov, and O. Onishchenko, «Determining energy-efficient operation modes the propulsion electrical motor of an autonomous swimming apparatus», *Eastern-*

European Journal of Enterprise Technologies, vol. 6/8 (90), pp. 11-16, 2017. doi: 10.15587/1729-4061.2017.118984.

11. Y. Yuan, Z. Li, R. Malekian, and X. Yan, «Analysis of the operational ship energy efficiency considering navigation environmental impacts», *Journal of Marine Engineering & Technology*, vol. 16, № 3, pp. 150-159, 2017. doi: 10.1080/20464177.2017.1307716.

Стаття надійшла 25.10.2024

Стаття прийнята 09.11.2024

УДК 358.42:629.563

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321381

© Заєць А.Ю.¹, Коскіна Ю.О.², Дрожжин О.Л.³

SWOT-АНАЛІЗ У СИСТЕМІ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ МОРСЬКИХ БУРОВИХ ПЛАТФОРМ

Стаття присвячена аналізу ризиків, які супроводжують обслуговування та експлуатацію морських бурових платформ, що є критично важливими об'єктами нафтової та газової промисловості. Основними ризиками для цих платформ є фізичні загрози (шторми, високі хвилі, корозія обладнання), технічні проблеми, людський фактор і екологічні загрози, зокрема забруднення внаслідок витоків нафти. У дослідженні розглянуто сучасні методи управління ризиками, що дозволяють знизити ймовірність аварійних ситуацій, зокрема: комп'ютерне моделювання, симуляції, аналіз видів і наслідків відмов (FMEA), Інтернет речей (IoT) для моніторингу стану обладнання, а також регулярні аудити й тренінги для персоналу. Особлива увага приділяється новітнім технологіям, які значно покращують управління ризиками. Наприклад, цифрові двійники надають можливість створювати цифрові копії реальних об'єктів і прогнозувати їхню поведінку у різних сценаріях, аналітика великих даних дозволяє виявляти закономірності для передбачення технічних несправностей, а автоматизація і штучний інтелект сприяють ранньому виявленню можливих проблем. SWOT-аналіз продемонстрував, що сильними сторонами платформ є наявність висококваліфікованого персоналу та сучасних технологій моніторингу. Однак високі витрати на інновації та залежність від людського фактору залишаються значними викликами. Серед можливостей – розвиток нових технологій безпеки та вдосконалення міжнародних стандартів, що підвищить ефективність управління ризиками. Основними загрозами є несприятливі погодні умови, екологічні катастрофи та ризик кібератак. Результати дослідження демонструють важливість інтеграції сучасних технологій в управління ризиками для зниження аварійності та забезпечення стабільної роботи платформ. Висновки статті підкреслюють, що використання інновацій та регулярне вдосконалення стратегій управління ризиками є ключовими чинниками для забезпечення безпечної експлуатації морських бурових платформ.

Ключові слова: морські бурові платформи, управління ризиками, штучний інтелект, аналітика великих даних, екологічна безпека, прогнозування технічних несправностей, людський фактор, дистанційний моніторинг, кібератаки, стандарти безпеки.

¹ канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-5803-9069, au.lopatnyova@gmail.com

² д-р техн. наук., професор, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-3164-6504, yuliia.koskina@ukr.net

³ канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0002-9695-9296, alexey.drozhdyn@ukr.net

A.Yu. Zaiets, Yu.O. Koskina, O.L. Drozhzhyn. SWOT-analysis in the risk management system of offshore drilling platforms. The article is dedicated to analyzing the risks associated with the maintenance and operation of offshore drilling platforms, which are critically important assets in the oil and gas industry. The primary risks for these platforms include physical threats (such as storms, high waves, and equipment corrosion), technical issues, human factors, and environmental hazards, including pollution from potential oil spills. The study examines modern risk management methods that reduce the likelihood of accidents, including computer modelling, simulations, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), the Internet of Things (IoT) for real-time equipment monitoring, as well as regular audits and personnel training. Particular attention is given to innovative technologies that significantly improve risk management. For instance, digital twins allow for the creation of digital replicas of physical assets, enabling the prediction of their behaviour under various scenarios. Big data analytics helps to identify patterns that allow for the prediction of technical failures, while automation and artificial intelligence (AI) aid in the early detection of potential issues. The SWOT analysis showed that the strengths of platforms include highly skilled personnel and modern monitoring technologies. However, the high cost of innovation and reliance on human factors remain major challenges. Among the opportunities are the development of new safety technologies and improvements to international standards, which could enhance risk management efficiency. The main threats include adverse weather conditions, environmental disasters, and the risk of cyberattacks. The study's findings demonstrate the importance of integrating modern technologies into risk management practices to reduce the incidence of accidents and ensure stable platform operations. The article concludes that adopting innovations and regularly improving risk management strategies are essential factors in ensuring the safe operation of offshore drilling platforms.

Keywords: *offshore drilling platforms, risk management, artificial intelligence, big data analytics, environmental safety, technical failure prediction, human factor, remote monitoring, cyberattacks, safety standards.*

Постановка проблеми. Морські бурові платформи є важливою частиною нафтової та газової промисловості, забезпечуючи видобуток ресурсів з-під морського дна, навіть у віддалених районах океану. Завдяки технологічним досягненням, бурові установки працюють на великих глибинах, проте їхня експлуатація супроводжується значними ризиками. Суворі морські умови, шторми, сильні вітри та корозія обладнання створюють серйозні виклики для обслуговування платформ. Крім природних факторів, технічні несправності можуть призвести до аварій, таких як витoki нафти або викиди газу, які загрожують безпеці персоналу, довкіллю та фінансовій стабільності проєктів.

Для управління цими ризиками необхідно використовувати інноваційні технології, зокрема автоматизацію, дистанційний моніторинг, цифрові двійники та великі дані. У рамках цього підходу проведено оцінку ризиків обслуговування платформи на родовищі Jacky (Шотландія, узбережжя Морей-Ферт), що розташована в зоні підвищеної небезпеки. Ризики класифіковано за рівнем серйозності та ймовірністю виникнення, а також розроблено план заходів для їхнього зниження.

Особлива увага приділяється погодним умовам, діяльності інших суден, а також ризикам, пов'язаним із дистанційно керованими апаратами (ROV). Застосування стандартів безпеки, засобів індивідуального захисту та комунікаційних процедур дозволяє підготуватися до можливих сценаріїв і мінімізувати негативні наслідки. Це забезпечує захист персоналу, довкілля та ефектively реалізацію проєкту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] розглядається важливість управління ризиками для безпеки шельфових платформ. Автори пропонують метод ідентифікації та оцінки ризиків, заснований на аналізі тексту даних про приховані загрози за допомогою технік машинного навчання, глибокого навчання та обробки природної мови. Метод включає створення рамок для структурованого вираження ризикової інформації та розробку автоматизованої системи для ідентифікації ризиків. Використання цього підходу демонструється на прикладі

нафтового поля Бохай у Китаї, підкреслюючи його ефективність у виявленні ризиків та автоматизації оцінювання.

Стаття [2] зосереджується на аналізі ризиків, пов'язаних з експлуатацією портів та віддалених терміналів, які є критично важливими для міжнародної торгівлі та транспортування. У ній розглядається необхідність визначення пріоритетів захисних заходів за допомогою комплексного підходу до управління ризиками, зокрема використанням рамки управління ризиками (RM) для портів та терміналів. Автори пропонують інтегрований аналіз ризиків з використанням генеричного галстук-метелик аналізу, дерева відмов та дерева подій, щоб допомогти професіоналам портів у детальному дослідженні ризиків. Окрім цього, застосовуються теорія нечітких множин та підходи можливостей для подолання недоліків традиційних методів на основі ймовірностей, що підкреслює інноваційний підхід до аналізу ризиків в умовах невизначеності.

В статті [3] автори розглядають унікальні виклики, з якими стикаються працівники, які працюють у віддалених і вимогливих умовах, таких як морська нафтогазова промисловість та комерційне судноплавство. Основна увага приділяється фізичним і психосоціальним стресорам, які впливають на їхню здатність виконувати рутинні завдання та управляти надзвичайними ситуаціями. Такі стресори включають коливання суден, шум, погану якість повітря, важку фізичну працю та обмежений житловий простір. Розглядаються психосоціальні фактори, такі як ізоляція, обмежені можливості для дозвілля та вплив на сімейне життя, які сприяють стресу і втомі, зокрема через тривалі робочі години і зміну денних та нічних змін. Обговорюються наслідки цих стресорів, таких як втома та порушення сну, і їх вплив на безпеку та благополуччя персоналу.

Стаття [4] обговорює впровадження системи MES (Manufacturing Execution System) на шельфових нафтогазових родовищах Південно-Китайського моря для розв'язання проблеми ізоляції даних у управлінні безпекою. Система MES, що вже успішно застосовується на виробничих об'єктах КНР, дозволяє централізовано збирати та керувати структурованими даними про персонал, потенційні небезпеки та інциденти. Особлива увага в статті приділяється можливостям системи у реальному часі контролювати кваліфікацію персоналу, виявляти та аналізувати приховані ризики, а також централізованому управлінню даними. Завдяки застосуванню MES підвищується стандартизація і модулізація процесів надання послуг з безпеки, нормалізація управління та ефективність загального керування безпекою.

У дослідженні [5] розглядається використання байєсівських мереж для кількісного аналізу ризиків спалахів під час буріння на шельфі. Аналізується дата сет норвежської дослідницької організації SINTEF про спалахи, встановлюючи, що 95% спалахів відбуваються під час буріння, завершення робіт чи ремонту. В дослідженні використовуються байєсівські мережі для ідентифікації та аналізу основних факторів ризику, включаючи відмову противибухового превентора та погане цементування. Результати, отримані за допомогою графічного інтерфейсу Genie, виявляють основні ризики і використовуються для побудови моделі Байєсової мережі для оцінки ризиків, враховуючи відмови компонентів та помилки людини. Цей метод дозволяє розглянути складність геологічних умов і технологічних операцій у водному та підводному середовищі, сприяючи розвитку стратегій управління ризиками на шельфі.

У статті [6] обговорюється передова методологія динамічного обслуговування на основі Risk-Based Monitorin (RBM) для планування обслуговування та підвищення безпеки обладнання в морському середовищі. Використання Баєсівської мережі (BN) дозволяє розробити нову методологію RBM, яка застосовує інформацію про передвісник аварії для оновлення профілю ризику та оптимізації вартості обслуговування. На прикладі відмови системи сепаратора на офшорній платформі демонструється необхідність регулярного обслуговування для підтримання ефективності та безпеки обладнання, а також проводиться аналіз чутливості критичних компонентів системи.

Стаття [7] представляє метод для оцінки ризиків та розробки плану інспекцій, призначений для управління структурною цілісністю морських платформ типу «jacket». Використовуючи напівкількісні та кількісні методи, методика дозволяє проводити глобальну оцінку ризиків для всієї структури платформи та локальні оцінки для ключових компонентів, таких як трубні з'єднання. Стратегія і програма інспекцій розроблені на основі рекомендованих практик та демонструються за допомогою прикладу реалізованого проекту Бюро Верітас.

Постановка наукової проблеми. Морські бурові платформи відіграють важливу роль у забезпеченні глобального постачання нафти та газу, особливо з огляду на обмеженість доступних

запасів на суші та зростання потреби в енергоресурсах. Проте їх експлуатація супроводжується значними ризиками, що становлять загрозу як для безпеки працівників, так і для навколишнього середовища. Основні ризики включають фізичні ризики (шторми, високі хвилі, корозія), операційні ризики (технічні несправності, витоки нафти або газу), людський фактор (помилки оператора, вплив стресу) та екологічні ризики, пов'язані з потенційними витоками нафти, які можуть призвести до серйозних забруднень морських екосистем. Кожен із цих факторів може спричинити серйозні фінансові втрати для компаній, включаючи витрати на ліквідацію аварій, ремонт обладнання та виплати компенсацій, а також негативно вплинути на репутацію компанії.

Забезпечення безпеки морських досліджень і операцій на таких об'єктах, як платформа на родовищі Jаску, є складним завданням через численні ризики, що виникають у процесі виконання робіт у суворих умовах морського середовища [8]. Постійні зміни погодних умов, висока вірогідність великих хвиль, туману та обмеженої видимості створюють додаткові загрози для безпеки персоналу і збереження обладнання. Крім того, специфіка підводної інфраструктури, присутність рибальського спорядження та рух інших суден у зоні платформи можуть призвести до непередбачуваних інцидентів, що потребують своєчасного реагування і планування.

Традиційні підходи до управління ризиками, зокрема регулярні інспекції та базові програми навчання персоналу, часто виявляються недостатніми в умовах складного бурового середовища. Це ускладнює ідентифікацію та мінімізацію загроз у реальному часі. Відсутність належної інтеграції сучасних технологій моніторингу та контролю, таких як ROV, динамічні системи позиціонування та багатопроменеві ехолоти, обмежує можливість зменшення ризиків під час морських досліджень.

Наукова проблема полягає в необхідності вдосконалення підходів до управління ризиками, які б враховували специфіку морських операцій на морських бурових платформах. Це включає розробку ефективної системи оцінки ризиків та застосування сучасних методів контролю, що забезпечать безпечне проведення робіт, захистять довкілля та зменшать фінансові втрати.

Метою статті є аналіз основних ризиків, притаманних морським буровим платформам на прикладі родовища Jаску, а також розробка та впровадження заходів з управління цими ризиками для забезпечення безпеки персоналу і надійності обладнання під час виконання операцій, а також розробка рекомендацій для майбутніх проектів з підвищення безпеки в умовах підвищеного ризику.

Виклад основного матеріалу.

Огляд ризиків морських бурових операцій. Морські бурові операції є надзвичайно складними та небезпечними через поєднання природних, технічних та людських факторів, що впливають на безпеку працівників, стабільність обладнання та захист довкілля. Основні ризики включають фізичні ризики, операційні ризики, людський фактор, екологічні загрози та економічні втрати.

Фізичні ризики є одними з найпоширеніших на морських бурових платформах, оскільки буріння відбувається у складних морських умовах. Шторми, високі хвилі та сильні вітри можуть створювати навантаження на платформу, особливо під час роботи на великих глибинах, де тиск значно більший. Крім того, погодні умови можуть ускладнювати рятувальні операції та евакуацію персоналу в разі надзвичайних ситуацій. Наприклад, урагани часто вражають бурові платформи в Мексиканській затоці, призводячи до пошкоджень конструкцій та аварійних ситуацій, як це було у випадку урагану «Катріна» в 2005 році.

Корозія також є суттєвою проблемою через постійний контакт металевих конструкцій з морською водою. Згідно з дослідженнями, вплив солоної води на металеві компоненти призводить до швидкого зношування, зменшуючи термін служби обладнання та збільшуючи потребу в регулярному обслуговуванні та заміні деталей. Це, своєю чергою, підвищує експлуатаційні витрати та потребує додаткових заходів захисту, таких як антикорозійне покриття та регулярні інспекції [9].

Операційні ризики на бурових платформах включають технічні несправності та відмови обладнання. Найбільш критичними є несправності, що можуть призвести до витоку нафти чи газу, які становлять серйозну загрозу як для працівників, так і для навколишнього середовища. Наприклад, аварія на платформі «Deepwater Horizon» у 2010 році стала однією з найбільших екологічних катастроф, спричинених витоком нафти внаслідок вибуху на платформі.

Операційні ризики також включають збої в системах управління бурінням та відмови допоміжного обладнання, як-от насосів та компресорів. Дослідження [10] показує, що часто причинами технічних відмов є не тільки зношування обладнання, але й неможливість оперативного ремонту в умовах морської ізоляції. Крім того, такі збої часто пов'язані з високою вартістю відновлення та ремонту, що може мати значний вплив на загальні витрати на експлуатацію.

Ризики людського фактора. Людський фактор є одним із ключових джерел ризиків на бурових платформах. Довгі вахти, суворі умови праці, стрес та перевтома можуть призвести до помилок операторів, які іноді стають причинами серйозних аварій. Дослідження [3, 10] вказує на те, що тривала зміна роботи негативно впливає на концентрацію працівників, що часто призводить до помилок і збоїв у роботі.

Людський фактор також має велике значення в умовах кризових ситуацій, де від швидких і правильних дій персоналу залежить безпека всієї операції. Наприклад, у разі витоку газу або раптового пошкодження платформи оператори повинні швидко приймати рішення та координувати дії для захисту як працівників, так і обладнання. Навчання та систематичний тренінг у симуляційних умовах мають важливе значення для підготовки персоналу до непередбачуваних ситуацій.

Екологічні ризики морських бурових платформ пов'язані з можливими витокami нафти або газу в разі аварійних ситуацій. Морські платформи розташовані в екосистемах, де виток нафтопродуктів можуть мати серйозні наслідки для морської флори та фауни, а також для місцевих економічних галузей, таких як рибальство і туризм. Аварії, такі як витік нафти під час аварії на «Deepwater Horizon», показали, що ліквідація наслідків витоків є надзвичайно складною та витратною, а вплив на довкілля може тривати роками [9, 10].

Дослідження також показують, що навіть незначні витоки можуть викликати значне забруднення, яке поширюється на значні відстані через течії та морські вітри. Це ускладнює моніторинг і швидке реагування, тому компанії вкладають значні кошти в системи раннього виявлення витоків.

Економічні ризики. Аварії та збої у функціонуванні морських бурових платформ можуть мати серйозні фінансові наслідки для компаній. Окрім витрат на ремонт та відновлення пошкодженого обладнання, компанії можуть стикатися з юридичними наслідками, такими як штрафи та судові позови від органів екологічного нагляду та місцевих громад. Наприклад, витрати BP на ліквідацію наслідків аварії на «Deepwater Horizon» та виплати компенсацій сягнули десятків мільярдів доларів [10].

Крім фінансових витрат, аварії можуть мати негативний вплив на репутацію компанії, що призводить до втрати клієнтів, інвесторів та, можливо, навіть урядових контрактів. Це підвищує важливість застосування проактивних методів управління ризиками для збереження стабільності операцій і захисту активів компанії.

Методи оцінки та управління ризиками. Ефективне управління ризиками на морських бурових платформах вимагає використання сучасних методів оцінки, моніторингу та проактивного реагування, щоб мінімізувати аварії, пошкодження обладнання та втрати. У цьому розділі розглянуто основні методи оцінки та управління ризиками, які застосовуються на морських бурових платформах [10, 11].

Фізичне моделювання та комп'ютерні симуляції. Комп'ютерне моделювання дозволяє змодельовувати різноманітні екстремальні умови, в яких працюватиме платформа, такі як високі хвилі, сильний вітер, екстремальні температури та тиск. Використовуючи фізичне моделювання, інженери можуть оцінювати вплив цих умов на міцність конструкцій, виявляти слабкі місця та визначати оптимальні параметри для їх покращення. Завдяки сучасним технологіям симуляції компанії можуть проводити детальний аналіз стану обладнання та прогнозувати його поведінку при максимальних навантаженнях.

Фізичне моделювання та симуляції також дозволяють тестувати можливі сценарії надзвичайних ситуацій, щоб підготувати персонал та оптимізувати протоколи дій у разі аварій. Дослідження свідчать, що симуляції допомагають покращити стійкість платформ і підвищити безпеку операцій на 15-20%, зменшуючи ймовірність аварій.

Аналіз видів та наслідків відмов (FMEA). Аналіз FMEA є ефективним інструментом, що дозволяє оцінювати потенційні технічні несправності та їх вплив на роботу всієї платформи [12]. Цей метод включає аналіз кожного компонента обладнання для виявлення можливих сценаріїв

відмов і передбачення наслідків цих відмов для всієї системи. FMEA також дає змогу ранжувати ризики за ступенем їхньої критичності та ймовірності виникнення, що дозволяє сконцентруватися на найкритичніших аспектах.

Для морських бурових платформ FMEA є особливо важливим, оскільки платформи мають складну структуру з численними взаємопов'язаними системами, такими як системи подачі бурового розчину, насоси, компресори та системи управління. У разі відмови одного з компонентів може статися ланцюгова реакція, що призведе до серйозних наслідків для безпеки. Дослідження показують, що завдяки використанню FMEA оператори можуть зменшити кількість збоїв на 30%, що значно підвищує безпеку операцій.

Моніторинг з використанням датчиків та технологій Інтернету речей (IoT) [13]. Технології IoT стають дедалі популярнішими на морських бурових платформах, оскільки вони дозволяють збирати великі обсяги даних у реальному часі. Датчики, встановлені на критичних компонентах платформи, дозволяють відстежувати параметри, такі як тиск, температура, рівень корозії, вібрації та багато інших. Зібрані дані передаються на центральні панелі управління, де аналізуються за допомогою спеціальних алгоритмів.

Завдяки цим технологіям можливе раннє виявлення аномалій, що дає змогу своєчасно реагувати на можливі несправності. Наприклад, якщо система моніторингу виявляє підвищення температури в компресорі, це може свідчити про потенційний ризик відмови, і оператори можуть негайно вжити заходів для уникнення аварії. За даними дослідження, використання IoT у моніторингу дозволяє скоротити час простоїв на 25% і знижує ймовірність великих аварій.

Аудити та інспекції. Регулярні аудити та інспекції обладнання є важливою частиною стратегії управління ризиками на морських бурових платформах. Платформи піддаються зовнішнім інспекціям, які проводять незалежні організації, а також внутрішнім аудитам, що здійснюються технічними відділами компаній. Такі аудити дозволяють виявляти недоліки в технічному стані обладнання та вчасно усувати проблеми, які можуть призвести до аварій.

Регулярні інспекції також допомагають підтримувати відповідність міжнародним стандартам безпеки, таким як ISO 9001 [14] та API RP 14E [15]. Компанії зобов'язані дотримуватися цих стандартів, оскільки це не лише сприяє підвищенню безпеки, але й захищає їх від юридичних ризиків. Дослідження показують, що аудити знижують ймовірність аварійних ситуацій на 15-20% завдяки своєчасному виявленню проблемних зон.

Навчання та підготовка персоналу. Людський фактор залишається одним із ключових аспектів безпеки на морських бурових платформах, тому інтенсивне навчання персоналу має велике значення. Програми навчання включають не лише теоретичну підготовку, а й практичні симуляції, що моделюють аварійні ситуації. Ці симуляції допомагають працівникам навчитися приймати швидкі та правильні рішення в екстремальних умовах.

Наприклад, персонал регулярно проходить тренінги з евакуації, а також навчання з управління вибухонебезпечними ситуаціями та витоками нафти. Така підготовка значно знижує ймовірність людських помилок у кризових ситуаціях, забезпечуючи вищий рівень безпеки. Дослідження свідчать, що програми навчання можуть знизити рівень ризиків, пов'язаних з людським фактором, на 30% [3, 10].

Оцінка ризиків морських операцій і обслуговування бурової платформи на родовищі Ласку. Розглянемо оцінку ризиків щодо морських операцій і обслуговування бурової платформи на родовищі Ласку [8]. Для проведення оцінки ризиків у проєкті використовувалась детальна методологія, що ґрунтується на матриці оцінки ризиків. Матриця ризику є важливим інструментом, який дозволяє визначити рівень небезпеки різних ситуацій на основі їх серйозності та ймовірності виникнення. У цьому підході ризики класифікуються на основі двох основних чинників: ступеня тяжкості (серйозності) та ймовірності.

1. Матриця ризику містить оцінку тяжкості від 1 до 5, де:

- 1 – незначний (відсутність травм або невеликі матеріальні втрати),
- 2 – обмежений (потребує першої медичної допомоги, мінімальні локальні впливи),
- 3 – помірний (потребує медичного втручання, незначне порушення довкілля),
- 4 – високий (тривалі порушення, значна шкода для персоналу та довкілля),
- 5 – дуже високий (фатальні наслідки, масштабні екологічні катастрофи).

Оцінка ймовірності також здійснюється за п'ятибальною шкалою, де 1 означає «майже неможливо» (дуже низька ймовірність події протягом всього проекту), а 5 – «дуже ймовірно» (подія може статися щоденно або щотижнево).

2. Поєднання тяжкості та ймовірності. Комбінація оцінок за цими двома критеріями дозволяє визначити кінцевий рівень ризику для кожної ситуації та класифікувати його на основі результатів:

- Рівень ризику 1-6 – низький ризик, який не потребує негайних дій;
- Рівень ризику 8-12 – середній ризик, для якого потрібне схвалення управління, консультація з фахівцями та/або коригування завдання;
- Рівень ризику 15-25 – високий ризик, виконання завдань можливе лише після значного зниження рівня ризику.

3. Визначення специфічних категорій ризику. Процес оцінки також включав поділ ризиків на категорії відповідно до типу загроз: загальні ризики під час роботи на платформі, ризики при виконанні робіт з аналоговим обладнанням, ризики під час роботи ROV та ризики, пов'язані з особливостями бурової платформи на родовищі Jаску.

4. Процес зниження ризиків. Оцінка ризиків виявила необхідність впровадження системи контролю для кожної з виявлених загроз. Серед них – використання спеціалізованого обладнання, проведення інструктажів та тренувань для персоналу, застосування обмежувальних зон та засобів захисту, а також розробка процедур екстреного реагування. Введення таких заходів допомагає знизити загальний ризик та підвищити рівень безпеки робіт.

Ця методологія забезпечує чітку структуру оцінки ризиків та сприяє впровадженню необхідних заходів для мінімізації небезпек. Використання ризикової матриці дозволяє приймати зважені рішення щодо можливості виконання тих чи інших робіт та надає команді основні інструменти для управління ризиками в реальному часі.

Загальні ризики та заходи безпеки. В рамках проекту для бурової платформи на родовищі Jаску було ідентифіковано кілька загальних ризиків, що виникають під час виконання різних операцій, як-от підготовчі роботи, підйомні операції та транспортування обладнання. Ці ризики можуть вплинути на персонал і техніку та, в деяких випадках, призвести до серйозних наслідків для здоров'я та безпеки. Для кожного з виявлених ризиків було розроблено заходи контролю, які мають знизити ймовірність їх виникнення та/або зменшити наслідки.

1. Підйом обладнання та постачання. Під час переміщення вантажів за допомогою суднових або берегових кранів існує ризик пошкодження обладнання або серйозних травм через падіння вантажу чи зіткнення з рухомими частинами.

Заходи контролю: проводяться інструктажі та узгоджуються чіткі команди перед підйомом; проводяться перевірки технічного стану обладнання для підйому; використовуються обмежувальні зони та бар'єри, які фізично унеможливають доступ персоналу до небезпечних ділянок під час підйому.

2. Ручне маневрування обладнання. Транспортування і розміщення важкого обладнання вручну може призвести до травм спини, пошкодження майна та нещасних випадків через неправильне або недостатньо підготовлене маневрування.

Заходи контролю: забезпечується достатня кількість персоналу, перевіряється маршрут на відсутність перешкод; використовується обладнання для допомоги у підйомі, а також персонал повинен застосовувати правильну техніку підйому, щоб уникнути перевантаження.

3. Гарячі роботи (різання, зварювання та шліфування). Виконання таких робіт становить загрозу для очей, можливі опіки, контакт із газами та парами, ризик займання або вибуху.

Заходи контролю: дотримання дозволів на гарячі роботи, наявність захисних пристроїв та інвентарю, зокрема, вогнегасників, огороження робочої зони, а також обов'язкове використання спеціалізованих засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), як-от зварювальні маски та захисний одяг.

4. Електротехнічне обслуговування та ремонт. Роботи з електрообладнанням несуть ризик ураження струмом, утворення дугових спалахів і займання.

Заходи контролю: усі роботи з обладнанням понад 110 В виконуються тільки кваліфікованим персоналом, що має відповідні дозволи; обладнання відключається перед початком робіт; проводиться візуальна перевірка кабелів і заземлення для забезпечення безпечного виконання завдань.

5. Гідравлічне обладнання. Використання гідравлічних систем передбачає ризики розбрикування масла під високим тиском, а також може стати причиною поранень та пошкоджень обладнання.

Заходи контролю: роботи виконуються тільки кваліфікованими фахівцями; гідравлічні шланги та з'єднання регулярно перевіряються на наявність пошкоджень і корозії; використовується спеціалізоване обладнання для збору витоків, а також встановлені системи блокування для запобігання неконтрольованому вивільненню тиску.

6. Роботи на висоті. Виконання робіт на висоті загрожує падінням обладнання або персоналу, що може призвести до серйозних травм.

Заходи контролю: перед початком робіт проводиться аналіз та вибір оптимальних методів безпеки, таких як бар'єри та підмостки; персонал використовує страхувальні системи та виконує роботи в парі з напарником; надається інструктаж щодо правил безпеки при роботі на висоті.

7. Переміщення на території порту та судна. Вузькі місця на причалі та території порту створюють ризик для персоналу, який може зазнати травм через інші транспортні засоби або обладнання.

Заходи контролю: забезпечується висока видимість персоналу, що носить жилети з високою видимістю, і проводяться інструктажі з безпечного переміщення по судну та причалу; також організовано регулярні перевірки зон, що мають обмежену видимість або підвищену рухливість.

Операції з аналоговим обладнанням. Під час проведення операцій з аналоговим обладнанням на буровій платформі на родовищі Jаску було виявлено декілька ключових ризиків, пов'язаних із запуском, відновленням та роботою із засобами дослідження. Аналогове обладнання, яке використовується для збору даних, потребує особливої уваги під час переміщення, щоб уникнути пошкодження та забезпечити безпеку персоналу.

1. Запуск і відновлення SVP (Sound Velocity Profiler). Одним із важливих етапів є маніпуляції з SVP – приладом, який використовують для вимірювання швидкості звуку в морській воді. Цей процес може призвести до пошкодження обладнання через небезпечну близькість до пропелерів судна, можливість зачеплення за корпус або до травмування персоналу.

Заходи контролю: перед кожною операцією проводиться детальний інструктаж (Toolbox Talk), особливо для менш досвідчених членів команди, які заохочуються брати участь у проведенні інструктажу; погодні умови та стан моря оцінюються перед запуском; використовується затверджена процедура з чітким зв'язком з містком судна для контролю кожного етапу.

2. Запуск і відновлення іншого дослідницького обладнання. Під час маніпуляцій з іншими датчиками та приладами, що запускаються у воду, можуть виникнути ризики через натягнуті кабелі, які можуть зачепитися за суднові пристрої або викликати пошкодження обладнання.

Заходи контролю: розроблено та затверджено чіткі процедури запуску та відновлення, які включають перевірку погодних умов та стану моря; операції виконуються з обов'язковим страхувальним обладнанням, а також із захисними засобами на відкритих ділянках палуби; призначено єдину особу, відповідальну за координацію всіх етапів на кормі судна для уникнення непорозумінь.

3. Пошкодження обладнання через підводні об'єкти. Застосування буксируваних приладів на буровій платформі на родовищі Jаску включає ризик пошкодження обладнання через можливість «зачеплення» за підводні об'єкти або інші інфраструктури.

Заходи контролю: використання слабких ланок у буксированому обладнанні для запобігання серйозним пошкодженням у випадку зачеплення; кожен датчик забезпечений маяком, що дозволяє відстежувати його місцезнаходження у випадку втрати; попередньо досліджуються зони підвищеного ризику за допомогою багатопромених ехолотів, що дозволяє уникнути небезпечних ділянок під час операцій.

4. Ризик травмування персоналу через втому. Виконання завдань на відкритих ділянках судна протягом тривалого часу може призвести до втоми, що знижує пильність і підвищує ризик помилок під час операцій.

Заходи контролю: організовано чітке планування робочих змін, що враховує потреби кожного члена команди; введено систему підтримки, за якої кожен працівник має напарника для моніторингу ознак втоми; команди на кормі судна підтримують постійний зв'язок із містком для забезпечення безпеки під час усіх етапів робіт.

Операції з ROV [16]. Під час операцій з ROV на буровій платформі на родовищі Jacky існують різні ризики, пов'язані з безпекою персоналу, збереженням апаратів та захистом обладнання платформи. ROV є важливим інструментом для проведення підводних досліджень та огляду, проте вони вимагають суворого дотримання процедур безпеки під час запуску, експлуатації та відновлення.

1. Запуск і відновлення ROV. Найбільший ризик у цій операції – можливий контакт ROV з іншими предметами на палубі або персоналом, а також пошкодження ROV через невдалий запуск або відновлення. Заходи контролю: усі роботи з ROV виконуються кваліфікованим персоналом, що має підтверджений досвід і відповідне навчання; перед кожним запуском проводиться інструктаж, що охоплює всі аспекти операції, і здійснюється зв'язок із містком для забезпечення координації всіх етапів; оцінюються погодні умови для визначення безпеки запуску та відновлення.

2. Відмова підйомного обладнання або кабелю ROV. Пошкодження підйомної системи або кабелю може призвести до падіння ROV, що становить небезпеку для персоналу і викликає ризик втрати апарата. Заходи контролю: підйомна система для ROV проходить регулярну сертифікацію і тестування; кабель для підйому має сертифікацію, що підтверджує його здатність витримувати необхідні навантаження; також, перед кожним запуском здійснюється огляд обладнання на наявність можливих пошкоджень.

3. Пошкодження ROV через підводні перешкоди. Під час переміщення під водою ROV може зіткнутися з різними об'єктами на дні моря, що може призвести до пошкодження апарата і втрати його контролю. Заходи контролю: перед кожним запуском проводиться сканування зони на наявність підводних перешкод із використанням даних гідролокації; ROV оснащується переднім сканувальним сонаром для уникнення зіткнень, а також проводиться регулярне оновлення карти підводних об'єктів.

4. Погіршення видимості через наближення до морського дна. Умови поганої видимості можуть спричинити зіткнення ROV із морським дном або заплутування в об'єктах на глибині. Заходи контролю: ROV працює на максимально можливій висоті від дна для зменшення підняття осаду; для поліпшення навігації використовуються додаткові датчики та сигнали, що дозволяють уникнути зіткнень; розроблено аварійні процедури для відновлення апарата у разі його втрати.

5. Втрата потужності на борту або в контрольному центрі. Переривання електроживлення на борту судна може спричинити втрату зв'язку з ROV, що створює ризик зіткнення та пошкодження апарата. Заходи контролю: система живлення для ROV контролюється через бортові сигнальні системи, що дозволяє миттєво повідомити про будь-яке зниження потужності; підтримується постійна орієнтація судна щодо уникнення зіткнень у разі втрати контролю над ROV.

6. Взаємодія з системами гідравліки та руху судна. Невідповідне розташування судна або рух пропелерів може створити ризик втягування кабелів ROV, що може призвести до його втрати. Заходи контролю: до кожної операції розробляється чіткий план позиціонування судна та ROV, враховуючи розташування пропелерів і тримачів; узгоджуються всі рухи судна для уникнення будь-яких несанкціонованих змін позиції; операціями керують кваліфіковані оператори систем позиціонування.

Ризики, пов'язані з конкретним майданчиком. Бурова платформа на родовищі Jacky розташована в зоні, яка має специфічні умови, що впливають на безпеку операцій і вимагають особливої уваги до зовнішніх факторів. Серед основних загроз – погодні умови, наближення інших суден, можливість пошкодження обладнання, що може серйозно вплинути на роботу. Цей розділ детально розглядає ризики, характерні для майданчика, і пропонує заходи для їх контролю.

1. Суворі погодні умови. Різкі зміни погоди можуть призвести до сильного хвилювання моря, що загрожує обладнанню та персоналу. Заходи контролю: клієнт надає прогнози погоди для цієї зони двічі на день, що дозволяє команді заздалегідь підготуватися до зміни умов; усі обладнання проходять перевірку на морехідність перед виходом у море; розроблені безпечні зони для евакуації персоналу, якщо погодні умови значно погіршаться.

2. Ризик переохолодження. Через низькі температури та тривале перебування на відкритому повітрі персонал може бути підданий ризику переохолодження. Заходи контролю: персонал забезпечується теплим одягом, спеціально адаптованим для умов роботи на відкритому повітрі; усі працівники працюють в парі та стежать один за одним, щоб вчасно виявити ознаки переохолодження (наприклад, тремтіння або сповільнене мовлення).

3. Великі хвилі, що загрожують палубі. Великі хвилі можуть впливати на стійкість судна та становлять загрозу для обладнання і персоналу. Заходи контролю: команду регулярно інформують про місцеві погодні умови, а за необхідності забороняється доступ на відкриті палуби; у нічний час забезпечується достатнє освітлення для безпечного пересування палубою; контейнерні блоки розташовуються вище рівня хвиль для уникнення їх заливання.

4. Погіршення якості даних через погані погодні умови. Погіршення умов може знизити якість даних, отриманих під час дослідження. Заходи контролю: обговорюються погодні допуски для якості даних перед початком робіт; оператори та представники клієнта перевіряють якість даних протягом усієї операції, особливо під час несприятливих погодних умов.

5. Туман і обмежена видимість. Погіршення видимості під час туману може створити загрозу зіткнення з іншими об'єктами або ускладнити пошуки людини за бортом (МОБ). Заходи контролю: операції припиняються, якщо видимість знижується менше ніж на 500 метрів; судно переходить у режим динамічного позиціонування, що дозволяє утримувати його в стабільному положенні подалі від інших об'єктів; всі навігаційні екрани на містку оновлюються для чіткого відображення положення інфраструктури.

6. Зачеплення за рибальське спорядження. Існує ризик зачеплення обладнання за рибальське спорядження, яке може перебувати у зоні проведення досліджень. Заходи контролю: команда містка здійснює спостереження за рибальськими суднами та спорядженням; перед початком робіт із рибалками в зоні проводиться інструктаж і узгоджується порядок дій для уникнення конфліктів та перешкод.

7. Повороти ліній з буксируваним обладнанням. Повороти з буксируваним обладнанням можуть призвести до заплутування тросів у пропелерах судна. Заходи контролю: трос обладнання скорочується до необхідної довжини під час поворотів; оптимальні радіуси повороту обговорюються під час інструктажів і отримують погодження клієнта для мінімізації ризику зачеплення.

8. Близькість до бурової платформи на родовищі Яску та підводної інфраструктури. Наближення до платформи або підводних трубопроводів створює ризик зіткнення. Заходи контролю: курси до платформи плануються таким чином, щоб уникати прямого наближення; під час робіт біля платформи на містку завжди перебувають два старших офіцери для спостереження за операцією та навігацією.

Роль інновацій у зниженні ризиків. Сучасні технологічні досягнення значно підвищують безпеку морських бурових операцій, забезпечуючи нові підходи до моніторингу, управління та прогнозування ризиків [17]. Інновації, такі як дрони, роботизовані системи, штучний інтелект (ШІ), цифрові двійники та аналітика великих даних, стали важливими інструментами для зниження рівня ризиків на бурових платформах.

Технології віддаленого моніторингу. Віддалений моніторинг за допомогою дронів та роботизованих систем дозволяє проводити інспекції важкодоступних або небезпечних ділянок платформи без необхідності відправляти персонал. Дрони оснащені високоякісними камерами, тепловізорами та сенсорами, що дозволяють знімати високоточні зображення, відео та дані. Це особливо корисно в умовах екстремальних погодних ситуацій або високого ризику для безпеки працівників. Застосування дронів дозволяє значно скоротити час інспекцій, а також виявляти дефекти та ознаки зношування на ранніх етапах. Наприклад, на одній з платформ у Північному морі регулярні огляди дронами допомогли знизити кількість традиційних перевірок, що потребували втручання персоналу, на 30%. Це не лише підвищило ефективність операцій, але й зменшило ризики для працівників.

Автоматизація та штучний інтелект (ШІ). Застосування автоматизації та ШІ дозволяє операторам бурових платформ краще розуміти стан обладнання та передбачати можливі поломки ще до їх виникнення. Алгоритми ШІ аналізують поточні показники та порівнюють їх із історичними даними, що дозволяє виявляти навіть незначні відхилення. Наприклад, різкі зміни температури чи тиску в певних частинах системи можуть свідчити про можливу несправність, яку потрібно перевірити. Крім того, ШІ здатний визначати закономірності в роботі платформи та прогнозувати можливі несправності, ґрунтуючись на факторах, які в минулому спричиняли відмови. Дослідження вказує на те, що використання ШІ зменшило час простоїв на 20-30%, що є значним показником для морських операцій, де кожна година простою дорого обходиться [17].

Екологічні заходи. Захист навколишнього середовища є одним із ключових пріоритетів для морських бурових компаній. Тому інновації у сфері екологічної безпеки набувають дедалі

більшого значення. Наприклад, сучасні системи раннього попередження витоків можуть виявляти навіть незначні зміни тиску чи обсягу продукції, що транспортується трубопроводами. Це дозволяє оперативніше реагувати на витіки, мінімізуючи вплив на довкілля. Системи моніторингу, які інтегрують дані з кількох сенсорів, можуть сигналізувати про потенційні проблеми ще до того, як витік стане помітним. Дослідження показало, що використання таких систем зменшує час реагування на витіки нафти до 40%, що значно знижує ризики для морської екосистеми [9].

Цифрові двійники. Цифрові двійники створюють цифрову модель фізичної платформи, яка дозволяє операторам в реальному часі бачити стан кожного компонента обладнання. Ця модель поєднує дані з сенсорів, історичні записи та алгоритми прогнозування, що дозволяє проводити віртуальні симуляції можливих сценаріїв аварій. Це допомагає інженерам проаналізувати ймовірність ризиків і вжити проактивних заходів. Завдяки цифровим двійникам можна швидко перевірити, як певний компонент платформи реагуватиме на зміни у зовнішніх умовах, наприклад, при погіршенні погодних умов або зростанні навантаження. Дослідження показує, що використання цифрових двійників підвищує загальну ефективність управління ризиками на 25%, оскільки дозволяє операторам вчасно приймати рішення на основі реальних даних [17].

Використання великих даних (Big Data). Аналіз великих даних відкриває нові можливості для передбачення ризиків і оптимізації операцій на бурових платформах. Використання історичних даних, таких як інформація про поломки, корозійні процеси, технічне обслуговування та погодні умови, дозволяє створювати прогностичні моделі для оцінки ймовірності різних аварійних ситуацій. Компанії використовують великі дані для оптимізації графіків обслуговування, планування операцій з урахуванням погодних умов і навіть для розробки планів евакуації в разі надзвичайних ситуацій. Дослідження показало, що аналітика великих даних дозволила зменшити кількість аварій на 15% завдяки точному прогнозуванню та запобіжним заходам [17].

SWOT-аналіз і його використання для оцінки ризиків обслуговування та експлуатації морських бурових платформ. SWOT-аналіз є інструментом стратегічного управління, який дозволяє оцінювати сильні сторони (Strengths), слабкі сторони (Weaknesses), можливості (Opportunities) та загрози (Threats) певного об'єкта або процесу. Цей метод широко застосовується у бізнесі для розробки стратегій розвитку, однак його ефективність також добре зарекомендувала себе в оцінці ризиків різних промислових галузей, зокрема в нафтовидобувній сфері. SWOT-аналіз дозволяє визначити як внутрішні фактори (сильні та слабкі сторони), так і зовнішні фактори (можливості та загрози), які можуть вплинути на ефективність роботи бурових платформ.

У контексті обслуговування та експлуатації морських бурових платформ SWOT-аналіз є корисним інструментом для оцінки ризиків, оскільки він надає системний підхід до виявлення критичних факторів, які можуть мати вплив на безпеку операцій, ефективність обслуговування та екологічну відповідальність. Сильні сторони можуть включати, наприклад, високий рівень технологічної оснащеності платформи та кваліфікацію персоналу, що дозволяє знижувати ймовірність аварій. Слабкі сторони можуть охоплювати такі фактори, як високі витрати на обслуговування або обмежений доступ до обладнання через віддаленість платформи. Можливості дозволяють визначити перспективи вдосконалення – наприклад, впровадження безпілотних дронів для моніторингу обладнання або аналітики великих даних для прогнозування поломок. Загрози ж допомагають врахувати зовнішні фактори ризику, як-от несприятливі погодні умови чи загроза кібератак.

Використання SWOT-аналізу для оцінки ризиків обслуговування та експлуатації морських бурових платформ дозволяє компаніям ефективніше ідентифікувати слабкі місця та розробляти превентивні заходи. Наприклад, виявлення загрози кібератак може стимулювати компанію впроваджувати додаткові засоби кібербезпеки, а визначення слабких сторін, таких як людський фактор, допомагає підвищити якість навчання персоналу та запровадити програми управління стресом. SWOT-аналіз також сприяє покращенню екологічної відповідальності: виявлення потенційних ризиків забруднення навколишнього середовища стимулює компанії розробляти кращі системи попередження витоків.

На підставі розглянутих ризиків для бурової платформи на родовищі Яску зробимо SWOT-аналіз для оцінки ризиків обслуговування та експлуатації морських бурових платформ (Табл. 1) та матрицю зі стратегіями для використання можливостей та протидії загрозам відповідно до SWOT-аналізу (Табл. 2)

Таблиця 1

SWOT-аналіз ризиків для бурової платформи на родовище Jacky

Сильні сторони (Strengths)	Слабкі сторони (Weaknesses)	Можливості (Opportunities)	Загрози (Threats)
<i>Інноваційна методологія оцінки ризиків:</i> Використання матриці ризиків для оцінки серйозності та ймовірності загроз забезпечує структурований підхід до управління ризиками.	<i>Високі витрати на обладнання та навчання:</i> Необхідність у спеціалізованому обладнанні та регулярних тренуваннях збільшує витрати.	<i>Розвиток нових технологій безпеки:</i> Впровадження безпілотників для інспекцій, прогностичного обслуговування та аналітики великих даних може суттєво зменшити ризики.	<i>Погодні умови та природні катастрофи:</i> Урагани та хвилі можуть спричинити пошкодження обладнання, загрожуючи безпеці працівників і техніки.
<i>Екологічні заходи контролю:</i> Впровадження сучасних систем раннього виявлення витоків мінімізує ризики забруднення навколишнього середовища.	<i>Складність технічного обслуговування:</i> Через морське розташування платформи важко проводити своєчасний ремонт та обслуговування.	<i>Підвищення міжнародних стандартів:</i> Нові стандарти допоможуть зменшити кількість аварій, сприяючи стабільності операцій.	<i>Екологічні катастрофи:</i> Витоки нафти можуть призвести до значних забруднень, високих штрафів та втрати репутації.
<i>Висококваліфікований персонал:</i> Регулярні тренінги та інструктажі для персоналу знижують ймовірність людських помилок під час операцій.	<i>Обмеження через людський фактор:</i> Попри тренування, довготривала робота підвищує ймовірність помилок через втому.	<i>Інтеграція великих даних для прогнозування ризиків:</i> Прогнозування на основі історичних даних дозволяє вчасно виявляти потенційні загрози.	<i>Ризик кібератак:</i> З цифровізацією платформи зростає ймовірність кібератак, що можуть порушити роботу систем.

Таблиця 2

Матриця стратегій для використання можливостей та протидії загрозам відповідно до SWOT-аналізу

SWOT-аналіз	МОЖЛИВОСТІ (O):	ЗАГРОЗИ (T):
1	2	3
<i>Сильні сторони (S):</i>	<i>SO-стратегії:</i>	<i>ST-стратегії:</i>
1. Сучасні системи моніторингу (IoT)	1. Інтеграція IoT з ШІ для предиктивної аналітики	1. Посилення систем раннього попередження
2. Кваліфікований персонал	2. Створення цифрових двійників на базі наявних систем моніторингу	2. Розробка планів швидкого реагування
3. Автоматизовані системи безпеки	3. Розробка міжнародних навчальних програм	3. Впровадження додаткового захисту від корозії
4. Чіткі процедури та інструкції	4. Автоматизація процесів на основі накопичених даних	4. Покращення системи екологічного моніторингу
<i>Слабкі сторони (W):</i>	<i>WO-стратегії:</i>	<i>WT-стратегії:</i>
1. Висока вартість обслуговування	1. Впровадження дистанційного обслуговування для зниження витрат	1. Створення резервних систем управління для уникнення витрат у випадку аварій
2. Залежність від людського фактору	2. Розвиток автоматизованих систем для зменшення людського фактору	2. Розробка автономних систем безпеки для мінімізації впливу людських помилок
3. Складність швидкого ремонту	3. Створення віртуальних систем навчання для пришвидшення процесу ремонту	3. Формування аварійних запасів обладнання для забезпечення швидкого ремонту

Продовження таблиці 2

1	2	3
4. Обмежений доступ до платформи	4. Оптимізація витрат через предиктивне обслуговування	4. Впровадження систем автоматичної зупинки для запобігання аваріям в умовах ізоляції
5. Ізольованість від берегової бази	5. Використання дронів і дистанційного моніторингу для обслуговування на відстані	5. Забезпечення додаткових засобів зв'язку для оперативного реагування на надзвичайні ситуації

Висновки

Дослідження виявило, що ефективне управління ризиками в обслуговуванні та експлуатації морських бурових платформ є ключовим елементом для забезпечення стабільності та безпеки у важких морських умовах. Сучасні морські платформи стикаються з численними викликами, включаючи фізичні загрози (шторми, корозію, високі хвилі), технічні проблеми, людський фактор та екологічні ризики, зокрема ймовірність витоків нафти. Використання інноваційних підходів, таких як цифрові двійники, аналітика великих даних, автоматизація та штучний інтелект, показало значні переваги в зниженні ризиків і підвищенні ефективності роботи платформ.

SWOT-аналіз ризиків демонструє, що сильні сторони морських бурових платформ включають високий рівень технологічного забезпечення та кваліфікований персонал, що є важливими чинниками для зниження людських помилок і своєчасного реагування на технічні несправності. Водночас, серед слабких сторін залишаються високі витрати на впровадження інноваційних технологій і обмеження в оперативному обслуговуванні через ізолюваність платформи. Це підкреслює потребу у фінансовій підтримці для інновацій та оптимізації логістики для своєчасного обслуговування.

Зовнішні можливості для покращення управління ризиками включають розвиток нових міжнародних стандартів безпеки, що сприятиме підвищенню загального рівня безпеки операцій. Інтеграція аналітики великих даних дозволяє прогнозувати потенційні несправності, а застосування безпілотних систем моніторингу спрощує обслуговування і покращує моніторинг стану обладнання.

Основними загрозами залишаються несприятливі погодні умови, які можуть порушувати роботу платформи, загрози кібератак через підвищену цифровізацію, а також екологічні катастрофи, що можуть завдати шкоди морським екосистемам і негативно вплинути на репутацію компанії. Застосування проактивного підходу до управління ризиками, включаючи цифрові двійники, системи раннього виявлення, аналітику великих даних і автоматизовані системи безпеки, стає життєво важливим для зменшення аварійності та захисту довкілля.

Отже, для забезпечення стабільної роботи морських бурових платформ необхідна інтеграція інноваційних технологій у стратегії управління ризиками, що дозволяє забезпечити безпечну експлуатацію, мінімізувати аварії та підтримувати екологічні стандарти в умовах зростаючої складності морських операцій.

Перелік використаних джерел:

1. Risk identification and assessment methods of offshore platform equipment and operations / K. Liu et al. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 177. Pp. 1415-1430. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.081>.
2. Application of a generic bow-tie based risk analysis framework on risk management of sea ports and offshore terminals / Mokhtari K., Ren J., Roberts Ch., Wang J. *Journal of Hazardous Materials*. 2011. Vol. 192. Iss. 2. Pp. 465-475. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.05.035>.
3. Parkes K. Human factors, health and safety in the offshore oil/gas industry. *Proceedings of the Annual Conference of the Human Factors and Ergonomics Society of Australia*, Perth, Australia, 2-4 December 2013. Pp. 1-10.
4. Chen Y., Cui L., Wang C. T Application of MES system in the safety management of offshore oil and gas fields. *Journal of Quantum Computing*. 2019. Vol. 1. № 1. Pp. 41-48. DOI: <https://doi.org/10.32604/jqc.2019.06283>.
5. Quantitative risk analysis of offshore well blowout using bayesian network / B. Yin et al. *Safety Science*. 2021. Vol. 135. Article 105080. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.105080>.

6. Dynamic risk-based maintenance for offshore processing facility / J. Bhandari et al. *Process Safety Progress*. 2016. Vol. 35(4). Pp. 399-406. DOI: <https://doi.org/10.1002/prs.11829>.
7. Guédé F. Risk-based structural integrity management for offshore jacket platforms. *Marine Structures*. 2019. Vol. 63. Pp. 444-461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.04.004>.
8. Project Risk Assessment «Site Survey Clearance Sweep – Jacky Platform» № LU3481H-534-PRA-01. GEOxyz, 2019. 24 p.
9. Environmental Risk Assessment induced by Offshore Oil Spills. URL: <https://marine.copernicus.eu/services/use-cases/environmental-risk-assessment-induced-offshore-oil-spills> (дата звернення: 13.09.2024)
10. Brandsæter A. Risk assessment in the offshore industry. *Safety Science*. 2002. Vol. 40. № 1-4. Pp. 231-269. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0925-7535\(01\)00048-0](https://doi.org/10.1016/s0925-7535(01)00048-0).
11. The methodology of quantitative risk assessment studies / M. Rigaud et al. *Environmental Health*. 2024. Vol. 23. Pp. 1-32. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12940-023-01039-x>.
12. Vanko V., Prikhodko O. Matrix method for FMEA-analysis as a tool for promoting the quality of production. *Measuring Equipment and Metrology*. 2017. Vol. 78. Pp. 80-84. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcmtm2017.78.080>.
13. Самойленко М. Ю. Принципи застосування технології інтернет речей у сучасному світі техніки. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Вип. 1. № 6. С. 142-148. DOI: <https://doi.org/10.32838/tnu-2663-5941/2020.6-1/24>.
14. ДСТУ ISO 9001:2015. Системи управління якістю. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ : ДП «НДІ «Система», 2016. 22 с.
15. API Recommended Practice for Design and Installation of Offshore. Production Platform Piping Systems 14E (RP 14E). 5-th ed. American Petroleum Institute, 1991. 62 p.
16. Brito M. P., Griffiths G., Challenor P. Risk analysis for autonomous underwater vehicle operations in extreme environments. *Risk Analysis*. 2010. Vol. 30(12). Pp. 1771-1788. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2010.01476.x>.
17. 30 innovations for disaster risk reduction / T. Izumi et al. IRIDeS, Keio University, the University of Tokyo, UNU-IAS, CWS Japan, 2019. 80 p.

References:

1. K. Liu et al., «Risk identification and assessment methods of offshore platform equipment and operations», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 177, pp. 1415-1430, 2023. **doi: 10.1016/j.psep.2023.07.081**.
2. K. Mokhtari, J. Ren, Ch. Roberts, and J. Wang, «Application of a generic bow-tie based risk analysis framework on risk management of sea ports and offshore terminals», *Journal of Hazardous Materials*, vol. 192, iss. 2, pp. 465-475, 2011. **doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.05.035**.
3. K. Parkes, «Human factors, health and safety in the offshore oil/gas industry», in Proc. Annual Conf. of the Human Factors and Ergonomics Society of Australia, Perth, Australia, 2013, pp. 1-10.
4. Y. Chen, L. Cui, and C. Wang, «T Application of MES system in the safety management of offshore oil and gas fields», *Journal of Quantum Computing*, vol. 1, № 1, pp. 41-48, 2019. **doi: 10.32604/jqc.2019.06283**.
5. B. Yin, B. Li, G. Liu, Z. Wang, and B. Sun, «Quantitative risk analysis of offshore well blowout using bayesian network», *Safety Science*, vol. 135, article 105080, 2021. **doi: 10.1016/j.ssci.2020.105080**.
6. J. Bhandari, E. Arzaghi, R. Abbassi, V. Garaniya, and F. Khan, «Dynamic risk-based maintenance for offshore processing facility», *Process Safety Progress*, vol. 35(4), pp. 399-406, 2016. **doi: 10.1002/prs.11829**.
7. F. Guédé, «Risk-based structural integrity management for offshore jacket platforms», *Marine Structures*, vol. 63, pp. 444-461, 2019. **doi: 10.1016/j.marstruc.2018.04.004**.
8. Project Risk Assessment «Site Survey Clearance Sweep – Jacky Platform» № LU3481H-534-PRA-01. GEOxyz, 2019. 24 p.
9. Environmental Risk Assessment induced by Offshore Oil Spills. [Online]. Available: <https://marine.copernicus.eu/services/use-cases/environmental-risk-assessment-induced-offshore-oil-spills>. Accessed on: September 13, 2024.
10. A. Brandsæter, «Risk assessment in the offshore industry», *Safety Science*, vol. 40, № 1-4, pp. 231-

- 269, 2002. doi: 10.1016/s0925-7535(01)00048-0.
11. M. Rigaud et al. «The methodology of quantitative risk assessment studies», *Environmental Health*, vol. 23, pp. 1-32, 2024. doi: 10.1186/s12940-023-01039-x.
 12. V. Vanko, and O. Prikhodko, «Matrix method for FMEA-analysis as a tool for promoting the quality of production», *Measuring Equipment and Metrology*, vol. 78, pp. 80-84, 2017. doi: 10.23939/istcm2017.78.080.
 13. M.Y. Samoilenko, «Pryntsyry zastosuvannia tekhnolohii internet rechei u suchasnomu sviti tekhniki» [«Principles of application of the internet of things technology in the modern world of technical devices»], *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Seriya: Tekhnichni nauky – Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, vol. 1, № 6, pp. 142-148, 2020. doi: 10.32838/tnu-2663-5941/2020.6-1/24. (Ukr.)
 14. *Systemy upravlinnya yakistyu* [Quality management systems], State Standart ISO 9001:2015, Kyiv, DP «NDI «Systema», 2016. (Ukr.)
 15. *API Recommended Practice for Design and Installation of Offshore. Production Platform Piping Systems 14E (RP 14E)*, 5-th ed., American Petroleum Institute, 1991.
 16. M.P. Brito, G. Griffiths, and P. Challenor, «Risk analysis for autonomous underwater vehicle operations in extreme environments», *Risk Analysis*, vol. 30(12), pp. 1771-1788, 2010. doi: 10.1111/j.1539-6924.2010.01476.x.
 17. T. Izumi, R. Shaw, M. Ishiwatari, R. Djalante, and T. Komino, *30 innovations for disaster risk reduction*. IRIDeS, Keio University, the University of Tokyo, UNU-IAS, CWS Japan, 2019.

Стаття надійшла 25.10.2024

Стаття прийнята 13.11.2024

УДК 656.62

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321391

© Ганношина І.М.¹, Левченко О.В.²

МЕТОДИ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НАВЧАННЯ ПІД ЧАС ТРЕНАЖЕРНОЇ ПІДГОТОВКИ СУДНОВОДІВ

Тренажерна підготовка – це ефективний метод практичного навчання, що дозволяє курсантам морських навчальних закладів здобути практичні навички в умовах максимально наближених до реальності. Проте традиційні методи оцінки знань, такі як письмове тестування, не можуть забезпечити повну картину рівня практичних навичок курсантів. У зв'язку з цим виникає потреба у використанні більш ефективних методів оцінки, які дозволяють виміряти рівень досягнення певних компетенцій та практичних навичок. Тренажери та системи оцінювання, реалізовані на їх базі, можуть надати робочий інструмент для вимірювання рівня досягнення певних компетенцій та практичних навичок. Однак процес отримання оцінок знань і навичок на тренажері не такий простий, як способи оцінки в традиційному навчанні. Інструктори, які проводять оцінку практичних навичок у учнів, стикаються з обмеженнями в способах отримання інформації про дії учнів, а також з необхідністю одночасного контролю кількох учнів або великої кількості параметрів діяльності, що відстежуються. Крім того, критерії оцінки, визначені у стандарті «Standards of Training, Certification & Watch keeping», не забезпечують чіткої методології оцінювання. Це призводить до того, що оцінки навчання на тренажері змінюються залежно від інструктора, а також бали навчання на тренажері учнів є

¹ канд. техн. наук, доцент, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0001-5810-2462, iramsu2021@ukr.net

² канд. екон. наук, доцент, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0001-7659-347X, olevchenko76@gmail.com

необ'єктивними результатами. У дослідженні проведено огляд наявних підходів до оцінки ефективності навчання на морському симуляторі. Аналізуються результати академічних досліджень у сфері оцінки навчання на морському симуляторі. Виявлено різні методи оцінювання, проте жоден із них не призначено як стандартну систему оцінювання для всіх морських симуляторів. Для забезпечення об'єктивної оцінки навчання на морському симуляторі необхідно розробити і впровадити об'єктивну систему оцінки, яка буде застосовуватися до всіх курсів навчання на морському симуляторі. Це дасть змогу забезпечити стандартизовану оцінку всіх моряків у рамках Стандартів навчання, сертифікації та несення вахти.

Ключові слова: тренажерна підготовка, оцінка, прийняття рішень, морська справа, метод оцінки, програмне забезпечення, управління судном, безпека, екіпаж судна, безпека судноводіння, безпека на морі, навігація, навігаційна безпека.

I. Hannoshina, O. Levchenko. Assessment methods for the training effectiveness during the navigators' simulator training. *Simulation training is an effective method of practically oriented learning that allows cadets of maritime educational institutions to acquire practical skills in conditions as close to reality as possible. However, traditional methods of knowledge assessment, such as written tests, cannot provide a complete image of the cadets' practical skills. In this context, there is a need to use more effective assessment methods that allow to measure the level of certain competences and practical skills. Simulators and the assessment systems implemented on their basis can provide a working tool for measuring the level of certain competencies and practical skills. However, the process of obtaining evaluations of knowledge and skills on a simulator is not as direct as that of traditional training. Instructors who assess students' practical skills face limitations in the ways they can obtain information about students' actions, as well as the need to monitor several students simultaneously or a large number of performance parameters to be monitored. In addition, the assessment criteria defined in the Standards of Training, Certification & Watch keeping standard do not provide a clear assessment methodology. This results in simulator training scores varying from instructor to instructor, and simulator training scores for students are subjective results. The study reviews existing approaches to assessing the effectiveness of maritime simulator training. It analyses the results of academic research in the field of maritime simulator training evaluation. Various evaluation methods have been identified, but none of them is intended as a standard evaluation system for all maritime simulators. To ensure objective evaluation of maritime simulator training, it is necessary to develop and implement an objective evaluation system that will be applied to all maritime simulator training courses. This will ensure a standardized assessment of all seafarers within the framework of the Standards for Training, Certification and Watch-keeping.*

Keywords: simulator training, assessment, decision-making, maritime affairs, assessment method, software, ship management, safety, ship crew, navigation safety, safety at sea, navigation, navigational safety.

Постановка проблеми. Оцінювання є важливим аспектом навчання, що дає змогу підтвердити компетентність курсантів. Методи оцінювання можуть варіюватися залежно від різних галузей, включно з когнітивною (знання, які повинен мати той, кого навчають), психомоторною (навички, які повинен вміти виконувати курсант) та афективною (ставлення або емоційні реакції курсанта).

Тренажерна підготовка використовується в різних галузях – медицина, авіація, судноплавство, дорожні транспортні засоби тощо. Кожна галузь має свої власні критерії та методи оцінки під час проведення тренувань на тренажерах. У системі оцінювання основною метою є збір точної та повної інформації про курсанта, на базі якої можна оцінити його здатність виконувати певні завдання або поводитися відповідно до певних вимог у конкретній ролі [1, 2].

Таким чином, оцінювання є важливим інструментом для забезпечення того, що курсанти мають необхідні знання, навички та ставлення для ефективного виконання своїх майбутніх

обов'язків. Розроблення ефективних методів оцінювання має вирішальне значення для забезпечення якості навчання та підвищення безпеки й ефективності в різних галузях.

Тренування на морських тренажерах мають низку критеріїв оцінки, що відповідають різним об'єктивним завданням. Однак, у зв'язку з відсутністю стандартизованого методу оцінки, неможливо отримати об'єктивні результати оцінок таких тренувань. Крім того, більшість тренувань проводяться одночасно для групи курсантів, що вимагає від інструктора оцінювати дії кожного індивідуально, незважаючи на те, що курсанти працюють у групах і виконують свої завдання працюючи в інформаційному середовищі. Це ускладнює об'єктивність і всебічність оцінки кожного курсанта.

Існуючі курси підготовки та сертифікації, засновані на судових тренажерах, що оцінюють ефективність курсантів, покладаються на суб'єктивну оцінку інструктора. Однак компетентність, знання, розуміння і майстерність, а також методи демонстрації компетентності та критерії оцінювання компетентності для курсів палубних і машинних фахівців суворо визначені в стандарті «Standards of Training, Certification & Watch keeping».

Зокрема, Розділ А-1/12 стандарту є обов'язковим і містить вимоги, що регулюють використання тренажерів. Розділ В-1/12 є керівним розділом, який містить настанови щодо використання тренажерів. Типи та критерії морських тренажерів описані в кодексі. Хоча компетентність, знання, розуміння і майстерність, методи демонстрації компетентності, критерії для оцінювання компетентності для курсів палубних і машинних фахівців визначається стандартом, але єдиний стандартний метод оцінювання для навчання на тренажері не визначено в кодексі. Ось чому метод оцінки навчання на тренажері змінюється залежно від інструктора і оцінки не можуть бути об'єктивними. Оцінка відіграє важливу роль у розвитку процесу навчання, а оцінка має вирішальне значення для підтвердження компетентності стажиста.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Система навчання та оцінювання на основі компетенцій. Підкомітет Міжнародної морської організації зі стандартів навчання і несення вахти опублікував документ під назвою «Validation of IMO Model Training Courses», який містить розділ про оцінку та аналіз для навчання на морських тренажерах. У цьому документі відображена система навчання та оцінювання на основі компетенцій, оскільки компетентнісний підхід безпосередньо реалізується через професійні та трудові функції, а основою дизайну навчання є вимірні стандарти ефективності. Оцінювання є невід'ємною частиною будь-якої системи підготовки. Компетентнісний підхід має у своєму складі оцінку як обов'язкову складову і відводить їй важливе місце. Підкомітет Міжнародної морської організації зі стандартів навчання і несення вахти стверджує, що форма стандартів на основі компетенцій покладена в основу оцінювання. Перевірюваність і ефективність навчання за компетентнісного підходу [2] під час тренажерної підготовки є дуже важливою і має бути однозначно виміряна з використанням чітко описаних критеріїв оцінки та процедур їх отримання. Критерії оцінювання мають бути релевантними, дійсними, надійними, послідовними та реалістичними [3].

Метою дослідження є оцінка ефективності навчання судоводіїв на тренажерах шляхом розробки більш об'єктивних і надійних методів.

Виклад основного матеріалу. Дослідження з оцінювання різних морських тренажерів. Існує низка досліджень, присвячених методам оцінки навчання на морських тренажерах. Одним із таких методів є структурований підхід, за якого інструктор використовує контрольний список або шкалу оцінок для оцінювання навичок курсанта [4]. Інший метод оцінювання навчання на тренажері полягає у вимірюванні ефективності керування судном за допомогою оціночних показників, отриманих із результатів аналізу руху судна.

У рамках цієї системи стажисти виконують швартування, використовуючи стандартні чинники, наприклад, кут підходу до причалу, швидкість і бічну відстань на фронті причалу, які визначаються для кожного типу судна і причалу. Інструктори оцінюють ефективність управління судном кожного стажиста, порівнюючи середнє значення і стандартне відхилення кожного з показників з даними, отриманими інструктором: швидкість, відстань до причалу, кут підходу і бічну відстань до нормальної лінії причалу в призначених точках на запланованому маршруті.

Після завершення кожного сеансу тренажерного маневрування автоматично з використанням спеціального програмного забезпечення виконується аналіз управління судном. Це дає змогу кількісно оцінити ефективність керування судном судоводія (курсанта) протягом короткого періоду часу, а інструктор може надати необхідні рекомендації з управління судном [5].

Committee on Ship-Bridge Simulation Training Marine Board Commission on Engineering and Technical Systems National Research Council states in *Simulated Voyages* заявляє, що основною методологією оцінювання в практичній підготовці є спостереження і зворотний зв'язок від інструкторів до курсантів.

У більшості випадків інструктор несе подвійну відповідальність: він одночасно вводить інформацію, проводячи заняття і переговори, і оцінює результати навчання. Зазвичай ці дві ролі виконуються одним і тим самим інструктором [6]. Однак існує альтернативний метод оцінювання, який передбачає призначення іншим учасникам навчання ролі спостереження та оцінювання. Цей підхід, відомий як колегіальне оцінювання, дає змогу звільнити інструктора від подвійної ролі та підвищити якість оцінювання через колективне оцінювання [6].

Компанія Kongsberg, виробник симулятора містка Polaris, розробила комп'ютерну систему оцінювання, що дає змогу інструкторові проводити структуровану та об'єктивну оцінку успішності курсанта. Після завершення вправи система надає звіт про успішність курсанта. Система перебуває під повним контролем інструктора, який може легко визначити відповідні критерії оцінки. Ці критерії постійно контролюються системою протягом усієї вправи, і якщо будь-яка змінна виходить за межі встановлених обмежень, виставляються штрафні бали, які накопичуються. У результаті система розраховує нормалізовану оцінку за вправу на основі накопиченої суми штрафних балів.

Розроблення моделі оцінювання та порівняння ефективності роботи моряків, які використовують симулятор суднового містка, є актуальним і значущим завданням у галузі морської освіти. Одним із цікавих досліджень у цій галузі є робота, присвячена застосуванню аналітичного ієрархічного процесу (АІП) для розроблення системи оцінювання, що містить аналіз робочих завдань і реалізацію сценаріїв моделювання.

Метою цього дослідження є розробка потужного та гнучкого інструменту оцінювання процесу, що дасть змогу інструкторам тренажерів встановлювати пріоритети та проводити надійну оцінку на основі діяльності, враховуючи як якісні, так і кількісні аспекти вимірювання діяльності. Для досягнення цієї мети дослідники використовують АІП-метод, що дозволяє структурувати складні проблеми та приймати рішення на основі множини критеріїв.

Розроблена система оцінки охоплює кілька етапів, починаючи з аналізу робочих завдань і визначення критеріїв оцінки, і закінчуючи реалізацією сценаріїв моделювання та оцінкою діяльності моряків. Основна ідея полягає в тому, щоб створити інструмент, який дасть змогу інструкторам оцінювати ефективність роботи моряків у різних сценаріях – навігація, управління судном і дії в надзвичайних ситуаціях [7].

Дослідження [8], присвячене оцінці навичок швартування у курсантів з використанням симулятора маневрування судна, запропонувало новий метод оцінки ефективності навчання судноводіїв. Автори розробили методіку, засновану на аналізі виконання маневру повороту перед швартуванням, яка забезпечує єдиний числовий показник для оцінки результатів навчальної вправи навігації. Цей підхід дає змогу спростити процес оцінювання і зробити його більш зрозумілим.

Під час експериментів, проведених із використанням симулятора маневрування судна, автори підтвердили ефективність і корисність запропонованого методу для підвищення якості навчання майбутнього судноводія. Методіка заснована на визначенні дискретної відстані, яку розраховують на основі аналізу руху судна після навчання на симуляторі. Цей показник легко виміряти за вихідним сигналом сліду, доступним одразу після завершення навчальної вправи, що робить його ефективним інструментом для оцінювання стажистів.

Таким чином, запропонований метод оцінювання може бути корисним для підвищення ефективності навчання на тренажері маневрування судна і вдосконалення навичок швартування у курсантів [8].

Розроблення системи оцінювання тренажера морського машинного відділення на основі нечіткої комплексної оцінки являє собою інноваційний підхід до об'єктивного оцінювання компетенцій курсантів. У рамках цього дослідження було створено нечітку матрицю суджень, побудовану з використанням методу нечіткого комплексного оцінювання, що слугує об'єктивним доказом оцінювання [9].

Під час оцінювання компетенцій кандидатів особливу увагу було приділено трьом ключовим елементам: об'єктивності, надійності та валідності. Використання тренажерів у процесі

оцінювання може бути схильне до впливу особистісних чинників інструктора, що може поставити під загрозу об'єктивність оцінювання. Щоб уникнути цієї проблеми, було запроваджено систему SEA (оцінка вправ на симуляторі), що дала змогу автоматизувати процес оцінювання діяльності за чітко визначеними «жорсткими параметрами», які були встановлені інструктором. Водночас «м'які навички» оцінюються суб'єктивно [10].

У результаті розроблена система оцінювання на тренажері морського машинного відділення на основі нечіткої комплексної оцінки надає більш неупереджений і точний підхід до оцінки навичок учнів, зводячи до мінімуму вплив суб'єктивних суджень інструктора.

Компанія Kongsberg представила Neptune Instructor System в інформаційному бюлетені морського тренажера. Завдяки цій системі інструктор отримує доступ до інструменту, що дає змогу оцінювати курсантів на всіх етапах навчання. Ця система оцінювання дає змогу інструкторові моніторити й використовувати для оцінки сигнали тривоги та широкий спектр доступних змінних у моделях різних ситуацій. Інструктор може нараховувати бали або штрафні бали залежно від успіхів курсанта. Крім того, інструктор має можливість генерувати звіти про оцінювання для кожного окремого курсанта, що відображають його успіхи, включно з результатами складених або незданих іспитів.

Ліндмарк розділив оцінювання компетентності на дві складові: автоматизоване оцінювання та експертне оцінювання, що проводиться автором, у своїй магістерській дисертації. Він підкреслив, що було б доцільно мінімізувати вплив суб'єктивної думки інструктора для забезпечення об'єктивності оцінки. Він запропонував розробити комп'ютерну систему для проведення успішної та об'єктивної оцінки. Він стверджував, що студенти задовольнили вимоги, встановлені «Standards of Training, Certification & Watch keeping», а також пройшли письмовий іспит і практичні вправи [11].

Підкомітет Міжнародної морської організації з розроблення стандартів навчання і несення вахти може запровадити уніфіковані суб'єктивні та стандартизовані методи оцінки для всіх морських тренажерів. У результаті всі моряки, які пройшли навчання на тренажерах, можуть бути оцінені за єдиними й уніфікованими критеріями. Як рішення для об'єктивної оцінки можна розглянути метод простого адитивного зважування (SAW) для оцінки ефективності тренажерного навчання.

Для апробації цього методу необхідно підготувати сценарій тренажерної підготовки і застосувати його до певної групи курсантів. Після завершення цього етапу слід проаналізувати критерії оцінювання та дані, отримані з комп'ютерних тренажерів, щоб визначити придатність цього методу для оцінювання тренажерного навчання.

Просте адитивне зважування (SAW), яке також відоме як методи зваженої лінійної комбінації або підрахунку балів, є простим і найбільш часто використовуваним методом прийняття рішень за кількома атрибутами. Метод заснований на зваженому середньому значенні. Оцінку розраховують для кожної альтернативи шляхом множення масштабованого значення, присвоєного альтернативі цього атрибута, на ваги відносної важливості, безпосередньо призначені особою, яка приймає рішення, з подальшим підсумовуванням добутків за всіма критеріями [12].

Іншим варіантом об'єктивної оцінки навчання на тренажері є розробка автоматичної системи оцінки, що надається через програмне забезпечення. Для досягнення цієї оцінки будуть вказані заздалегідь визначені стандартні критерії, параметри та обмеження для кожного навчання на тренажері. І буде призначена оцінка для кожного критерію, параметра та обмеження. Програмне забезпечення оцінюватиме вихідні дані результатів моделювання відповідно до параметрів і записів. Таким чином, курсантів можна оцінити об'єктивно з тими самими критеріями, параметрами й обмеженнями для кожного завдання. Нові розробки вказують на можливість реалізації автоматичних методів оцінювання для отримання об'єктивної оцінки курсантів у різних умовах під час підготовки на морському тренажері.

Висновки

Навчання на морському тренажері є невід'ємною частиною морської підготовки. Велика кількість моряків проходить навчання за допомогою різноманітних тренажерів і симуляторів, включно із симуляторами двигуна, містка і радара. Оцінка ефективності навчання курсантів з урахуванням компетентнісного підходу, є одним з найбільш важливих етапів у процесі їхньої

підготовки. Саме тому об'єктивна оцінка навчання під час тренажерної підготовки має вирішальне значення для об'єктивної оцінки практичної діяльності стажистів.

Критерії оцінювання визначено в документі «Standards of Training, Certification and Watchkeeping», проте метод оцінювання поки що однозначно не визначено. У результаті оцінки навчання на тренажерах можуть варіюватися залежно від інструктора, а бали навчання курсантів часто мають суб'єктивний характер.

У дослідженні проведено огляд наявних підходів до оцінки ефективності навчання на морському симуляторі. Аналізуються результати академічних досліджень у сфері оцінки навчання на морському симуляторі. Виявлено різні методи оцінювання, проте жоден із них не призначено як стандартну систему оцінювання для всіх морських симуляторів.

Для забезпечення об'єктивної оцінки навчання на морському симуляторі необхідно розробити і впровадити об'єктивну систему оцінки, яка буде застосовуватися до всіх курсів навчання на морському симуляторі. Це дасть змогу забезпечити стандартизовану оцінку всіх моряків у рамках Стандартів навчання, сертифікації та несення вахти.

Перелік використаних джерел:

1. Kuzu A. C. A review for evaluation of marine simulator training performance. *Proceedings of the Second Global Conference on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation*, Bodrum, Muğla, Turkey, 24-27 October 2016. Pp. 519.
2. Sullivan R., McIntosh N. The competency-based approach to training. *Medical Journal of Indonesia*. 1996. Vol. 5(2). Pp. 95-98. DOI: <https://doi.org/10.13181/mji.v5i2.853>.
3. Validation of Model Training Courses. IMO Sub-Committee on Standards of Training and Watchkeeping, 2011. Chapter 8. Pp. 99.
4. Karlsson T. The importance of structured briefings & debriefings for objective evaluation of ARPA simulator training : Master of Science Thesis in Nordic Master. Gothenburg, Sweden : Chalmers University of Technology, 2011. 58 p.
5. Manning D. J. Simulator Training. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering* / ed. by J. Carlton, P. Jukes, Yoo-Sang Choo. 2017. Pp. 1-9.
6. Page R. L. Brief history of flight simulation. *SimTecT 2000: Proceedings of the International Conference*, Sydney, Australia, 28 February-2 March 2000. Pp. 11-17.
7. Methodology for Evaluating a Simulator's Capability to Support Assessment of Mariner Proficiency / M. Raby et al. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, San Diego, CA, 30 July – 4 August 2000. Vol. 44. No. 20. Pp. 324-327. DOI: <https://doi.org/10.1177/154193120004402027>.
8. Ahmed Y. A., Hasegawa K. Implementation of automatic ship berthing using artificial neural network for free running experiment. *IFAC Proceedings Volumes*. 2013. Vol. 46(33). Pp. 25-30. DOI: <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00036>.
9. Cao H., Ma Y.-X., Jia B.-Z. An intelligent evaluation system of marine engine room simulator based on fuzzy comprehensive evaluation. *Journal of Dalian Maritime University*. 2015. Vol. 1. Pp. 104-108.
10. Tawfik A.K., Ibrahim A.M. Educational Technology In Met Simulator Based Training And Information Technology In Met. *International Journal of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 4. Pp. 1-10.
11. Lindmark O. A teaching incentive The Manila amendment and the learning outcome in tanker education : Master of Science Thesis in Nordic Master. Gothenburg, Sweden : Chalmers University of Technology, 2012. 64 p.
12. Afshari A., Mojahed M., Yusuff R. M. Simple Additive Weighting approach to Personnel Selection problem. *International Journal of Innovation, Management and Technology*. 2010. Vol. 1. No. 5. Pp. 511-515. DOI: <https://doi.org/10.7763/IJIMT.2010.V1.89>.

References:

1. A.C. Kuzu, «A review for evaluation of marine simulator training performance», in Proc. 2nd Global Conf. on Innovation in Marine Technology and the Future of Maritime Transportation, Bodrum, Muğla, Turkey, 2016, pp. 519.
2. R. Sullivan, and N. McIntosh, «The competency-based approach to training», *Medical Journal of*

- Indonesia*, vol. 5(2), pp. 95-98, 1996. doi: 10.13181/mji.v5i2.853.
3. Validation of Model Training Courses, IMO Sub-Committee on Standards of Training and Watch-keeping, chapter 8, pp. 99, 2011.
 4. T. Karlsson, «The importance of structured briefings & debriefings for objective evaluation of ARPA simulator training», M.S. thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2011.
 5. D.J. Manning, «Simulator Training», in *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, J. Carlton, P. Jukes, Yoo-Sang Choo, Eds., 2017, pp. 1-9.
 6. R.L. Page, «Brief history of flight simulation», in Proc. Int. Conf. «SimTecT 2000», Sydney, Australia, 2000, pp. 11-17.
 7. M. Raby, A.M. Forsythe, M.W. Smith, and M.C. McCallum, «Methodology for Evaluating a Simulator's Capability to Support Assessment of Mariner Proficiency», in Proc. Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, San Diego, CA, USA, 2000, vol. 44, no. 20, pp. 324-327. doi: 10.1177/154193120004402027.
 8. Y.A. Ahmed, and K. Hasegawa, «Implementation of automatic ship berthing using artificial neural network for free running experiment», *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 46(33), pp. 25-30, 2013. doi: 10.3182/20130918-4-JP-3022.00036.
 9. H. Cao, Y.-X. Ma, and B.-Z. Jia, «An intelligent evaluation system of marine engine room simulator based on fuzzy comprehensive evaluation», *Journal of Dalian Maritime University*, vol. 1, pp. 104-108, 2015.
 10. A.K. Tawfik, and A.M. Ibrahim, «Educational Technology In Met Simulator Based Training And Information Technology In Met», *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 4, pp. 1-10, 2015.
 11. O. Lindmark, «A teaching incentive The Manila amendment and the learning outcome in tanker education», M.S. thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2012.
 12. A. Afshari, M. Mojahed, and R.M. Yusuff, «Simple Additive Weighting approach to Personnel Selection problem», *International Journal of Innovation, Management and Technology*, vol. 1, no. 5, pp. 511-515, 2010. doi: 10.7763/IJIMT.2010.V1.89.

Стаття надійшла 25.10.2024

Стаття прийнята 27.11.2024

УДК 004.8:629.62

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321392

© Фуклєв О.І.¹, Вечурко О.М.²

ЗНАННЯ-ОРІЄТОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПІД ЧАС РУХУ СУДЕН У СТИСНЕНИХ ВОДАХ

У статті визначено, що найбільш поширеною причиною аварійності, до 80% випадків, є проблема «людського елементу», що вимагає побудови систем підтримки прийняття рішення судноводіння, які здатні з використанням знання-орієнтованих технологій, що відповідають порядку мислення людини, надавати судноводієві прогнозовані дані. Нейромережеві алгоритми дозволяють враховувати зазначені особливості, будучи спеціально орієнтованими для рішення завдань прогнозування. Нейронні мережі виступають в якості універсального апроксиматора функцій декількох змінних, що робить їх перспективним інструментом для рішення завдань маневрування суден у стиснутих водах. Нейронна мережа, що моделює динаміку судна,

¹ здобувач ступеня PhD, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-9674-3743

² ст. викладач, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0009-0000-9005-3365

навчається на основі зразків, отриманих з використанням рівнянь руху судна (кінематичних або диференціальних динамічних). Визначено, що нейромережеві алгоритми дозволяють враховувати зазначені особливості, будучи спеціально орієнтованими для рішення подібного роду завдань. Зчислення шляху судна може виконуватися з використанням різного набору навігаційних датчиків. Вихідний сигнал системи зчислення може представляти собою координати судна, їх збільшення, що становлять відносну швидкість, та інші величини. Звичайно, самим бажаним варіантом буде випадок, коли система зчислення визначає координати судна або хоча б їх приріст. Перевага використання у якості виходу мережі саме координат має два аспекти. Вибір моделі нейронної мережі передуює наступному етапу, на якому виконується її навчання. При цьому виникає проблема розробки методу отримання необхідної кількості та якості зразків. Важливу роль відіграє також вибір того або іншого методу навчання нейронної мережі. Вибір моделі нейронної мережі передуює наступному етапу, на якому виконується її навчання. При цьому виникає проблема розробки методу отримання необхідної кількості та якості зразків. Важливу роль відіграє також вибір того або іншого методу навчання нейронної мережі.

Ключові слова: судноводіння, безпека, безпека судноплавства, безпека на морі, водний морський транспорт, знання-орієнтована система, система підтримки прийняття рішення, навігаційна обстановка, навігаційна ситуація, навігація, нейронна мережа, судно.

O. Fukliev, O. Vechurko. Knowledge-oriented decision-making technologies during vessel operations in pressured waters. The article determines that the most common cause of accidents, up to 80% of cases, is the problem of the «human element», which requires the construction of navigation decision support systems that are capable of using knowledge-based technologies that correspond to the order of human thinking, to provide the navigator with predicted data. Neural network algorithms allow taking into account these features, being specially oriented for solving forecasting problems. Neural networks act as a universal approximator of functions of several variables, which makes them a promising tool for solving ship maneuvering problems in compressed waters. A neural network that models ship dynamics is trained on the basis of samples obtained using ship motion equations (kinematic or differential dynamic). It is determined that neural network algorithms allow taking into account these features, being specially oriented for solving such problems. Calculation of the ship's path can be performed using a different set of navigation sensors. The output signal of the calculation system can be the coordinates of the vessel, their increments, which constitute the relative speed and other quantities. Of course, the most desirable option would be the case when the calculation system determines the coordinates of the vessel or at least their increment. The advantage of using coordinates as the output of the network has two aspects. The choice of a neural network model precedes the next stage, at which its training is performed. In this case, the problem of developing a method for obtaining the required number and quality of samples arises. The choice of a particular method for training the neural network also plays an important role. The choice of a neural network model precedes the next stage, at which its training is performed. In this case, the problem of developing a method for obtaining the required number and quality of samples arises. The choice of a particular method for training the neural network also plays an important role.

Keywords: navigation, safety, shipping safety, safety at sea, waterborne maritime transport, knowledge-based system, decision support system, navigational environment, navigation situation, neural network, ship.

Постановка проблеми. Необхідність вирішення проблем безпеки мореплавання визначено значним ступенем аварійності світового флоту. При цьому найбільш поширеною причиною аварійності, до 80% випадків, є проблема «людського елемента» [1]. З метою удосконалення процесів забезпечення безпеки плавання, здійснюється формування систем підтримки прийняття рішення судноводіння, які здатні з використанням знання-орієнтованих технологій, що

відповідають порядку мислення людини, надавати судноводієві прогнозовані дані. Підвищення ефективності систем управління рухом судна, адаптивних систем, що самоналаштовуються під змінні умови плавання, передбачає логічне скорочення аварійних ризиків у судноводінні [1].

Маневрування суден у стиснутих водах є одним з найбільш складних видів маневрів, оскільки, на відміну від відкритої акваторії, на судно діє значно більша кількість факторів, що вимагає від судноводія їх врахування. З метою вдосконалення процесів забезпечення безпеки руху відбувається передача ряду функцій судноводія автоматичним системам судноводіння. Підвищення ефективності систем управління рухом судна, знання-орієнтованих систем при маневруванні у стиснутих водах передбачає логічне скорочення аварійних випадків у судноводінні.

Для цього повинні застосовуватися методи та алгоритми сучасної теорії управління із застосуванням ідентифікації моделей та адаптації процесів управління суднами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток штучного інтелекту (ШІ) сприяє просуванню технологій обробки даних та інтелектуального аналізу даних. Штучний інтелект має унікальні переваги у створенні прогнозів з використанням великих масивів однотипних даних. У цій галузі прогнозування руху суден застосовуються різні методи машинного навчання і глибокого навчання, зокрема фільтрація Калмана, регресія опорних векторів і мережі зворотного розповсюдження (ЗР), регресію гауссових процесів та випадкові ліси, а також згорткові нейронні мережі, рекурентні нейронні мережі, мережі з довгою короткочасною пам'яттю, мережі із закритими рекурентними елементами й мережі Sequence-to-Sequence.

Ряд авторів [2] використовували експериментальні дані фактичного руху судна на річковому фарватері для побудови та навчання нейронних мереж з різними архітектурами та активаціями. Це дослідження демонструє, що навчання нейронних мереж (НМ) може здійснюватися з використанням координат руху судна і при цьому давати точні результати для майбутніх позицій. Чжоу та ін. [3] запропонували метод прогнозування навігаційної траєкторії суден, який поєднує дані з автоматизованої системи ідентифікації судна з нейронною мережею зі зворотним поширенням. Для того, щоб передбачити майбутню траєкторію руху судна, нейронна мережа зворотного поширення навчається, використовуючи характерні значення навігаційної поведінки судна в три послідовні моменти часу, як вхідні дані, а характерні значення навігаційної поведінки судна в четвертий момент часу, як вихідні дані. Дослідники у роботі [4] використовували штучну нейронну мережу (ШНМ) для розширення прогностичних можливостей інформаційних систем моніторингу руху суден. Модель мала можливість прогнозувати активність судна в режимі реального часу без обчислювальних накладних витрат. Дослідники навчили і протестували свій ШНМ, використовуючи дані критерію Акаїки АІС з судна в регіоні Егейського моря в Греції. У схожому дослідженні Simsir та Ertugrul [5] розробили метод навігації та раннього попередження, який передбачав прогнозування положення судна за три хвилини, особливо під час маневрів. Цей метод передбачає майбутні координати судна, що рухається вузькими водними шляхами, за допомогою ШНМ. Деякі експерименти були проведені в Стамбульській протоці. Результати даних досліджень свідчать, що запропонований метод прогнозування з використанням штучної нейронної мережі може виявляти порушення розділових ліній за три хвилини до їх початку. Як результат, він може бути використаний як система раннього попередження та наведення для попередження членів екіпажу суден про потенційно небезпечні обставини ще до їх виникнення.

На додаток до вищезгаданих методів, Сюй та ін. [6] досліджували модель, засновану на нейронній мережі ЗР. Курс та швидкість судна, а також різниця в широті та довготі, використовувалися моделлю в якості вхідних та вихідних даних відповідно. Мережа була навчена визначити закон руху судна в момент часу n , використовуючи останні N навчальних вибірок з тим самим кроком, а потім прогнозувала положення судна у наступний момент часу. Чен та ін. [7] представили структуру для реконструкції траєкторії руху ансамблю кораблів, яка поєднувала модуль прогнозування з підходом до перевірки якості даних. Запропонована методологія включає згладжування даних, розділення траєкторій і нормалізацію необроблених даних АІС. Після цього фреймворк використовував ШНМ для оцінки траєкторії судна.

Моделі прогнозування на основі ШНМ мають хорошу точність прогнозування, але їм бракує здатності до узагальнення. Деякі вчені також досліджували прогнозування траєкторії суден за допомогою вдосконалених моделей нейронних мереж. Борковські [8] розробив алгоритм прогнозування траєкторії судна, який використовує процес злиття навігаційних даних. У методиці

використовується узагальнена регресійна нейронна мережа, яка може бути використана для прогнозування курсу як одного судна, так і іншого.

Таким чином, питання побудови знання-орієнтованих моделей та методів для системи підтримки прийняття рішення судноводінням є актуальним науковим завданням, що вимагає узагальнення методів та обґрунтування вибору раціональних рішень.

Метою статті є дослідження знання-орієнтованих технологій підтримки прийняття рішення судноводіння у стиснутих акваторіях.

Виклад основного матеріалу. Знання-орієнтовані технології широко використовуються для рішення завдань ідентифікації та управління динамічними об'єктами, в тому числі й суднами.

Машинне навчання дозволяє системам ШН вчитися на основі даних. Воно ефективне для нелінійних систем і не залежить від математичної моделі системи. Аналіз застосування ШНМ та НМ у навігаційній системі сучасних суден наведено на рис. 1.

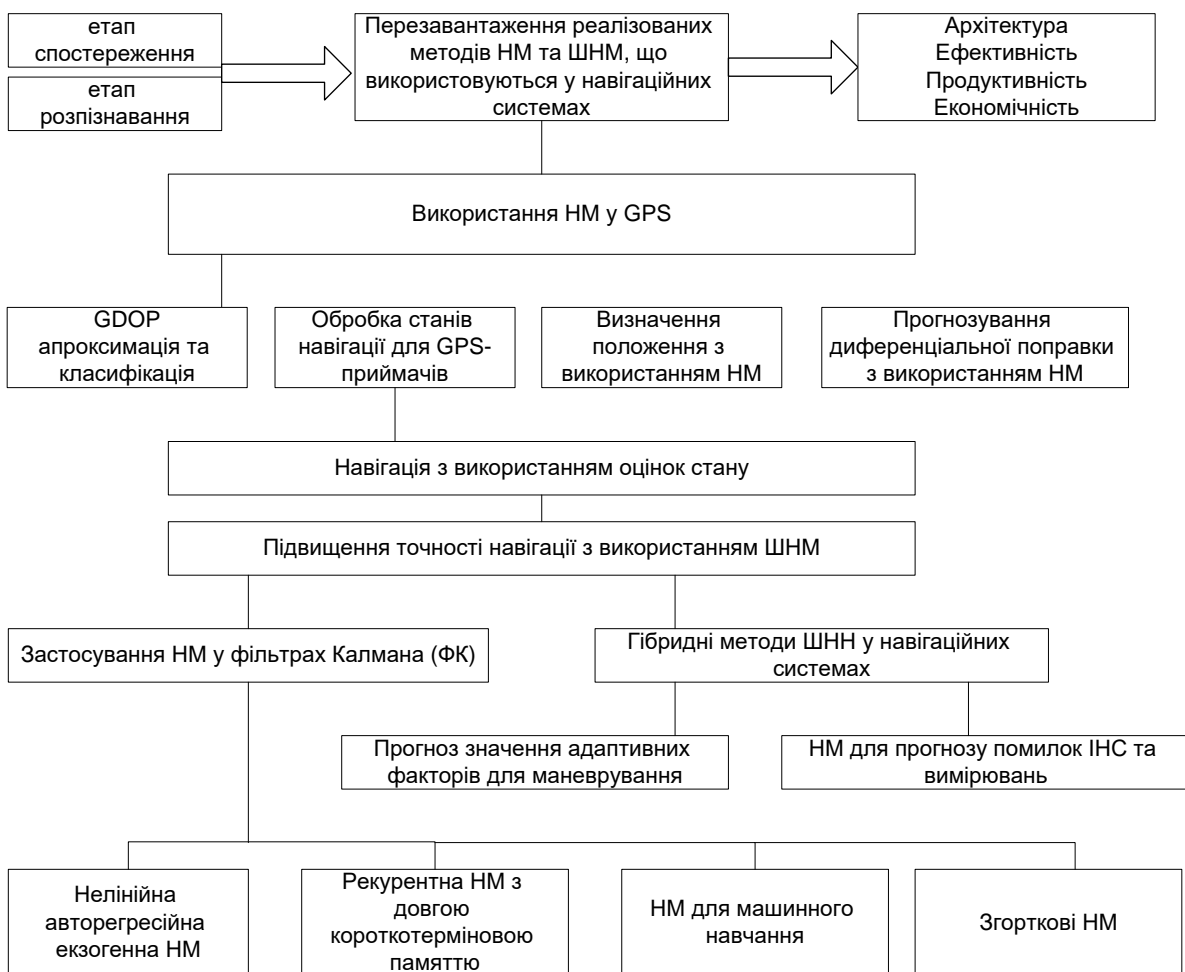


Рис. 1 – Застосування ШНМ та НМ у суднових навігаційних системах

Наведено апроксимацію геометричного розмивання точності (GDOP) [9, 10], обробку GPS-навігації [11, 12], визначення місцеположення з використанням нейронних мереж [9] та прогнозування диференціальних повідомлень про поправки DGPS [13]. Особливістю застосування знання-орієнтованих систем полягає у тому, що підходи, засновані на ШН, можуть не вимагати чисельних методів визначення динаміки системи та спостережень, що є ключовою відмінністю між ними та іншими формами методів оцінювання.

На рис. 2 наведено принцип навчання ШНМ для апроксимації невідомої моделі системи.

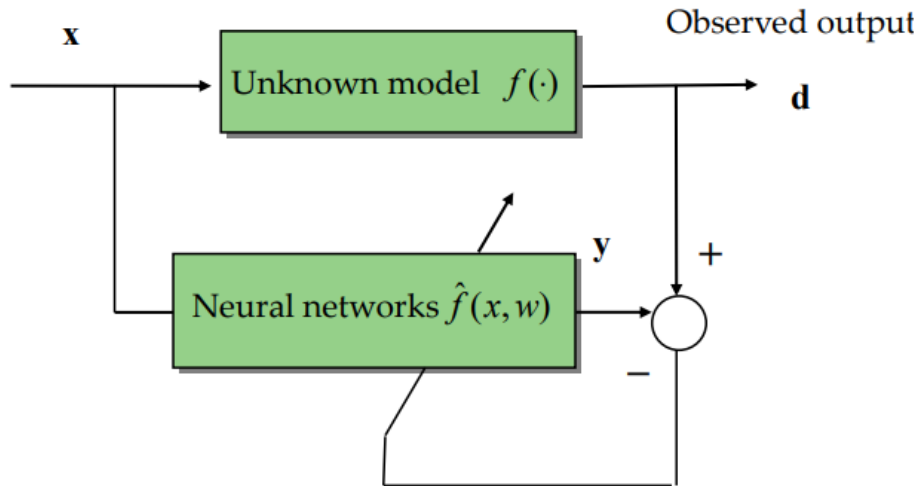


Рис. 2 – Принцип навчання ШНМ

Найпопулярніша техніка навчання багатошарової ШНМ є пряме поширення. На рис. 3 наведено НМ з прямим поширенням. Також існують НМ зі зворотним поширенням (НМЗП). З точки зору вхідного, прихованого та вихідного шарів разом узятих, вона є простою в реалізації та працює ефективно. НМЗП є найпоширенішою серед усіх нейронних мереж, хоча й визнано, що вона має певні обмеження, наприклад, повільне навчання.

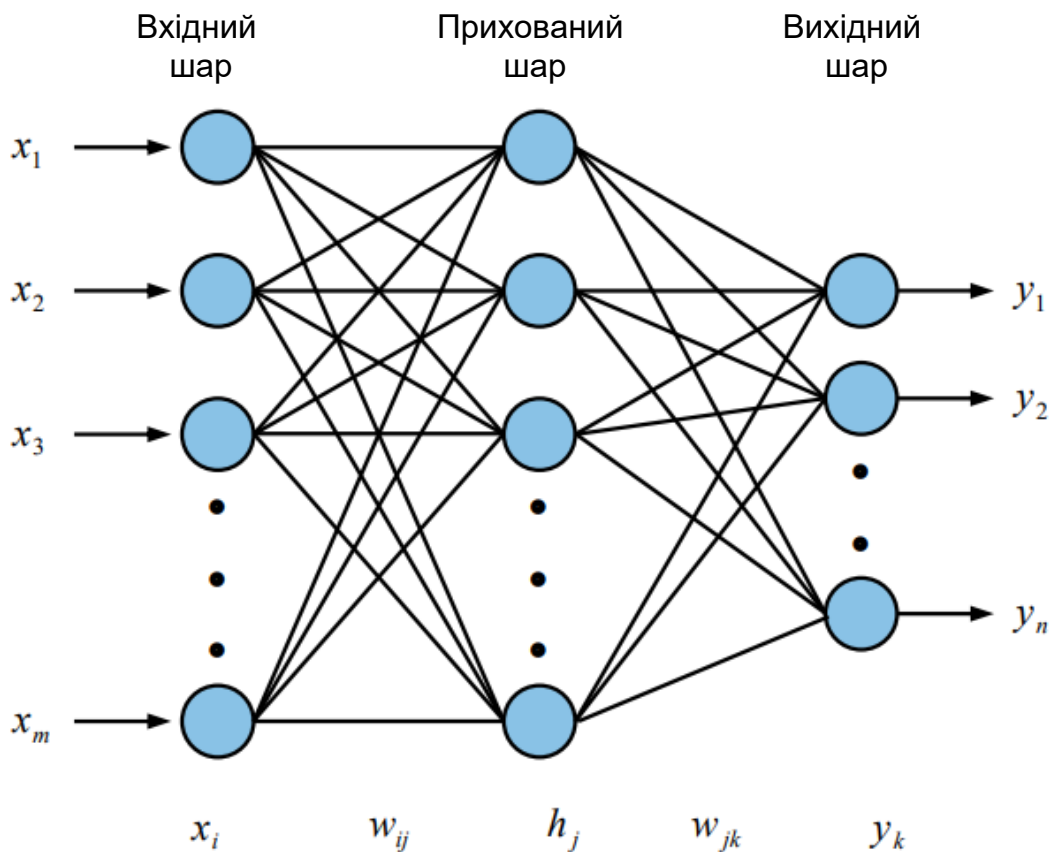


Рис. 3 – Багатошарова ШНМ з прямим поширенням

ШНМ може містити декілька шарів. У кожному шарі присутні вектор зсуву, вихідний вектор та вагова матриця. Багатошарова мережа має кілька шарів, кожен з яких виконує певну

функцію. Для мінімізації середньоквадратичної помилки алгоритм навчання впливає на параметри системи. В якості результатів роботи системи використовуються бажані результати.

Існують роботи, в яких двошарова нейронна мережа (прямого поширення) вирішує завдання ідентифікації параметрів моделі плоского руху судна. В якості параметрів виступають гідродинамічний коефіцієнт, а також коефіцієнти демпфірування. Вхідний вектор нейронної мережі формує кут перекладки керма й інші величини, що описують рух судна. Для отримання необхідної кількості зразків використовується імітаційне моделювання. Після ідентифікації параметрів нейронною мережею здійснюється порівняння роботи імітаційної моделі із заданими параметрами й ідентифікованими. В якості еталонних рухів вибираються циркуляції з повною й половинною (на «півборта») перекладкою керма. Результат – за період циркуляції відмінність траєкторій становить кілька метрів.

Нейромережеві алгоритми дозволяють враховувати зазначені особливості, будучи спеціально орієнтованими для рішення подібного роду завдань. Як відомо, нейронні мережі можуть виступати в якості універсального апроксиматора функцій декількох змінних, що робить їх достатньо перспективним інструментом для рішення завдань апроксимації траєкторії руху судна. Більше того, нейронна мережа, що моделює динаміку судна, навчається на основі зразків, отриманих з використанням рівнянь руху судна (кінематичних або диференціальних динамічних).

Зчислення шляху судна може виконуватися з використанням різного набору навігаційних датчиків. Вихідний сигнал системи зчислення може представляти собою координати судна, їх збільшення, що становлять відносну швидкість, та інші величини. Звичайно самим бажаним варіантом буде випадок, коли система зчислення визначає координати судна або хоча б їх приріст. Перевага використання у якості виходу мережі саме координат має два аспекти.

По-перше, зчислені координати є шуканими параметрами, і такий «координатний» варіант дозволяє не проводити додаткові процедури чисельного інтегрування, як це має місце при використанні в якості виходу мережі швидкості, а, тим більше, прискорення.

По-друге, координати можуть бути виміряні у судових умовах (на основі супутникових навігаційних систем) з високою точністю без використання спеціального обладнання, яке не є типовим для стандартного морського судна.

Вхідними сигналами системи нейрозчислення можуть бути або сили, що впливають на корпус судна по мірі його руху, або величини, значення яких використовуються при розрахунках зазначених сил. Останній варіант більш бажаний, оскільки є універсальним та не залежить від вибору того або іншого алгоритму розрахунків кожної сили.

У ряді випадків доцільним є попередня обробка сигналів нейронних мереж для підвищення якості їх навчання.

Визначивши зміст вхідного й вихідного вектора, можна переходити до вибору моделі нейронної мережі, що перетворить вхідний сигнал у вихідний. Слід визначити тип (загальну архітектуру) мережі, кількість шарів у ній, нейронів у кожному шарі, тип їх функції активації, а у випадку динамічної мережі ще й число одиничних затримок по входу й виходу.

Питання вибору й властивостей архітектури нейронних мереж для рішення різних завдань розглядаються в ряді робіт, в яких, як правило, приводяться описи нейромережевих моделей, що добре зарекомендували себе для рішення різного класу завдань (апроксимації функцій, розпізнавання образів, прогнозування часових рядів).

Вибір моделі нейронної мережі передувє наступному етапу, на якому виконується її навчання. При цьому виникає проблема розробки методу отримання необхідної кількості та якості зразків. Важливу роль відіграє також вибір того або іншого методу навчання нейронної мережі.

Після синтезу нейромережевої системи прогнозування руху судна та її навчання виконується перевірка її працездатності в таких навігаційних ситуаціях, які не брали участь у навчанні. Оскільки коефіцієнти деяких нейронних мереж визначаються фізичними характеристиками судна, то тестування таких мереж слід виконувати в ході експериментів на конкретному судні. Основне питання при цьому може бути сформульоване у такий спосіб: «Які навігаційні ситуації охоплює тестування; яка ймовірність, що мережа буде працювати в інших ситуаціях, не охоплених тестуванням?»

Нарешті, побудова повноцінної системи зчислення закінчується розробкою алгоритму, по якому може бути оцінена її точність в умовах поточних похибок вимірів і ідентифікації.

Також необхідно відмітити, що на даний час існує ряд зразків автоматизованих систем контролю мореплавності для прогнозування та оптимізації руху суден. Це система підтримки прийняття рішень «ОСТОРUS–DSS» для забезпечення безпечного плавання в несприятливих погодних умовах. Система дозволяє вибрати оптимальний маршрут, враховує очікувані погодні умови. При розрахунках враховуються багато факторів, які впливають на рух судна. Іноді ці фактори вимагають зниження швидкості судноводієм для забезпечення безпеки руху. Система має програмний модуль для навчання судноводіїв у роботі з нею. Модуль формує різні погодні умови, судноводій повинен знайти правильне рішення.

Інша система – інтегрована морська система підтримки IMDSS (Integration Decision Support System). Це пакет програм, який дозволяє капітану, вахтовому помічнику покращити планування рейсу та його виконання. Судноводій може швидко прийняти ефективні рішення у випадках, коли є необхідна гідрометеорологічна інформація. Ця система перевершує багато інших досконалістю процедур для оцінки мореплавства судна, покращенням його поведінки під час хвилювання. Суднова система VOSS (Vessel Optimization and Safety System) [14] призначена для запобігання небезпечним ситуаціям у складних погодних умовах. Досвід засвідчив, що використання цієї системи скорочує час затримки шляху до 80% через погодні умови, завдяки їй зменшується кількість пошкоджень вантажу та корпусу.

Висновки

Таким чином, проблема управління рухом судна за траєкторією у стиснутих водах та на мілководді належить до найбільш актуальних, спрямованих на підвищення безпеки мореплавання та потреби подальшого розвитку та вдосконалення методів її вирішення.

На сьогоднішній день існують знання-орієнтовані моделі та методи управління маневруванням суден на мілководді та у стиснутих водах, дослідження яких було проведено у межах статті та обґрунтовано застосування ШНМ.

Застосування даних систем підтримки прийняття рішення судноводіння, які будуть містити моделі та методи, дозволять підвищити безпеку судноводіння.

Перелік використаних джерел:

1. Bowditch N. American Practical Navigator. Bethesda, Maryland : National imagery and mapping agency, 1995. 882 p.
2. Simsir U., Ertugrul S. Prediction of manually controlled vessels' position and course navigating in narrow waterways using Artificial Neural Networks. *Applied Soft Computing*. 2009. Vol. 9. Iss. 4. Pp. 1217-1224. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.03.002>.
3. Xu T., Liu X., Yang X. Ship Trajectory Online Prediction Based on BP Neural Network Algorithm. *Proceedings of the 2011 International Conference of Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences*, Nanjing, China, 24-25 September 2011. Pp. 103-106. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICM.2011.288>.
4. Ship Trajectory Reconstruction from AIS Sensory Data via Data Quality Control and Prediction / X. Chen et al. *Mathematical Problems in Engineering*. 2020. Vol. 2020. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1155/2020/7191296>.
5. Borkowski P. The Ship Movement Trajectory Prediction Algorithm Using Navigational Data Fusion. *Sensors*. 2017. Vol. 17. Article 1432. DOI: <https://doi.org/10.3390/s17061432>.
6. Lacki M. Intelligent Prediction of Ship Maneuvering. *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2016. Vol. 10(3). Pp. 511-516. DOI: <https://doi.org/10.12716/1001.10.03.17>.
7. Employing traditional machine learning algorithms for big data streams analysis: The case of object trajectory prediction / A. Valsamis et al. *Journal of Systems and Software*. 2017. Vol. 127. Pp. 249-257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2016.06.016>.
8. Automatic ship route design between two ports: A data-driven method / Y. Wen et al. *Applied Ocean Research*. 2020. Vol. 96. Article 102049. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.102049>.
9. Neuromorphic electronics based on copying and pasting the brain / Ham D., Park H., Hwang S., Kim K. *Nature electronics*. 2021. Vol. 4. Pp. 635-644. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41928-021-00646-1>.
10. Underactuated control and analysis of single blade installation using a jackup installation vessel and

- active tugger line force control / Z. Ren et al. *Marine Structures*. 2023. Vol. 88. Article 103338. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103338>.
11. Chansarkar M. Neural Networks in GPS Navigation. *GPS Solutions*. 2000. Vol. 4. Pp. 14-18. DOI: <https://doi.org/10.1007/PL00012837>.
 12. Mosavi M. R. Precise Real-Time Positioning with a Low Cost GPS Engine using Neural Networks. *Survey Review*. 2007. Vol. 39. Pp. 316-327. DOI: <https://doi.org/10.1179/175227007X197228>.
 13. Jwo D.J., Pai C.-F. Incorporation of Neural Network State Estimator for GPS Attitude Determination. *The Journal of Navigation*. 2014. Vol. 57. Pp. 117-134. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463303002625>.
 14. *Waterline Guidelines 2011*. Directorate-General for Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, 2011. 179 p.

References:

1. N. Bowditch, *American Practical Navigator*. Bethesda, Maryland, USA: National imagery and mapping agency, 1995.
2. U. Simsir, and S. Ertugrul, «Prediction of manually controlled vessels' position and course navigating in narrow waterways using Artificial Neural Networks», *Applied Soft Computing*, vol. 9, iss. 4, pp. 1217-1224, 2009. doi: **10.1016/j.asoc.2009.03.002**.
3. T. Xu, X. Liu, and X. Yang, «Ship Trajectory Online Prediction Based on BP Neural Network Algorithm», in Proc. Int. Conf. of Information Technology, Computer Engineering and Management Sciences, Nanjing, China, 2011, pp. 103-106. doi: **10.1109/ICM.2011.288**.
4. X. Chen et al., «Ship Trajectory Reconstruction from AIS Sensory Data via Data Quality Control and Prediction», *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, pp. 1-9, 2020. doi: **10.1155/2020/7191296**.
5. P. Borkowski, «The Ship Movement Trajectory Prediction Algorithm Using Navigational Data Fusion», *Sensors*, vol. 17, article 1432, 2017. doi: **10.3390/s17061432**.
6. M. Lacki, «Intelligent Prediction of Ship Maneuvering», *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 10(3), pp. 511-516, 2016. doi: **10.12716/1001.10.03.17**.
7. A. Valsamis, K. Tserpes, D. Zisis, D. Anagnostopoulos, and T. Varvarigou, «Employing traditional machine learning algorithms for big data streams analysis: The case of object trajectory prediction», *Journal of Systems and Software*, vol. 127, pp. 249-257, 2017. doi: **10.1016/j.jss.2016.06.016**.
8. Y. Wen et al., «Automatic ship route design between two ports: A data-driven method», *Applied Ocean Research*, vol. 96, article 102049, 2020. doi: **10.1016/j.apor.2019.102049**.
9. D. Ham, H. Park, S. Hwang, and K. Kim, «Neuromorphic electronics based on copying and pasting the brain», *Nature electronics*, vol. 4, pp. 635-644, 2021. doi: **10.1038/s41928-021-00646-1**.
10. Z. Ren, X. Zhen, Z. Jiang, Z. Gao, Y. Li, and W. Shi, «Underactuated control and analysis of single blade installation using a jackup installation vessel and active tugger line force control», *Marine Structures*, vol. 88, article 103338, 2023. doi: **10.1016/j.marstruc.2022.103338**.
11. M. Chansarkar, «Neural Networks in GPS Navigation», *GPS Solutions*, vol. 4, pp. 14-18, 2000. doi: **10.1007/PL00012837**.
12. M.R. Mosavi, «Precise Real-Time Positioning with a Low Cost GPS Engine using Neural Networks», *Survey Review*, vol. 39, pp. 316-327, 2007. doi: **10.1179/175227007X197228**.
13. D.J. Jwo., and C.-F. Pai, «Incorporation of Neural Network State Estimator for GPS Attitude Determination», *The Journal of Navigation*, vol. 57, pp. 117-134, 2014. doi: **10.1017/S0373463303002625**.
14. *Waterline Guidelines 2011*. Directorate-General for Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, 2011.

Стаття надійшла 17.09.2024

Стаття прийнята 01.10.2024

ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ОЦІНКИ МОРСЬКОЇ ПІДГОТОВКИ ЯК НЕВІД'ЄМНОЇ ЧАСТИНИ МОРСЬКОЇ ОСВІТИ ТА НАВЧАННЯ

Фахівці вважають морську підготовку як невід'ємну й основну частину професійної підготовки моряків. Тому морська підготовка розглядається як частина навчальних програм морських навчальних закладів. Для здобуття фаху судноводія або морського інженера всі курсанти зобов'язані успішно завершити принаймні однорічну програму морської підготовки. Зазвичай ця підготовка проводиться на борту відповідних торговельних суден. Рівень підготовки оцінюється членами екіпажу судна і викладачами навчальних закладів. Дослідження рекомендується проводити у три етапи. На першому етапі оцінюються результати спостереження від членів екіпажу судна та анкетування, проведені комісією, які є досить суб'єктивними і не можуть бути оцінені за допомогою вимірюваного методу. Другий етап присвячений оцінці результатів письмового іспиту та відповідей на запитання анкети за допомогою вимірюваного методу. На третьому етапі на основі загальної оцінки результатів попередніх етапів визначаються проблеми, розв'язання яких можуть призвести до певних пропозицій щодо проведення необхідних змін в майбутньому. Освіта та навчання не мають жодної цінності при відсутності належного оцінювання. Враховуючи, що практична підготовка є невід'ємною частиною академічної освіти, необхідно вдосконалити систему оцінювання практичного навчання. Виробнича практика набуває все більшого значення для покращення практичних знань та навичок курсантів, безпосередньо пов'язаних з використанням обладнання для досягнення своєї місії. Практична підготовка також допоможе курсантам ознайомитися з їх майбутніми робочими місцями. Тому навчальні заклади повинні приділяти більше уваги практичній підготовці та розробити процедури для проведення ефективного навчання.

Ключові слова: практична підготовка, судноводій, навчання, навички, оцінювання, безпека, прийняття рішень, екіпаж судна, безпека судноводіння, безпека на морі.

O. Tymoshchuk, O. Levchenko, O. Kushch. *A study to assess maritime training as an integral part of maritime education and training.* Experts consider maritime training to be an integral and fundamental part of seafarers' professional training. Therefore, maritime training is considered to be a part of the curriculum of maritime educational institutions. In order to qualify as a seafarer or marine engineer, all cadets are required to successfully complete at least a one-year maritime training programme. This training is usually carried out on board the relevant merchant vessels. The level of training is assessed by the ship's crew and teachers at the educational institutions. Identify the shortcomings of maritime practical training on a particular training ship based on the identification and assessment of the qualifications achieved by cadets on board. It is recommended to conduct the study in three stages. The first stage evaluates the results of observation by the ship's crew and questionnaires conducted by the board, which are highly subjective and cannot be assessed using a measurable method. The second stage is devoted to the assessment of the results of the written examination and the answers to the questionnaire using a measurable method. At the third stage, based on the overall assessment of the results of the

¹ д-р техн. наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-3684-6182, mnielena7@gmail.com

² канд. екон. наук, доцент, доктор філософії (спеціальність 271), Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0001-7659-347X, olevchenko76@gmail.com

³ ст. викладач, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0009-0008-7090-2348, o.ku1999@ukr.net

previous stages, problems are identified, the solution of which may lead to certain proposals for necessary changes in the future. Education and training are of no value in the absence of proper assessment. Given that practical training is an integral part of academic education, it is necessary to improve the system of assessment of practical training. On-the-job training is becoming increasingly important to improve cadets' practical knowledge and skills directly related to using equipment to achieve their mission. Practical training will also help cadets to become familiar with their future workplaces. Therefore, training institutions should pay more attention to practical training and develop procedures for effective training.

Keywords: *practical training, seafarer, training, skills, assessment, safety, decision-making, crew, navigational safety, maritime safety.*

Постановка проблеми. Одним з важливіших документів Міжнародної морської організації (ІМО), що регулює принципи та стандарти морської освіти та підготовки, є Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти (ПДНВ-78 з правками). Цей документ, ратифікований всіма морськими державами, висуває основні вимоги до програм освіти та підготовки, які чітко визначені Типовими курсами ІМО. У модельних курсах ІМО 7.01-7.04 викладені особливості палубної та управлінської освіти операторського і судового рівня та морської інженерної освіти. Міжнародна федерація судноплавства (ISF), що представляє морську індустрію, спираючись на ці модельні курси, рекомендувала структуровані програми морської підготовки. Практично всі морські адміністрації прийняли таку програму морської підготовки, надавши до неї несуттєві зміни.

Фахівці вважають морську підготовку як невід'ємну й основну частину професійної підготовки моряків, що відповідає за безпеку судноплавства [1]. Тому морська підготовка розглядається як частина навчальних програм морських навчальних закладів. Для здобуття фаху судноводія або морського інженера всі курсанти зобов'язані успішно завершити принаймні однорічну програму морської підготовки. Зазвичай ця підготовка проводиться на борту відповідних торговельних суден. Рівень підготовки оцінюється членами екіпажу судна і викладачами навчальних закладів. Звіти про навчання, свідоцтва, отримані курсантами, й оціночні відомості, підписані призначеними членами екіпажу судна, надсилаються до навчальних закладів. Остаточну оцінку виставляють викладачі навчального закладу після перевірки досягнень курсантів та проведення співбесіди з ними. Для проведення морської підготовки курсантів низка країн мають навчальні судна (Training Ship – тренувальні судна). Підготовка проводиться під наглядом морських викладачів, які перебувають на борту судна постійно або на певних етапах підготовки, зокрема, на початкових.

Зазвичай морське навчання проводиться на спеціально розгорнутих для курсантів морських навчальних суднах. Очевидно, що у морському навчанні приймають участь курсанти, морські викладачі і члени екіпажу на борту. Курсанти розділяються на команди, кожна з яких очолюють командири, якими призначаються курсанти останнього року навчання. Морську підготовку безпосередньо під керівництвом головного інженера також проходять курсанти-інженери. Структурована навчальна програма складається з аудиторних і практичних занять і вахтової служби. Остання проводиться під наглядом членів екіпажу судна і викладачів, які раніше переважно були капітанами морських суден, що здійснювали морські перевезення.

Якщо морська практика проводиться з курсантами першого року навчання, то навчальну програму планують на основі першого етапу програми морської підготовки, рекомендованої ISF. У цьому разі навчання охоплює широке коло практичних морських тренувань, у т.ч. обов'язки моряка, ремонт і технічне обслуговування, охорону і безпеку, виживання в морі, основи навігації, несення вахти, навички використання рятувальних засобів, протипожежні тренування і тренування з боротьби з пошкодженнями, доступ до закритих приміщень, канатні роботи, управління судном тощо.

Курсанти живуть на борту судна цілодобово, а навчання продовжується в морі та в портах відповідно до структурованого розпорядку дня. У кожному порту за умови успішного навчання на попередньому етапі курсанти мають 8-годинну денну відпустку. Будь-яке пропущене/неуспішне навчання компенсується повторним навчанням. Курсанти обов'язково носять морську форму і виконують вимоги спеціального Кодексу поведінки на морі.

На заключному етапі навчання оцінюються досягнення курсантів під час морської підготовки, у т. ч. враховується:

- спостереження з боку членів суднового екіпажу, призначених в якості інструкторів;
- результати письмового іспиту, що охоплює всі аспекти проведеної підготовки;
- результати співбесіди з кожним окремим курсантом для остаточного оцінювання, яка проводилася комісією, що складалася з 3 викладачів.

Особливої уваги заслуговує письмовий іспит, питання до якого охоплює лише ті предмети, які викладалися та відпрацьовувалися під час морської підготовки. Причому питання мали декілька варіантів відповідей.

Для визначення проблем, які виникали під час тренінгів, була розроблена спеціальна анкета, яка була застосована після морської підготовки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Оцінюванням називається процес збору й обговорення інформації з численних і різноманітних джерел з метою вироблення глибокого розуміння того, що курсанти знають, розуміють і можуть робити зі своїми знаннями в результаті свого освітнього досвіду. Процес досягає кульмінації, коли результати оцінювання використовуються для покращення подальшого навчання [2].

Оцінювання важливе не лише для оцінювання курсантів, але й для визначення проблемних питань у викладанні та й самому оцінюванні.

Тому слід обговорити якість оцінювання. Під час оцінювання необхідно дотримуватися того, щоб оцінки були валідними, надійними, практичними, рівноправними та справедливими [3]. Ці вимоги також будуть використані під час обговорення оцінок, зроблених наприкінці морської підготовки.

Оцінювання практичної підготовки (підготовки на робочому місці): навчання на робочому місці (практична підготовка) багато у чому відрізняється від академічного навчання, враховуючи мету, завдання, зміст і місце, нагляд за курсантами і, зокрема, спосіб проведення. Тому методи оцінювання, застосовувані для навчання на робочому місці, також відрізняються. Основна відмінність полягає у тому, що оцінювання навчання на робочому місці здійснюється за допомогою усних іспитів, а письмові іспити майже не застосовуються. Оцінювання може супроводжуватися виконанням завдань, за результатами яких визначається рівень досягнень.

При оцінюванні моряків були проаналізовані підходи щодо оцінювання результатів навчання у різних предметних областях. Так, основним методом оцінювання студентів-медсестер є об'єктивний письмовий іспит, якому притаманні деякі переваги і недоліки. Так, у [4] досліджено цінність усних іспитів при оцінюванні студентів-медсестер. П'ять груп студентів оцінювали за допомогою різних форм тестування: тільки письмових тестів, тільки усних іспитів або за допомогою комбінації обох видів оцінювання. За результатами згаданого дослідження встановлено, що усні іспити порівняно з письмовими є більш ефективними, у тому числі в оцінці розуміння студентами медичного/хірургічного змісту та його застосування в клінічних ситуаціях.

Подібний підхід можна застосовувати для оцінки успішності курсантів-моряків. Це обумовлено певною схожістю між морською та медсестринською освітою щодо важливості та тривалості практичної підготовки. У випадку медсестринської освіти вона складається з академічної підготовки і з практичної підготовки з особливим акцентом на практику в клінічних умовах. Аналогічний підхід у загальному випадку застосовують морські викладачі: вони визнають переваги усного іспиту під час оцінювання морської підготовки. Крім того, на користь такого підходу свідчить той факт, що «сертифікаційні іспити моряків» у багатьох країнах супроводжуються усним іспитом, за яким слідує письмовий іспит. Причому в разі будь-якої невдачі на усному іспиті, загальний іспит оцінюється як незадовільний.

Тому необхідно виявити можливі шляхи покращення подальшого навчання за результатами оцінок різних методів, використовуваних для оцінювання конкретної морської підготовки.

Метою дослідження є з'ясування недоліків морської практичної підготовки на навчальному судні на основі визначення та оцінки кваліфікації, досягнутої курсантами на борту судна.

Дослідження рекомендується проводити у три етапи.

На першому етапі оцінюються результати спостереження від членів екіпажу судна та анкетування, проведені комісією, які є досить суб'єктивними і не можуть бути оцінені за допомогою вимірюваного методу.

Другий етап присвячений оцінці результатів письмового іспиту та відповідей на запитання анкети за допомогою вимірюваного методу.

На третьому етапі на основі загальної оцінки результатів попередніх етапів визначаються проблеми, розв'язання яких можуть призвести до певних пропозицій щодо проведення необхідних змін в майбутньому.

Виклад основного матеріалу.

Аналітичні стратегії: найпоширенішим розподілом ймовірностей, що описує багато природних явищ, є нормальний (рис. 1) [5]. Крива нормального розподілу є неперервною та симетричною відносно середнього значення. Вона має рівні середнє, медіану та моду, а площа під кривою дорівнює 1. Теоретично крива простягається до плюс і мінус нескінченності по осі x .

Симетричним називають розподіл, для якого дві половини гістограми виглядають як дзеркальні відображення одна одної.

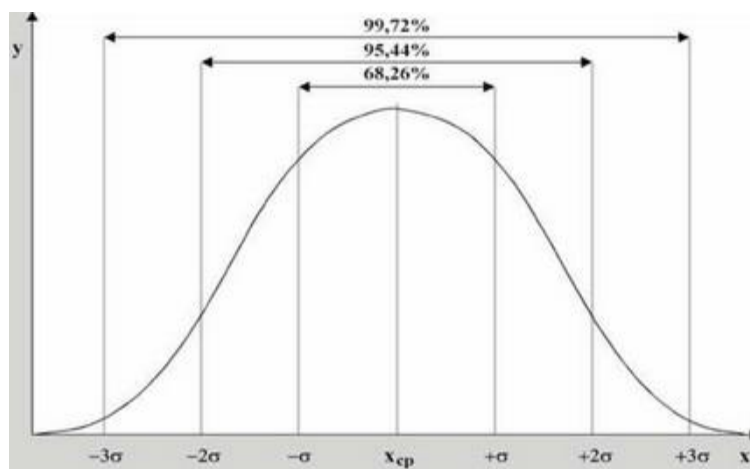


Рис. 1 – Нормальний розподіл

Асиметричним (несиметричним) називається розподіл, в якому відсутнє таке дзеркальне відображення. В асиметричному розподілі хвіст знаходиться з правого боку (рис. 2).

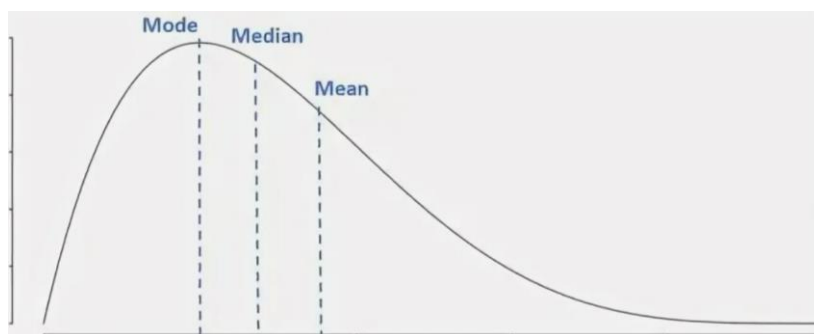


Рис. 2 – Правосторонній розподіл (нахил вправо)

Парето-аналіз. Згідно з принципом аналізу Парето, для багатьох подій приблизно 80% наслідків походять від 20% причин [6]. Це такий тип діаграми, що містить як стовпчики, так і лінійну діаграму, де окремі значення представлені в порядку спадання стовпчиками, а кумулятивний підсумок – лінією. За допомогою цієї методики можна визначити основні причини, усунення яких дозволить вирішити 80% виниклих проблем.

Інші аналітичні методи дозволяють отримати надійну та достовірну оцінку. Так, у роботі [7] була запропонована процедура аналізу результатів іспитів студентів однієї з інженерних спеціальностей. Після простого вилучення оцінок були розраховані відносні параметри, а саме,

складність, дискримінацію та надійність. Далі отриманні значення параметрів були порівняні для виявлення можливих джерел проблем.

Для досягнення мети розглянемо лише один параметр – складність.

Складністю P тестового завдання називають частку осіб, які правильно відповідають на нього. Чим вищий цей показник, тим нижча складність.

Індекс складності P_i завдання i розраховується за виразом:

$$P_i = \frac{A_i}{N_i},$$

де A_i – середній бал за завдання i ; N_i – повна кількість балів за завдання i .

Для всього сценарію середній індекс складності P дорівнює:

$$P = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n P_i \cdot N_i.$$

Середній показник складності P слід контролювати на рівні 0,7.

Якщо $P > 0,75$, то іспит є досить легким, якщо $P < 0,45$, то іспит – складний.

Якщо для предметного письмового іспиту $P = 0,47$, то він вважається складним.

У роботі досліджено оцінювання чотирьох складових:

- оцінювання, проведене судновою командою;
- оцінювання, проведене викладачами, які перебувають на борту;
- оцінювання письмового іспиту;
- оцінювання результатів анкетування.

Аналіз оцінювання, проведеного судновою командою. Відповідно до Положення про морську підготовку, оцінювання курсантів має здійснюватися капітаном, старшим помічником капітана та призначеним офіцером з підготовки на судні (Designated Ship Training Officer – DSTO). До складу суднової команди, призначеної для проведення морської підготовки, входили капітан, старший помічник капітана, 2-ий і 3-ий помічники капітана. Вони зустрічалися з курсантами під час їхнього перебування на судні та під час вахти на містку. Величезна кількість курсантів значно скоротила час для тісної роботи членів суднової команди з курсантами. Тому оцінка членів суднової команди у більшості випадків ґрунтувалася на окремих курсантах, які привертати їхню увагу: або тих, хто вирізнявся з-поміж інших, або на тих, хто не справлявся з навчанням, тобто на дуже обмеженому спостереженні.

Такий стан речей відбився на тому, що члени суднової команди часто не наважилися прийняти негативне рішення, а отримували поради від викладачів щодо певних курсантів. Іноді приймалося позитивне рішення щодо деяких дуже активних і корисних для команди містка курсантів. Хоча члени суднової команди мали можливість оцінювати курсантів за трьома категоріями: «дуже успішно», «успішно» і «відповідно до стандартів», обробка отриманих оцінок показала, що переважну більшість оцінок склали категорії «дуже успішно» (12 осіб) та «успішно» (85 осіб).

Згідно з розглянутими вище принципами оцінювання, ця оцінка не може вважатися валідною і надійною, рівноправною і справедливою. Тобто необхідні певні зміни до існуючої системи оцінювання.

Занадто велика кількість курсантів, які проходять навчання на робочому місці, не дозволяє наявним членам суднової команди на робочих місцях проводити надійне оцінювання. Тому як альтернативний захід розглянуто залучення деяких викладачів, призначених навчальним закладом, до навчання на робочому місці. Вони будуть проводити оцінювання замість членів суднової команди і заповнювати частину записів про навчання, що стосується оцінювання.

Оцінка цього результату за допомогою кривої Гауса є неможливою, оскільки він не є нормальним розподілом. Але відсоток дуже успішних курсантів (12,5%) можна вважати таким, що знаходиться в розумних межах.

Аналіз оцінювання, проведеного викладачами, відрядженими на судно. Серед викладачів, які проводили співбесіди для оцінювання, були 3 старших помічники капітана, 1 старший помічник капітана та 1 вахтовий офіцер. Вони провели заплановану підготовку в класі, на тренажерних майданчиках і на містку, і могли скласти думку про курсантів, виходячи з їхньої поведінки. Викладачі мали достатньо часу для тісної роботи з курсантами. Під час співбесід вони мали на руках результати оцінювання персоналу та письмових іспитів. Крім того, у викладачів уже було

певне уявлення про деяких курсантів, з якими вони могли зустрічатися протягом навчального року під час читання своїх курсів.

Оцінювання викладачами морських дисциплін проводилося шляхом заповнення форми співбесіди, яка складала 10-12 хвилин з кожним студентом, цього явно недостатньо для ідеального оцінювання. Викладачі також іноді вагалися, чи приймати негативне рішення, щоб не помилитися, але надали свої позитивні рішення деяким дуже активним та завзятим під час тренувань та навчань курсантам. Їхні рішення аналогічно до запропонованого команді судна оцінювалися за трьома категоріями: «дуже успішно», «успішно» і «відповідно до стандартів». І подібно до оцінки суднової команди, їхні відповіді також були поділені на дві категорії «дуже успішно» (14 осіб) і «успішно» (82 курсанта).

Отриманий результат не є нормальним розподілом, що не дозволяє оцінити його за допомогою кривої Гауса. І якщо цю оцінку вважати валідною і надійною, рівноправною і справедливою, для отримання відчутного результату шляхом порівняння необхідні застосувати певні методи оцінювання.

Для вимірювання досягнень курсантів використовуються різні типи шкал, наприклад, шкала типу «дуже успішний, успішний і рекомендований». Пірсон для акредитації організацій освіти використовує систему, що базується на шкалі вигляду «відмінності, заслуги, зараховано та рекомендовано». У порівнянні з першою шкалою елементи «відмінності і заслуги» системи Пірсона є більш чіткими і зрозумілими, чим «дуже успішний» для виявлення успішності курсантів.

Також відомі багато методів (шкал), що використовуються для оцінки людського успіху в організаціях, наприклад, у відомій шкалі для вимірювання ефективності людини в організації/галузі використані такі елементи: Особистісні характеристики, Професійні тенденції, Виміри особистих проблем, Організація та культура, Взаємодія між людиною та організацією, Людина та лідер тощо [8]. Таким чином, для вимірювання досягнень курсанта необхідно розробити нові шкали.

В цілому, відсоток дуже успішних курсантів (14,58%) знаходиться в досить розумних межах і є дуже близьким до результатів оцінювання, проведеного екіпажем судна.

Аналіз оцінювання письмового іспиту. Питання, підготовлені морськими викладачами, які брали участь у морській підготовці, охоплювали теми, що викладалися в класі та відпрацьовувалися на практиці (робочих місцях). Курсант мав вибрати одну правильну відповідь з 4 варіантів. Але результати були достатньо низькими: курсанти 1-го курсу – 45,7; курсанти 2-го курсу – 43,5; курсанти 3-го курсу – 46; загальний середній показник – 45,07.

Розподіл оцінок за результатами письмового іспиту наведено на рисунку 3. Таким значенням розподілу відповідають такі статистичні параметри набору даних: дисперсія – 32,87; стандартне відхилення – 5,73; середнє значення – 6,22; медіана – 4.



Рис. 3 – Графік розподілу даних

Розподіл даних свідчить про наближення графіка до правостороннього розподілу з деякими незначними відхиленнями (рис. 4).



Рис. 4 – Гістограма оцінок письмового іспиту, перетворена до правостороннього розподілу

Оскільки результати не є обнадійливими через низькі оцінки, для більш глибокого дослідження рівня підготовки курсантів було також розпочато його аналіз шляхом анкетування частини курсантів, які склали цей іспит.

Аналіз оцінок за результатами анкетування. На першому етапі було перевірено зміст, якість та складність запитань. Зміст точно відповідав застосованій програмі. Якість запитань була високою, відповідала відомим принципам і методам і була перевірена за правилами підготовки запитань з множинним вибором. Порівняння складності застосованих питань з питаннями, що задавалися протягом навчального року, показали, що застосовані питання були простішими від інших.

Для виявлення інших причин, що впливають на результати іспиту, було проведення опитування. У разі необхідності учасники могли додати будь-які інші причини.

Анкети були роздані 31 курсанту, 27 з яких відповіли на запитання анкети правильно. До списку були додані лише дві причини 2 курсантами, які не могли бути враховані через недостатню кількість курсантів для проведення достовірного порівняння.

Результати анкетування.

Причина, через яку я не зміг успішно скласти письмовий іспит наприкінці морського стажування:

- Я не очікував, що наприкінці буду складати іспит – 20;
- Я не готувався до цього іспиту – 17;
- Я не ставився до тренувань серйозно – 15;
- На деяких заняттях кількість учасників була настільки великою, що я відволікався – 7;
- Питання були надзвичайно/незвично складними – 7;
- Мені ставили питання, не пов'язані з темою – 5;
- Було багато заплутаних запитань – 4;
- Життя в морі знизило мою ефективність – 3;
- Не було достатньо часу, щоб відповісти на запитання – 3.

Застосований до результатів анкет аналіз Парето наведений на рис. 5.

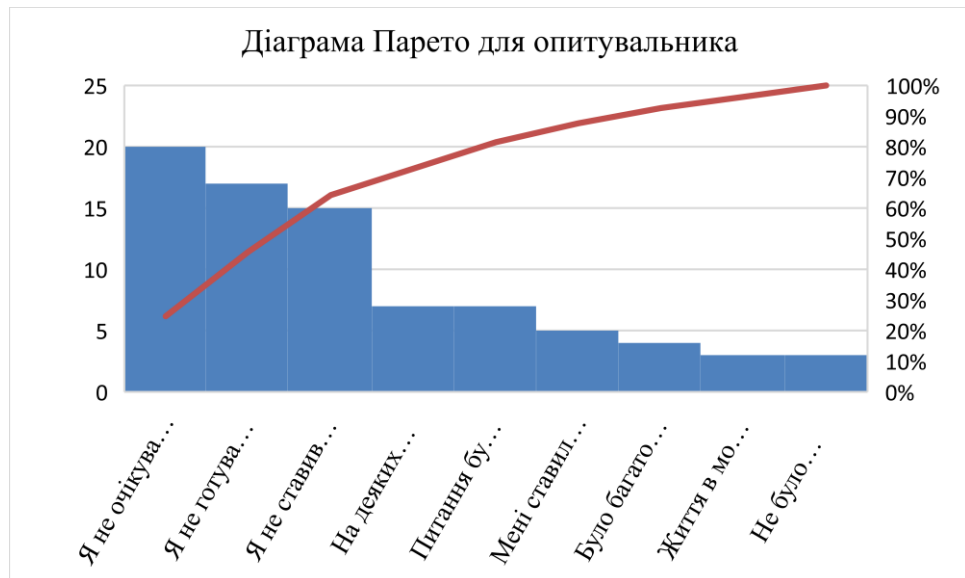


Рис. 5 – Діаграми Парето для опитувальника

На накопичувальній відсотковій лінії діаграми є точки, які виникають, коли нахил лінії починає вирівнюватися. Фактори під найкрутішою частиною кривої є найбільш важливими. Отже, «Я не очікував, що буду складати іспит в кінці» має найбільший рівень значущості порівняно з іншими причинами. «Я не готувався до цього іспиту» та «Я несерйозно поставився до тренування» – дві інші значущі причини. «Кількість учасників на одному занятті була настільки великою, що я відволікався» і «Питання були надзвичайно/незвичайно складними» мають приблизно однаковий рівень значущості і є досить важливими у порівнянні з «Мені задавали питання, що не стосуються теми» і «Було багато заплутаних питань». «Життя в морі знизило мою ефективність» та «Не було достатньо часу, щоб відповісти на запитання», які мають менший рівень значущості порівняно з причинами, зазначеними зліва. В результаті аналізу, три причини були визнані учасником досить важливими: «Я не очікував, що буду складати іспит в кінці»; «Я не готувався до цього іспиту» і «Я несерйозно поставився до тренування».

Висновки

1. Виробнича практика набуває все більшого значення для покращення практичних знань та навичок курсантів, безпосередньо пов'язаних з використанням обладнання для досягнення своєї місії. Практична підготовка також допоможе курсантам ознайомитися з їх майбутніми робочими місцями. Тому навчальні заклади повинні приділяти більше уваги практичній підготовці та розробити процедури для проведення ефективного навчання.

2. Освіта та навчання не мають жодної цінності при відсутності належного оцінювання. Враховуючи, що практична підготовка є невід'ємною частиною академічної освіти, необхідно вдосконалити систему оцінювання практичного навчання.

3. Якщо кількість курсантів, призначених для практичної підготовки, є дуже великою, необхідно призначити достатню кількість викладачів в якості інструкторів для проведення занять та контролю й оцінювання курсантів.

4. Курсанти повинні бути заздалегідь поінформовані, що практична підготовка закінчується усними та письмовими іспитами, а вони зобов'язані вести всю необхідну документацію для підтвердження своїх досягнень.

5. Усні іспити є досить ефективними для розуміння досягнень курсантів. Але усні іспити базуватимуться на добре структурованих питаннях, безпосередньо пов'язаних з навчанням на робочому місці.

6. Аналіз Парето виявив важливі речі для оцінки ефективності практичної підготовки моряків:

а) курсанти не витрачають додатковий час на повторення того, що вони вивчили під час практики; навіть під час підготовки до іспиту в кінці навчання;

б) курсанти не вважають практичну підготовку невід'ємною частиною академічної підготовки і тому не приділяють їй достатньо уваги;

в) кількість курсантів, які братимуть участь у практичній підготовці, має бути чітко визначена з урахуванням змісту практики, розмірів робочого місця та безпосередньої участі курсантів у практиці.

7. Загальноприйнята система оцінювання курсантів, що базується на шкалі «дуже успішний, успішний та рекомендаційний», має змінюватися, наприклад, на шкалу Pearson, елементи якої є більш чіткими і зрозумілими для оцінки успішності курсантів.

Перелік використаних джерел:

1. Kalinichenko T., Kalinichenko Y., Tymoshchuk O. Account of navigational hazards when the ship and the target are avoiding collision at small distances. *Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions*. 2022. Pp. 35-37. DOI: <https://doi.org/10.21303/2585-6847.2022.002665>.
2. Huba M. E., Freed J. E. *Learner-centered assessment on college campuses: Shifting the focus from teaching to learning*. Needham Heights, MA: Allyn & Bacon, 2000. 108 p.
3. SQA (Scottish Qualifications Authority). *Guide to Assessment Publication*. Publication Code: AA4147 (July 2015). Glasgow, UK, 2015. 48 p.
4. Rushton P., Eggett D. Comparison of written and oral examinations in a baccalaureate medical-surgical nursing course. *Journal of Professional Nursing*. 2003. Vol. 19(3). Pp. 142-148. DOI: [https://doi.org/10.1016/S8755-7223\(03\)00049-8](https://doi.org/10.1016/S8755-7223(03)00049-8).
5. Wares D. *Essential Quantitative Methods – A Guide for Business*. Addison-Wesley, 1998. 336 p.
6. Surhone L., Timpledon M., Marseken S. *Pareto analysis: Statistics, decision making, Pareto principle, fault tree analysis, failure mode and effects analysis, Pareto distribution*. Betascript Publishing, 2010. 76 p.
7. The Statistical Analysis and Evaluation of Examination Results of Materials Research Methods Course / Yuan W., Deng C., Zhu H., Li J. *Creative Education*. 2012. Vol. 03(07). Pp. 162-164. DOI: <https://doi.org/10.4236/ce.2012.37B042>.
8. Celik D. A., Telman T. *The scales used in the Industry and Organizational Culture*. Ankara : Nobel Yayınları, 2013.

References:

1. T. Kalinichenko, Y. Kalinichenko, and O. Tymoshchuk, «Account of navigational hazards when the ship and the target are avoiding collision at small distances», *Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions*, pp. 35-37, 2022. doi: 10.21303/2585-6847.2022.002665.
2. M.E. Huba, and J.E. Freed, *Learner-centered assessment on college campuses: Shifting the focus from teaching to learning*. Needham Heights, MA: Allyn & Bacon, 2000.
3. SQA (Scottish Qualifications Authority). *Guide to Assessment Publication*. Publication Code: AA4147 (July 2015). Glasgow, UK, 2015.
4. P. Rushton, and D. Eggett, «Comparison of written and oral examinations in a baccalaureate medical-surgical nursing course», *Journal of Professional Nursing*, vol. 19(3), pp. 142-148, 2003. doi: 10.1016/S8755-7223(03)00049-8.
5. D. Wares, *Essential Quantitative Methods – A Guide for Business*. Addison-Wesley Publ., 1998.
6. L. Surhone, M. Timpledon, and S. Marseken, *Pareto analysis: Statistics, decision making, Pareto principle, fault tree analysis, failure mode and effects analysis, Pareto distribution*. Betascript Publ., 2010.
7. W. Yuan, C. Deng, H. Zhu, and J. Li, «The Statistical Analysis and Evaluation of Examination Results of Materials Research Methods Course», *Creative Education*, vol. 03(07), pp. 162-164, 2012. doi: 10.4236/ce.2012.37B042.
8. D.A. Celik, and T. Telman, *The scales used in the Industry and Organizational Culture*. Ankara, Turkey: Nobel Yayınları Publ., 2013.

Стаття надійшла 15.08.2024

Стаття прийнята 11.09.2024

МЕТОД УПРАВЛІННЯ АВТОНОМНИМИ ІНВЕРТОРАМИ НАПРУГИ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

У статті доведено, що підвищення якісних характеристик перетворювачів енергії з ланкою постійного струму з багаторазовою комутацією та широтно-імпульсним регулюванням є актуальним завданням. При цьому виникає протиріччя між вимогою мінімізації втрат в асинхронних двигунах та мінімізацією втрат у перетворювачах частоти, що вимагає, з одного боку, підвищення, а, з іншого, – зменшення несучої частоти. Досягнення необхідних техніко-економічних показників вторинних перетворювачів енергії, як перетворювачів з ланкою постійного струму, вимагає використання багаторазової комутації з різними методами модуляції у поєднанні з широтно-імпульсним регулюванням, а також ступінчастих принципів перетворення енергії. Отже підвищення якісних характеристик перетворювачів енергії з ланкою постійного струму з багаторазовою комутацією та широтно-імпульсним регулюванням є актуальним завданням. Метою дослідження є розроблення методу управління автономними інверторами напруги суднових електроенергетичних установок. Проведене дослідження свідчить, що розвиток методів керування АІН у системах ПЧ-АД пов'язаний із застосуванням різних видів ШІМ, які вимагають лише модифікації алгоритмів управління, орієнтованих на пряме мікропроцесорне управління і зниження необхідної частоти комутації. Безпосереднє мікропроцесорне управління електроприводами відкриває значні перспективи для розвитку багатофазних силових систем, оскільки дає змогу організувати пов'язане управління на великій кількості фаз, обмежене тільки ресурсами та кількістю каналів управління конкретної мікропроцесорної плати. З урахуванням дроблення потужності за фазами з'являється можливість застосування високошвидкісних ключів, що ще більше розширює можливості застосування складних законів управління в перехідних режимах роботи електроприводу суднових електроенергетичних установок.

Ключові слова: автономні інвертори напруги, асинхронні суднові двигуни, електроенергетика, мікропроцесорна техніка, морський транспорт, силова електроніка, суднові двигуни, електроенергетичні установки.

O. Tymoshchuk, Y. Shapran. Control method for autonomous voltage inverters of ship power plants. The article proves that improving the quality characteristics of energy converters with a DC link with multiple switching and pulse-width regulation is an urgent task. In this case, a contradiction arises between the requirement of minimizing losses in asynchronous motors and minimizing losses in frequency converters, which requires, on the one hand, an increase, and, on the other, a decrease in the carrier frequency. Achieving the necessary technical and economic indicators of secondary energy converters, as converters with a DC link, requires the use of multiple switching with various modulation methods in combination with pulse-width regulation, as well as step-wise principles of energy conversion. Therefore, improving the quality characteristics of energy converters with a DC link with multiple switching and pulse-width regulation is an urgent task. The purpose of the study is to develop a method for controlling autonomous voltage inverters of ship electrical power plants. The study shows that the development of control methods for AVI in AC-DC systems is associated with the use of various types of PWM, which require only modification of control algorithms focused on direct microprocessor control and reducing the

¹ д-р техн. наук, професор, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0003-3684-6182, mnielena7@gmail.com

² канд. техн. наук, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-0229-2428, olilia2007@ukr.net

required switching frequency. Direct microprocessor control of electric drives opens up significant prospects for the development of multiphase power systems, since it allows organizing connected control over a large number of phases, limited only by the resources and number of control channels of a specific microprocessor board. Taking into account the splitting of power by phases, the possibility of using high-speed switches appears, which further expands the possibilities of applying complex control laws in transient operating modes of the electric drive of ship electrical power plants.

Keywords: *autonomous voltage inverters, asynchronous marine engines, electric power, microprocessor technology, marine transport, power electronics, marine engines.*

Постановка проблеми. Розвиток сучасної елементної бази та зростання швидкодії мікропроцесорної техніки створили можливість застосування складних законів модуляції в системах з імпульсно-модуляційним перетворенням енергії в роботі як загальносуднового обладнання, так і для забезпечення силових агрегатів руху суден. Досягнення необхідних техніко-економічних показників вторинних перетворювачів енергії, як перетворювачів з ланкою постійного струму, вимагає використання багаторазової комутації з різними методами модуляції у поєднанні з широтно-імпульсним регулюванням, а також ступінчастих принципів перетворення енергії. Отже підвищення якісних характеристик перетворювачів енергії з ланкою постійного струму з багаторазовою комутацією та широтно-імпульсним регулюванням є актуальним завданням.

Пристрої управління перетворювачів частоти мають реалізовувати метод, який забезпечив реалізацію двох основних вимог, що висуваються до системи перетворювач частоти (ПЧ) – асинхронний двигун (АД):

- мінімізація втрат у АД та мінімізація пульсацій моменту, визначених впливом полів першої та вищих гармонік;
- мінімізація втрат в елементах перетворення.

Такі вимоги суперечливі, оскільки для удосконалення роботи АД необхідно підвищувати несучу частоту, а для зменшення втрат у ПЧ її слід зменшувати. Також двосторонній енергетичний зв'язок вимагає додаткових перемикачів у ПЧ. Дана ситуація вимагає розроблення відповідних методів управління.

Аналіз останніх досліджень. На сьогоднішній день спостерігається тенденція переходу від виконавчих елементів постійного струму до виконавчих елементів змінного струму, а також використання прямого мікропроцесорного управління силовими напівпровідниковими перетворювачами [1- 4].

Для асинхронних двигунів, які набули найбільшого поширення і споживають близько шістдесят відсотків вироблюваної енергії, використовують як скалярні, так і векторні методи керування [5-7]. Найпоширенішим способом реалізації частотного керування асинхронними двигунами є використання перетворювачів частоти з явно вираженою ланкою постійного струму [8].

Мета статті є розроблення методу управління автономними інверторами напруги суднових електроенергетичних установок.

Виклад основного матеріалу. Всі методи управління автономними інверторами напруги (АІН) у системі ПЧ-АД мають відповідати єдиним вимогам, які полягають у можливості глибокого регулювання частоти основної гармоніки та її амплітуди, розділення робочої смуги частот і смуги, в якій розташовуються небажані складові.

Вимоги до якості вихідної напруги АІН установок, асинхронного електроприводу та електричних мереж нормуються [9]. Експлуатаційні характеристики АІН характеризуються [1]:

- коефіцієнтом перетворення за напругою K_U , під яким розуміється відношення максимально можливого діючого значення основної гармоніки вихідної напруги АІН до середньої напруги в ланцюзі постійного струму;
- якістю вихідної напруги, що визначається коефіцієнтом гармонік (K_Γ) для низькочастотної та еквівалентної комбінаційної гармоніки (U_E), а також коефіцієнтом компенсаційних гармонік ($K_{K\Gamma}$) для високочастотної частини частотного спектра;
- формою кривої споживаного струму з ланцюга постійного струму.

Вихідна напруга АІН представляється у вигляді:

$$u_n(t) = F_k(t)u_d(t), \quad (1)$$

де $F_k(t)$ – схемна комутаційна функція.

Отже, завдання управління якістю вихідної напруги АІН зводиться до формування $F_k(t)$, яка визначається обраним законом управління і видом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Діапазон потужностей у різних системах ПЧ-АД достатньо широкий й становить від 0,4 до 500 кВт.

Швидкість обертання таких систем регулюється в діапазоні 0-400 Гц. Одним із чинників підвищення якості вихідної напруги є вибір частоти комутації силових ключів інвертора. Принципово підвищення частоти можливе до 30 кГц (використання надпровідних IGBT-модулів), що знижує амплітуду пульсацій трифазного струму обмотки статора і пов'язані з ними шуми і вібрації в АД у звуковому спектрі частот. Зниження часу увімкнення і вимкнення ключів (підвищення частоти комутації) нижче 1 мкс підвищує нелінійність процесу перетворення. Це пов'язано зі зменшенням співвідношення періоду ШІМ та «мертвого часу» (зони некерваності ключа).

Водночас підвищення частоти комутації понад 5-10 кГц спричиняє різке збільшення теплових навантажень на ключі в статичних та динамічних режимах. Так, при збільшенні частоти комутації до 20 кГц теплові втрати зростають у 5-10 разів, що викликає зниження струмових навантажень у відповідному співвідношенні і призводить до початкового збільшення габаритів перетворювача та ціни.

Використання прямого мікропроцесорного управління дає змогу здійснити вибір значення $F_k(t)$ та необхідної частоти комутації залежно від швидкості обертання ротора АД. Загальна тенденція полягає в переході від широтно-імпульсного регулювання (ШІР) у різних модифікаціях, що використовуються у діапазоні високих швидкостей обертання, до ШІМ на низьких швидкостях обертання [6]. Для отримання високої якості вихідної напруги використовують три види трифазної ШІМ [6, 10]:

- класична ШІМ за синусоїдальним законом;
- ШІМ із попередньою модуляцією третьою гармонікою вихідної частоти (квазівекторна ШІМ);
- векторна (або симплексна) ШІМ.

Квазівекторна та векторна ШІМ забезпечують підвищення K_U , порівняно з класичною трифазною синусоїдальною ШІМ, приблизно на 15% [5]. Реалізація векторної ШІМ орієнтована на використання мікропроцесорних систем управління [3]. В основі технічної реалізації класичної трифазної та ШІМ із передмодуляцією полягає принцип вертикального управління з використанням ШІМ другого роду та двостороннього сигналу розгортки трикутної форми.

$$r(t) = -\frac{2R_m}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(2 \cdot N \cdot \omega \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (2)$$

де N – кількість імпульсів управління на півперіоді інвертуємої напруги $T = 2 \cdot \pi \cdot \omega$ кратні трьом; R_m – максимальне значення сигналу розгортки.

Моменти вмикання ($t_{вн}$) та вимкнення ($t_{вимн}$) ключових елементів (рис. 1) визначаються шляхом розв'язання трансцендентних рівнянь:

– класична ШІМ за синусоїдальним законом:

$$\begin{aligned} r(t) &= V_{yA}(t); r(t) = V_{yB}(t); r(t) = V_{yC}(t); V_{yA}(t) = K_m \sin \omega t; \\ V_{yB}(t) &= K_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); V_{yC}(t) = K_m \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right); K_m = \overline{0; 1}; \end{aligned} \quad (3)$$

– ШІМ із попередньою модуляцією:

$$\begin{aligned} V_{yA}(t) &= K_m (\sin \omega t + 0,13 \sin 3\omega t); \\ V_{yB}(t) &= K_m \left[\sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + 0,13 \sin 3\omega t \right]; \\ V_{yC}(t) &= K_m \sin \left[\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) + 0,13 \sin 3\omega t \right], \end{aligned} \quad (4)$$

де $V_{yA}(t)$, $V_{yB}(t)$, $V_{yC}(t)$ – сигнали управління для фаз A, B, C відповідно; K_m – коефіцієнт модуляції.

У практичній складовій перемикання ключових елементів ключового блока здійснюється за допомогою ШІМ модуляторів другого роду у відповідності з правилами: $m_{A,B,C} = if[V_{yA,B,C}(t) > r(t), 1, 0]$, що призводить до нерівності відрізків часу $c_{1h}T_h$ та $c_{2h}T_h$, як це наведено на рис. 1.

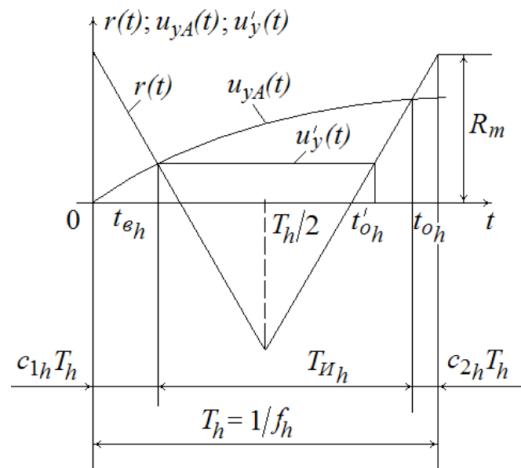


Рис. 1 – Двополярна двостороння широтно-імпульсна модуляція

Така нерівність ($c_{1h}T_h \neq c_{2h}T_h$) негативно впливає на якість гармонічного складу вихідної напруги. З метою усунення даного недоліку необхідно зменшити значення T_h , тобто збільшити значення несучої частоти. Для достатньо високих значень f_h синусоїдальний управляючий сигнал на відріжку часу T_h замінюється прямокутно-ступінчастим $u'(t)$ (див. рис. 1). У такому випадку $t'_{oh} \rightarrow t_{oh}$; $c_{1h}T_h \rightarrow c_{2h}T_h$, а залежність для K_U при $V_{ym} \leq R_m$ прийме вигляд:

$$K_U \approx 0,5K_m, \quad (5)$$

де V_{ym} – максимальне значення сигналу управління.

Для однофазних АІН доцільне використання однополярних сигналів розгортки з двосторонньою або з модуляцією за фронтом і зрізом, які забезпечують менші значення амплітуди еквівалентної комбінаційної гармоніки (U_E) і коефіцієнта компенсаційних гармонік ($K_{КГ}$) порівняно з двополярною [7].

При використанні синусоїдальної двосторонньої модуляції (рис. 2), яка ефективніше від модуляції за зрізом та фронтом за рахунок більшої кількості інформаційних точок, моменти часу t_{Bh} та t_{Oh} визначаються шляхом розв'язання трансцендентного рівняння:

$$\begin{aligned} V_y &= r(t); V_y = |K_m \sin \omega t|, \\ r(t) &= -\frac{2R_m}{\pi} \arcsin \left[\sin \left(2N\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] + \frac{R_m}{2}; \end{aligned} \quad (6)$$

практична реалізація якого здійснюється за допомогою ШІМ модулятора другого роду: $m = if[V_y(t) > r(t), 1, 0]$.

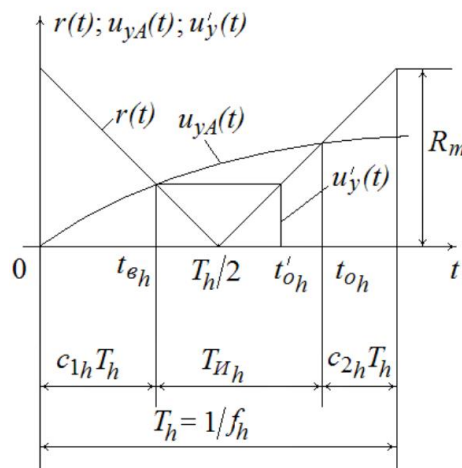


Рис. 2 – Однополярна двостороння широтно-імпульсна модуляція

Значення першої гармоніки вихідної напруги для досить високих f_h визначається за формулою:

$$U_1 \approx K_m U_d. \quad (7)$$

Збільшення значення U_1 , при збереженні якісних характеристик гармонійного складу вихідної напруги, можливе шляхом використання ШІМ із трапецеїдальним і прямокутно-ступінчастим законами керування, а також за рахунок синтезу модуляції (ШІМ із передмодуляцією).

Значення першої гармоніки, при даних видах модуляції, зростає до значень (5-15)% від U_d .

Висновки

Проведене дослідження свідчить, що розвиток методів керування АІН у системах ПЧ-АД пов'язаний із застосуванням різних видів ШІМ, які вимагають лише модифікації алгоритмів управління, орієнтованих на пряме мікропроцесорне управління і зниження необхідної частоти комутації.

Безпосереднє мікропроцесорне управління електроприводами відкриває значні перспективи для розвитку багатофазних силових систем, оскільки дає змогу організувати пов'язане управління на великій кількості фаз, обмежене тільки ресурсами та кількістю каналів управління конкретної мікропроцесорної плати. З урахуванням дроблення потужності за фазами з'являється можливість застосування високошвидкісних ключів, що ще більше розширює можливості застосування складних законів управління в перехідних режимах роботи електропривода суднових електроенергетичних установок.

Перелік використаних джерел:

1. Чехет Э. М., Соболев В. Н., Михальский В. М. Тенденции развития матричных преобразователей для асинхронного электропривода. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск: Проблеми автоматизованого електропривода*. Харків : НТУ «ХПІ», 2005. № 45. С. 32-37.
2. Голубев В. В. Импульсное преобразование переменного напряжения. Київ : Наукова думка, 2014. 247 с.
3. Транзисторные преобразователи с улучшенной электромагнитной совместимостью / Шидловский А. К., Козлов А. В., Комаров Н. С., Москаленко Г. А. Київ : Наукова думка, 2003. 271 с.
4. Corzine K.A. Operation and Design of Multilevel Inverters. University of Missouri – Rolla, 2005. 79 p.
5. Денисов Ю.А. Стабилизаторы постоянного напряжения с широтно-импульсными и частотно-импульсными квазирезонансными преобразователями. Київ : Изд. Института электродинамики НАН Украины, 2001. 146 с.
6. Пивняк Г. Г., Волков А. В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: монография. Днепропетровск : НГУ, 2006. 470 с.
7. Vimal K. Bose. Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends. 2006. 917 p.
8. Носенко В. М. Судовые энергетические установки. Николаев : ФЛН, 2013. 443 с.
9. ДСТУ EN 50160-2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. [Чинний від 2014-10-01]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 32 с.
10. Островерхов М. Я., Сенько В. І., Чибеліс В. І. Імпульсні перетворювачі стабілізованої напруги. Київ : Ліра, 2020. 242 с.

References:

1. E.M. Chekhet, V.N. Sobolev, and V.M. Mykhalskyi, «Tendentsyy razvytyia matrychnikh preobrazovatelei dlia asynkhronnoho elektropryvoda» [«Trends in the development of matrix converters for asynchronous electric drives»], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Tematychnyi vypusk: Problemy avtomatyzovanoho elektropryvoda* – *Bulletin of the National Technical University «KhPI». Thematic issue: Problems of automated electrodrive*, № 45, pp. 32-37, 2005. (Rus.)
2. V.V. Holubev, *Ympulsnoe preobrazovanye peremennoho napriazheniya* [Pulse conversion of alternating voltage]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 2014. (Rus.)

3. A.K. Shydlovskiy, A.V. Kozlov, N.S. Komarov, and H.A. Moskalenko, *Tranzystornie preobrazovateli s uluchshennoi elektromahnytnoi sovmestymosti* [Transistor converters with improved electromagnetic compatibility]. Kyiv, Ukraine: Naukova dumka Publ., 2003. (Rus.)
4. K.A. Corzine, *Operation and Design of Multilevel Inverters*. University of Missouri – Rolla, 2005.
5. Yu.A. Denysov, *Stabylyzatori postoiannoho napriazheniya s shyrotno-ympulsnyimi y chastotno-ympulsnyimi kvazyrezonansnyimi preobrazovateliami* [Constant voltage stabilizers with pulse-width and pulse-frequency quasi-resonant converters]. Kyiv, Ukraine: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine Publ., 2001. (Rus.)
6. H.H. Pyvniak, and A.V. Volkov, *Sovremennie chastotno-rehulyruemie asynkhronnie elektropyvodi s shyrotno-ympulsnoi moduliatsyei: monohrafiya* [Modern frequency-controlled asynchronous electric drives with pulse-width modulation: monograph]. Dnepropetrovsk, Ukraine: NHU Publ., 2006. (Rus.)
7. K. Bimal Bose. *Power Electronics and Motor Drives. Advances and Trends*. 2006.
8. V.M. Nosenko, *Sudovye enerhetycheskiye ustanovky* [Marine power plants]. Nikolaev, Ukraine: FLN Publ., 2013. (Rus.)
9. Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh merezhakh zahalnoho pryznachennia [Characteristics of power supply voltage in general purpose electrical networks], State standart EN 50160-2014, Ministry of Economic Development of Ukraine, 2014. (Ukr.)
10. M.Ya. Ostroverkhov, V.I. Senko, and V.I. Chybelis, *Impulsni peretvoriuvachi stabilizovanoi napruhy* [Pulse converters of stabilized voltage]. Kyiv, Ukraine: Lira Publ., 2020. 242 c. (Ukr.)

Стаття надійшла 17.07.2024

Стаття прийнята 13.08.2024

274 АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.13.07(075.8)

doi: 10.31498/2225-6733.49.2.2024.321399

© Головащенко О.В.*

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ СХЕМ СТРУКТУРИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ ГОТОВНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ МАТЕРІАЛЬНО-ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВІДНОВЛЕННЯ ЇХ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

Для забезпечення високоякісних транспортних послуг автотранспортному підприємству необхідно використовувати надійний рухомий склад, підтримувати його у належному технічному стані та вдосконалювати роботу не лише технічних підрозділів, що займаються обслуговуванням і ремонтом, а й системи матеріально-технічного забезпечення. Одним із ключових інструментів контролю за технічним станом автомобілів під час експлуатації є інформаційний моніторинг. У статті проведено структурний аналіз і синтез можливих схем підтримання технічної готовності транспортних засобів у взаємодії з інфраструктурним середовищем шляхом покращення матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення їх працездатності. Для класифікації схем забезпечення технічної готовності виділено чотири функціональні елементи, які складаються із сукупностей спеціалізованих апаратних засобів і заходів. Для кожного елемента визначено від 2 до 7 технічних варіантів реалізації, охоплюючи 35 ключових морфологічних характеристик системи, що впливають на досягнення загальних цілей її функціонування. Ці характеристики пов'язані з функціями, конструктивними, організаційними чи технологічними рішеннями, а також режимами роботи та способами взаємодії складових елементів. Описано перелік рішень для оперативного контролю й управління технічним станом через показники витрати палива, а також процесів матеріально-технічного обслуговування – від прийому транспортного засобу в ремонт до замовлення запчастин і виконання необхідних робіт в умовах експлуатації. У статті розглянуто дослідження процесу формування структурних схем забезпечення технічної готовності у вигляді морфологічної формули. Результуюча схема, доповнена варіантами реалізації, представлена як ефективний підхід до підвищення технічної готовності транспортних засобів під час їх експлуатації.

Ключові слова: транспортний засіб, морфологічна матриця, ефективність, технічний стан, моніторинг, працездатність, матеріально-технічне забезпечення, експлуатація, система.

O.V. Holovashchenko. Systematization of structure schemes for ensuring the technical readiness of vehicles by improving the material and technical support of the processes of restoring their workability. To provide high-quality transport services, a motor transport enterprise needs to use reliable rolling stock, maintain it in proper technical condition and improve the work of not only technical departments involved in maintenance and repair, but also the logistics system. One of the key tools for monitoring the technical condition of vehicles during operation is information monitoring. The article provides a structural analysis and synthesis of possible schemes for maintaining the technical readiness of vehicles in interaction with the infrastructure environment by improving the logistics of the processes of restoring their operability. To classify the schemes for ensuring technical

* аспірант, Національний транспортний університет, м. Київ, ORCID: 0009-0005-7729-5462, venger.a79@gmail.com

readiness, four functional elements have been identified, which consist of sets of specialized hardware and measures. For each element, from 2 to 7 technical implementation options have been identified, covering 35 key morphological characteristics of the system that affect the achievement of the general goals of its functioning. These characteristics are related to functions, constructive, organizational or technological solutions, as well as operating modes and methods of interaction of the constituent elements. A list of solutions for operational control and management of technical condition through fuel consumption indicators, as well as material and technical maintenance processes - from accepting a vehicle for repair to ordering spare parts and performing the necessary work in operating conditions is described. The article considers the study of the process of forming structural schemes for ensuring technical readiness in the form of a morphological formula. The resulting scheme, supplemented by implementation options, is presented as an effective approach to increasing the technical readiness of vehicles during their operation.

Keywords: *vehicle, morphological matrix, efficiency, technical condition, monitoring, operability, material and technical support, operation, system.*

Постановка проблеми. В інженерно-технічному середовищі автотранспортних підприємств під запасними частинами розуміють комплекс деталей і матеріалів, які становлять економічний ресурс і можуть тимчасово не використовуватись. У контексті системного підходу цей ресурс розглядається як резерв, що забезпечує підвищення технічної готовності транспортних засобів (ТЗ), але не перебуває у постійній експлуатації. Сучасні автомобілі є об'єктами, які складаються в середньому з близько 70-80 тисяч елементів, які мають показники надійності, що суттєво відрізняються. На якість транспортних засобів, насамперед, впливає своєчасне задоволення періодичної необхідності заміни несправних елементів на підприємствах з технічного обслуговування (ТО) і ремонту. Однак ряд недоліків у функціонуванні вже створених систем управління складом запасних частин в організаціях, які обслуговують та експлуатують автомобільний транспорт, продовжує існувати. Найчастіша проблема – переповненість складів, що супроводжується дефіцитом одних деталей та надлишком інших.

Причиною найчастіше є те, що особа, яка приймає рішення, насамперед не бачить кінцевого результату введення того чи іншого параметра, крім того, не може точно прогнозувати потребу в запасах. Отже, його дії непослідовні та мають евристичний характер. Проблема полягає у відсутності науково обґрунтованих методик управління складами запасних частин (ЗП) та комплектуючих, що функціонують із достатньою ефективністю з урахуванням оптимізації параметрів. Не менш проблематична і відсутність інструментів узгодження між параметрами стану ТЗ, систем керування складами, менеджерськими впливами на них та результативністю ефективності їх роботи. Вирішення цієї суперечності між технічним станом ТЗ, зростанням ефективності процесу поставки на підприємства запасних частин і спробами скоротити витрати, пов'язані з їх зберіганням, і стало причиною виникнення даної роботи. Виходячи з вищесказаного, не підлягає сумніву, що пошук засобів підвищення ефективності моніторингу за станом ТЗ, функціонування підприємств, що спеціалізуються на обслуговуванні, ремонті та експлуатації автомобілів на базі, скорочення витрат на складське зберігання запасних частин та усунення їхнього дефіциту є актуальною проблемою.

Останні роки у державі спостерігається стабільна тенденція збільшення засобів транспорту, чисельність автомобілів збільшується приблизно на 6-10% на рік. Стихийний ринок автотранспорту, що сформувався ще на початку 2000-х років, поступово став цивілізованим, для чого сформовані різнобічні та систематичні контакти між учасниками ринку. Поряд з активним зростанням доходів громадян спостерігається і стабільне збільшення попиту як на нові, так і на вживані автомобілі, що, знову ж таки, активізує зростання ринку, що надають послуги у сфері обслуговування і ремонту автомобілів. Одна з ознак якісного сервісу – грамотна організація його виробничо-технічної бази. Основними завданнями матеріально-технічного забезпечення є такі: узгодження фактичного технічного стану ТЗ з рівнем запасів на складах для проведення ТО і ремонту; гарантування оптимального обсягу запасів і забезпечення шляхів їх поповнення; вдосконалення процесів замовлення, закупівлі та постачання комплектуючих.

Недостатнє виконання цих завдань може призвести до серйозних проблем, зокрема:

тривалих простоїв ТЗ у ремонті, що ускладнює роботу виробничих зон і потребує додаткових площ для зберігання автомобілів, які очікують обслуговування; створення черг на ремонт; збільшення кількості відмов через брак запасних частин; зниження конкурентоспроможності підприємства і популярності певних марок автомобілів.

Аналіз факторів, що впливають на витрати запасних частин під час експлуатації, показав залежність потреб підприємства від конструктивних, експлуатаційних, технологічних та організаційних чинників. Основними серед них є інтенсивність використання, надійність транспорту, структура та віковий склад автопарку, а також пробіг транспортних засобів.

Вплив запасних частин на технологічну надійність визначається співвідношенням між часом заміни несправного вузла (або деталі) та допустимою тривалістю простою ТЗ. Ефективне управління запасами дозволяє уникнути надмірного використання оборотного капіталу на активи, які не беруть участі у виробничому процесі. Розв'язання цих проблем залежить від попиту, системи постачання та стратегії управління запасами.

Впровадження науково обґрунтованої системи управління запасами забезпечить підвищення ефективності роботи підприємств технічного обслуговування і ремонту ТЗ. Отже, дослідження, спрямовані на вдосконалення матеріально-технічного забезпечення, є надзвичайно актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В даний час надання якісних транспортних послуг автотранспортним підприємством можливе лише за умови використання надійного рухомого складу [1-6]. Підтримка його у справному стані потребує вдосконалення роботи не лише підрозділів, які займаються технічним обслуговуванням та ремонтом, а й системи матеріально-технічного забезпечення. Ефективність експлуатації рухомого складу залежить від організації системи матеріально-технічного забезпечення автомобільного транспорту. Поліпшення процесу забезпечення запасними частинами є одним із ключових напрямків підвищення технічної готовності автопарку. Однією з найважливіших складових цієї системи виступає підсистема управління запасами запасних частин.

Запасні частини є елементами виробу, призначені для заміни аналогічних компонентів з метою підтримки працездатності або справності виробу. Управління запасами запасних частин в умовах ринку пов'язане з нормуванням, контролем та регулюванням їх кількості та асортименту. Визначення оптимального обсягу та номенклатури запасних частин вважається пріоритетним завданням для підвищення технічної готовності рухомого складу та раціонального використання ресурсів. Сучасні методи прогнозування потреби у запасних частинах не завжди відповідають поточним вимогам, що пов'язано зі зростанням різноманітності автопарку та нестачею інформаційної бази. Тому вдосконалення забезпечення запасними частинами можливе через створення нових або адаптацію існуючих методів прогнозування. Це дозволить покращити матеріально-технічне забезпечення автотранспортного підприємства.

Керування експлуатацією транспортних засобів ґрунтується на аналізі даних, отриманих у процесі моніторингу, а також прогнозуванні основних характеристик. На технічний стан автомобіля значно впливають умови експлуатації та зовнішнє середовище. Згідно з дослідженнями [1, 4, 5], ці чинники можуть спричинити непередбачуваність та варіативність вихідних даних і ситуацій використання транспортного засобу. Інструменти моніторингу, розташовані як у самому транспортному засобі, так і в інфраструктурі, формують органічну систему, яка забезпечує отримання максимально точних даних про технічний стан та експлуатацію автомобіля.

Складнощі полягають у застосуванні новітніх технологій автомобілебудування, значній розгалуженості транспортних шляхів, складності умов експлуатації та специфіці дорожньої інфраструктури. Поєднання різноманітних інструментів і технологій у комплексах апаратного забезпечення інформаційно-системного моніторингу (ІСМ) дозволяє отримувати достовірну інформацію для забезпечення ефективного використання транспортних засобів. Крім цього, основою розробки вдосконаленого способу забезпечення підвищення технічної готовності транспортних засобів в умовах експлуатації є облік комплексного впливу дієвих чинників. Спосіб повинен відповідати низці вимог, включаючи: облік пробігу та терміну експлуатації автомобілів як ключових факторів; забезпечення коефіцієнта технічної готовності рухомого складу лише на рівні 0,9-0,95; скорочення часу простою автотранспорту на ремонті; зниження витрат на придбання та зберігання запасних частин; простоту реалізації у практичній площині. Вважаємо, що

оптимальним підходом для систематизації можливих схем реалізації є використання методу морфологічного аналізу, або методу морфологічного ящика.

Метод морфологічного аналізу комбінує класифікацію та узагальнення, зосереджуючи увагу на розкладанні проблеми на складові частини, пошуку перспективних елементів для вирішення завдань [4, 5]. Цей метод передбачає не лише декомпозицію, а й аналіз функціональної значимості елементів, їхнього впливу на загальну проблему та зв'язок із зовнішнім середовищем. У межах методу створюється морфологічна матриця, яка відображає всі аспекти проблеми та підходи до їх вирішення [6-18]. Ефективність морфологічного аналізу [12, 13] була продемонстрована його автором Ф. Цвіккі на прикладі розробки реактивних двигунів [10, 11, 14-18]. Сучасні електронні системи, які забезпечують дистанційний моніторинг технічного стану транспортних засобів, дозволяють контролювати роботу вузлів та агрегатів у реальному часі. Вони виконують діагностику стану та процесів, інформуючи оператора про будь-які відхилення [1-5]. Запропонований підхід інтегрує інформаційну взаємодію між транспортним засобом, оператором, умовами експлуатації та дорожньою інфраструктурою [19].

Таким чином, завдання удосконалення методу формування кількості запасних частин полягає у розробці підходу, який дозволяє прогнозувати граничний стан деталей, агрегатів та вузлів, визначати необхідну кількість запасних частин та своєчасно забезпечувати автотранспортне підприємство з мінімальними витратами на їх закупівлю та зберігання.

Метою дослідження є систематизація схем структури забезпечення технічної готовності транспортних засобів в умовах експлуатації шляхом удосконалення матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення їх працездатності за допомогою формування морфологічної матриці.

Виклад основного матеріалу. Питання матеріально-технічного забезпечення включає організацію безперебійного постачання, ефективне використання ресурсів, оптимізацію запасів матеріалів, комплектуючих і обладнання для транспорту. Воно також передбачає вдосконалення нормування, планування, обліку, зберігання та доставки ресурсів до місць їх використання [20-27]. Для забезпечення роботи транспортних засобів, їх технічного обслуговування та ремонту необхідні матеріали, інвентар, запасні частини та обмінний фонд обладнання. Нестача ресурсів може спричинити простої транспорту, тоді як їх надлишок призводить до неефективного використання коштів і зростання оборотних фондів підприємств. Отже, оптимізація запасів ресурсів є важливим завданням технічного обслуговування і ремонту транспортних засобів [20-27].

Науково-прикладна проблема забезпечення технічної готовності транспорту та вдосконалення матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення їх працездатності в умовах змінної експлуатації вирішується завдяки впровадженню оперативного контролю на базі інтелектуальних транспортних систем, що інтегрують прикладні підходи [27-39]. Перший підхід зосереджений на оперативному контролі за технічним станом транспорту через моніторинг, зокрема оптимізацію витрат палива та контроль викидів. Дослідження в напрямках паливної ефективності, екологічності та застосування інтелектуальних систем базуються на стандартизованій методології транспортної науки [28-31]. Другий підхід орієнтований на вдосконалення матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення працездатності за змінних умов експлуатації. Використання інтелектуальних транспортних систем дозволяє значно підвищити ефективність забезпечення технічної готовності транспорту.

Для реалізації єдиного підходу необхідно гармонійно об'єднати обидва методи в інтегровану концепцію. У процесі вирішення поставлених завдань дослідження базується на системному підході, який трактується як взаємодія пов'язаних елементів, що спільно спрямовані на досягнення визначеної в статті мети [1-6, 19-39]. На різних етапах виконання роботи, зокрема в частині теоретичного дослідження, застосовуватимуться наступні методи і підходи: розрахунок нормативної витрати палива транспортного засобу, методи морфологічного аналізу, методи математичного аналізу; математичної статистики, теорії множин, теорії інформації, математичної статистики, теорії управління; імітаційного та математичного моделювання; теорії масового обслуговування та управління запасами. Експериментальні методи дослідження передбачають використання методів: планування експерименту та статистичної обробки отриманих даних, які базуються на теорії похибок, на аналізі невизначеностей та на дорожніх випробуваннях в реальних умовах експлуатації.

Головна мета дослідження полягає у вдосконаленні матеріально-технічного забезпечення для підвищення технічної готовності транспортних засобів через зниження паливних витрат ($Q(G_{пт})$) під час експлуатації. Це досягається врахуванням як об'єктивних, так і суб'єктивних факторів. Об'єктивні фактори пов'язані з нормуванням витрат палива на маршруті (M_{i1}), повною масою ТЗ (M_{i2}), а також умовами експлуатації (M_{i3}), які включають дорожні (M_{13}), транспортні (M_{23}), природно-кліматичні (M_{33}) умови та рівень культури праці (M_{43}). Суб'єктивні аспекти залежать від технічного стану ТЗ (T_{ST3}) і режимів (стилю) управління ТЗ (P_{DU}).

Функціонал також включає заходи, спрямовані на підтримку працездатності (заходи матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення ТЗ): від процесів приймання у технічне обслуговування і (або) ремонт ($Pr(t)$) до забезпечення матеріально-технічної бази через управління складом і замовленням запчастин ($S_{ZA(t)}$). Ці процеси залежать від культури праці (M_{43}), тривалості виконання завдань (t) та кількості необхідних запчастин (N_Z) для відновлення ТЗ.

Структуру функціоналу можна подати у вигляді:

$$\begin{cases} Q(G_{пт}) = F_t((M_{i1}, M_{i2}, M_{i3}(M_{13}, M_{23}, M_{33}, M_{43})); (T_{ST3}, P_{DU})) \rightarrow \max \\ G_{пт} \rightarrow \min \\ Pr(t) = F(t, M_{43}) \rightarrow \min \\ S_{ZA}(t) = F(t, N_Z, M_{43}) \rightarrow \min \end{cases} \quad (1)$$

Особливість представленого функціоналу полягає в одночасному вирішенні мінімаксної задачі: максимізація паливної економічності транспортних засобів категорії N3 за експлуатаційних умов ($Q(G_{пт})$), при цьому прагнучі до мінімізації значень $G_{пт}$. Для досягнення цих параметрів враховуються конструктивні особливості транспортного засобу, його технічний стан, експлуатаційні умови та режими управління. Кожен із зазначених факторів має свої специфічні характеристики. Організаційні заходи щодо матеріально-технічного забезпечення відновлення працездатності транспортних засобів повинні бути спрямовані на мінімізацію часу та витрат, пов'язаних із зберіганням і використанням запасних частин.

Для впровадження методів дистанційного моніторингу необхідно врахувати особливості контролю технічного стану та визначити ключові критерії для підвищення ефективності виконання завдань у змінних умовах експлуатації із застосуванням інтелектуальних транспортних систем (ITS) [27-39]. Експериментальні дослідження роботи вантажних транспортних засобів під час перевезення вантажів у таких умовах із використанням ITS дадуть змогу систематизувати результати моніторингу для забезпечення оптимального технічного стану та економії пального. Окрему увагу слід приділити аналізу діяльності ремонтних служб і складів із використанням імітаційного моделювання та розробити рекомендації для впровадження отриманих результатів на практиці діючих підприємств.

Запропонований підхід охоплює створення загальної методики досліджень, класифікацію можливих рішень для забезпечення технічної готовності транспортних засобів та вдосконалення матеріально-технічної бази для відновлення їх працездатності за змінних експлуатаційних умов. Для цього застосовуються засоби оперативного контролю, які базуються на технологіях ITS, і метод морфологічного аналізу (табл. 1).

Методика створення морфологічної матриці передбачає розподіл технічної системи на ключові функціональні елементи (морфологічні ознаки), кожна з яких описується відповідними технічними характеристиками. Досягти поставлених цілей можливо шляхом чіткого визначення режимів роботи системи, взаємодії компонентів та механізмів, а також розробки основних функціональних елементів і їх складових [1-6, 19-32]. Головні заходи (табл. 1) включають оснащення транспортних засобів і відповідної інфраструктури засобами оперативного моніторингу та управління, а також оптимізацію матеріально-технічного забезпечення процесів обслуговування і ремонту. Це передбачає організацію приймання, складування і замовлення запасних частин [24-27].

Таблиця 1

Запропонована морфологічна матриця структури забезпечення технічної готовності транспортних засобів в умовах експлуатації шляхом удосконалення матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення їх працездатності

Оснащення транспортного засобу обладнанням для виконання контролю витрати палива в умовах експлуатації	1. Повна маса ТЗ	1.1. До 1,2 т.	1.2. Від 1,2 до 2,0 т.	1.3. Від 2,0 до 8,0 т.	1.4. Від 8,0 до 14,0 т.	1.5. Від 14,0 до 20,0 т.	1.6. Від 20,0 до 40,0 т.	1.7. Більше 40,0 т.	
	2. Наявність в ТЗ OBD-рознімання	2.1. Транспортний засіб обладнаний діагностичним OBD-розніманням			2.2. Транспортний засіб не обладнаний діагностичним OBD-розніманням				
	3. Засоби моніторингу параметрів стану ТЗ	3.1. Штатне обладнання ТЗ для моніторингу параметрів технічного стану	3.2. Трекер-комунікатор в ТЗ для моніторингу параметрів технічного стану		3.3. OBD – сканер в ТЗ для моніторингу параметрів технічного стану	3.4. Трекер-комунікатор та OBD – сканер в ТЗ для моніторингу параметрів технічного стану			
	4. Оснащення ТЗ ЕБУ і штатними датчиками	4.1. Двигун і ТЗ оснащені ЕБУ і штатними датчиками			4.2. Двигун і ТЗ оснащені ЕБУ і штатними датчиками				
	5. Оснащення ТЗ пристроями контролю витрати палива	5.1. Здійснення контролю витрати палива ТЗ за допомогою бортових систем контролю через CAN-шину		5.2. Здійснення контролю витрати палива ТЗ за допомогою датчика рівня палива		5.3. Здійснення контролю витрати палива ТЗ за допомогою лічильника-витратоміра		5.4. Здійснення контролю витрати палива ТЗ за допомогою пристроїв вимірювання маси палива	
Оснащення інфраструктури засобами для виконання контролю паливної економічності транспортного засобу	6. Умови експлуатації транспортного засобу в ITS	6.1. Відслідковування дорожніх умов експлуатації	6.2. Відслідковування транспортних умов експлуатації	6.3. Відслідковування атмосферно-кліматичних умов експлуатації	6.4. Відслідковування культури експлуатації	6.5. Відслідковування всіх перерахованих в п.п. 6.1 – 6.4 умов експлуатації транспортного засобу		6.6. Не відслідковуються умови експлуатації транспортного засобу	
	7. Використання інформації з / від оснащення інфраструктури і додаткового програмного забезпечення	7.1. Використання інформації від засобів транспортної інфраструктури		7.2. Використання інформації від засобів інфраструктури автомобільних доріг		7.3. Спільне використання інформації від засобів транспортної інфраструктури і інфраструктури автомобільних доріг		7.4. Не використання інформації від засобів транспортної інфраструктури і інфраструктури автомобільних доріг	
	8. Наявність інформаційно-комунікаційних технологій для забезпечення функціонування учасників руху (ТЗ)	8.1. Інформаційно-комунікаційні технології для забезпечення функціонування учасників руху (ТЗ) відсутні		8.2. Технологія I2V	8.3. Технологія I2P	8.4. Технологія I2X		8.5. Комбінований варіант	
	9. Умови експлуатації транспортного засобу в ITS	9.1. Моніторинг дорожніх умов	9.2. Моніторинг транспортних умов	9.3. Моніторинг атмосферно-кліматичних умов	9.4. Моніторинг культури експлуатації	9.5. Моніторинг всіх перерахованих в п.п. 9.1 – 9.4 умов експлуатації транспортного засобу		9.6. Не виконання моніторингу умов експлуатації транспортного засобу	
	10. Стан операторів системи	10.1. Щозмінний одноразовий медичний контроль	10.2. Система контролю пульсу операторів	10.3. Система контролю тиску операторів	10.4. Система контролю стресу операторів		10.5. Система контролю втоменості операторів		
	11. Режим роботи / взаємодії операторів системи	11.1. Робота на основі кінецьових звітів операторів (Off-line)		11.2. Взаємодія операторів за допомогою засобів мобільного/радіо зв'язку		11.3. Взаємодія операторів в умовах інформаційної системи диспетчерського управління (on-line)		11.4. Взаємодія операторів в умовах інформаційної аналітичної керуючої системи в ITS	

Продовження таблиці 1

Відповідні заходи в частині матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення працездатності ТЗ (в частині приймання в ТО / ремонт. Виконання ТО / ремонту)	12. Вибір варіанта проведення робіт	12.1. Повна відповідність ТО (виробити відповідне ТО-1, ТО-2 тощо),		12.2. Повна відповідність ремонту (плановий, аварійний тощо);			12.3. Вибірковий режим		
	13. Параметри обстеження перед прийомкою	13.1. Всі за списком відповідно запиту;	13.2. Допускається до роботи;	13.3. Ремонт (власними силами, на підприємстві, на основній базі тощо);	13.4. Виклик сервісного інженера;	13.5. Фото	Окремі складові: 13.6. Зовнішній вигляд; 13.7. Двигун; 13.8. Кузов, рама, кабіна; 13.9. Трансмсія; 13.10. Електрообладнання; 13.11. Додаткове обладнання; 13.12 Шини та диски;		
	14. Обстеження перед проведенням ТО і/або ремонту:	14.1. Роботи проводяться на основній базі підприємства;			14.2. Виклик сервісу для проведення обстеження;		14.3. Роботи проводяться власними силами в режимі «Аварійний ремонт»		
	15. Фіксація наряду:	15.1. Перелік усіх ТЗ зі статусом Ремонт;	15.2. Перелік усіх ТЗ зі статусом ТО;	15.3. Постановка ТЗ в ТО/ремонт за планом;	15.4. Постановка ТЗ в ремонт позапланово;	15.5. Повний доступ до всіх відкритих нарядів;	15.6. Повний доступ до всіх створених і відправлених нарядів/ документів (Архів)		
	16. Оформлення наряду на постановку ТЗ в ремонт /ТО:	16.1. Фіксація дати постановки ТЗ в ремонт (ТО);	16.2. Фіксація посадовця при постановці ТЗ в ремонт (ТО);	16.3. Наявність наряду;	16.4. Відсутність наряду;	16.5. Постановка ТЗ в ремонт (ТО) за планом	16.6. Всі перераховані операції		
	17. Постанова ТЗ на ТО / на ремонт:	17.1. Постанова ТЗ на плановий ремонт,			17.2. Постанова ТЗ на аварійний ремонт,		17.3. Постанова ТЗ на технічне обслуговування		
	18. ТО і ремонт:	18.1. Планове,			18.2. Аварійне (позапланове),		18.3. Зміна вибору		
	19. Фіксація (вибір варіантів для вузла)	19.1. Фото загальне,	19.2 Фото вузла,		19.3. Фото приладової панелі (спідометр, мотогодини),		19.4. Завантаження інформації з архіву	19.5. Всі опції	
	20. Фіксація (вибір варіантів для ТЗ)	20.1. Фото загальне,	20.2. Фото вузла,		20.4. Фото приладової панелі (спідометр, мотогодини),		20.4. Завантаження інформації з архіву	20.5. Всі опції	
	21. Постанова ТЗ в ремонт:	21.1. З нарядом – Аварійний + ТО;				21.2. Без наряду – Плановий + ТО			
	22. Аварійний ремонт / Плановий (види звітності):	22.1. Тип ТЗ / вузла;	22.2. Фото загальне;		22.3. Фото приладової панелі (спідометр, мотогодини);		22.4. Фото вузла до ремонту;	22.5. Фото вузла після ремонту;	22.6. Всі опції
	23. ТО (види звітності):	23.1. Тип ТЗ / вузла;	23.2. Фото загальне;		23.3. Фото приладової панелі (спідометр, мотогодини);		23.4. Фото масляного фільтру;	23.5. Фото фільтруючого елемента;	23.6. Всі опції
	24. Роботи з нарядом (інформація):	24.1 Послідовно всі за переліком;	За варіантами окремі: 24.2. Відкриття, 24.3. Закриття, 24.3. Кількість робітників, задіяних у наряді;				24.4. Додавання запчастин в новий наряд		
	25. Нормативи часу в наряді:	25.1. Всі за переліком;	За варіантами окремо: 25.2. Кількість (об'єм) виконаних операцій; 25.3. Редагування відпрацьованого часу; 25.4. Норма часу на 1 операцію; 25.5. Редагування технологічних операцій та робітників; 25.6. Закриття наряду						

Продовження таблиці 1

Відповідні заходи в частині матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення працездатності ТЗ (в частині роботи складу / замовлення запчастин)	26. ТЗ в ремонті. Робота з нарядом в частині запчастин:	26.1. Оновлення залишків запчастин на складі.	26.2. Створити склад.	26.3. Переміщення запчастин з головного складу.	26.4. Створення заявки на поставку запчастин.	26.5. Пошук номенклатури запчастин.	26.6. Ідентифікація номенклатури шляхом сканування.		
	27. ТЗ в ремонті. Робота з нарядом в частині запчастин (в частині складу):	27.1. Визначення кількості запчастин, необхідних для ремонту;	27.2. Кількість ЗЧ по ремонту = Необхідна кількість – Кількість в документах складу;	27.3. Наявність запчастин на інших складах;	27.4. Кількість запчастин на складі підприємства;	27.5. Кількість ЗЧ в створених документах на переміщення з головного складу;	27.6. Кількість ЗЧ в створених заявках на поставку		
	28. ТЗ в ремонті. Робота з нарядом в частині запчастин (реакція в частині складу):	28.1. Обрати ЗЧ під ремонт;		28.2. Додати ЗЧ вручну/Сканувати QR,	28.3. Вручну за артикулом або назвою;		28.4. Додавання ЗЧ скануванням QR коду		
	29. ТЗ в ремонті. Робота з нарядом в частині запчастин (Обираємо необхідну ЗЧ, вказуємо необхідну кількість. Редагування кількості, та отримання інформації по залишках.):	29.1. Інформація складу, коли оновлені залишки.		29.2. Інформація за всіма підприємствами.	29.3. Оновлення залишків після всіх операцій.	29.4. Ручне редагування кількості в 2-х варіантах (резервування запису)			
	30. ТЗ в ремонті. Робота з нарядом в частині запчастин (Запроси на ЗЧ зі свого складу, після відправки на загальний сервер):	30.1. Робота при відсутності ЗЧ;	30.2. Повторне створення наявності ЗЧ на складі.	30.3. Фіксація відправлення ЗЧ.	30.4. Реакція програми про отримання ЗЧ на склад (Запросити ЗЧ зі свого складу, можливо лише якщо заведено однойменний Склад=МВО, у батьківській теці довідника Склади NNN000002 (МВО) матеріально-відповідальні особи).				
	31. ТЗ в ремонті. Робота з нарядом в частині запчастин (Склад). Смартфон Комірного МОЛ за яким закріплено Склад на якому існують залишки ЗЧ. Створено документ переміщення ЗЧ, в подальшому видача по групі номенклатур «Запасні частини», буде заблокована в Меню склад і доступне лише за попереднім запитом під ремонт:					31.1. Доступно	31.2. Не доступно		
	32. ТЗ в ремонті. Робота з нарядом в частині запчастин (Заявка на закупівлю). Створення Заявки на Закупівлю - при відсутності будь-якої з / ч в необхідній кількості, в наявності, на складі, видається оповіщення користувачеві у вигляді запиту про продовження формування обраного виду документа, а також інформація при наявності в Холдингу:					32.1. Створення заявки на закупівлю;		32.2. Залишків достатньо на складі або потреба в ремонті вичерпана.	
	33. ТЗ в ремонті. Робота з нарядом в частині запчастин (Закриття ремонту). Закрити ремонт - відкриває чек-лист закриття ремонту, в залежності від видів ремонту. Після відправки документа на Портал - статус техніки змінюється на робочий і її можна ставити в наряд на роботу техніки:			33.1. Розміщення фото / вибір фото з Галереї або додатка.	Ремонт: Фото вузла після ремонту / ТО: 33.2. Фото масляного фільтру; 33.3. Фото фільтруючого елемента;		33.4. Встановлення часу завершення ремонту/ТО.	33.5. Всі опції	
	34. ТЗ в ремонті. Робота з нарядом (Оформлення таблиць робочого часу). Табелю робочого часу. Табелю на Порталі закривається два рази на місяць відповідальним співробітником, після закриття автоматично генеруються Відрядні наряди в 1С. Варіанти групування звіту:					34.1. За ТЗ;	34.2. За робітником;	34.3. За операцією.	34.5. Всі опції
	35. Загальна інформація щодо завершення робіт:	Завершені роботи: 35.1 Перенести на Сервер; 35.2. Доповнити і перенести на сервер; 35.3. Доповнити і залишити до завершення.			Не завершені роботи: 35.4. Перенести на Сервер; 35.5. Доповнити і перенести на сервер; 35.6. Доповнити і залишити до завершення.				

Було сформовано список можливих варіантів (від 2 до 7) технічної реалізації для 35 ключових морфологічних характеристик функціональних елементів системи, що впливають на досягнення загальних цілей її функціонування. Кожна з цих морфологічних характеристик визначається відповідною функцією, конструктивним, організаційним чи технологічним рішенням або системою, режимом роботи та станом, а також формою взаємодії складових частин. Від цього залежить вибір найоптимальнішого способу вирішення завдань оперативного контролю, управління технічним станом через витрати палива транспортного засобу, а також забезпечення процесів відновлення працездатності шляхом матеріально-технічного обслуговування – від прийому в ТО чи ремонт до виконання відповідних робіт, функціонування складу та замовлення запчастин.

Для розробки базової морфологічної формули інформаційної системи оперативного моніторингу технічного стану та економії пального транспортних засобів у взаємодії з інфраструктурою було визначено основні характеристики функціональних елементів, які називають морфологічними ознаками. Для кожної з цих ознак створено максимально повний, на думку автора, перелік відповідних технічних варіантів (альтернатив). Кожна з 35 морфологічних ознак отримала опис ключових властивостей: класифікації, інфраструктурного оснащення, комплектування транспортних засобів, специфіки технології прийому на обслуговування і ремонт, а також роботи складу та процесу замовлення запчастин. Усе це спрямовано на досягнення основної мети функціонування в умовах експлуатації досліджуваної системи.

Морфологічна формула системної взаємодії транспортного засобу (на прикладі вантажного автомобіля DAF XF 105.460) із інфраструктурою, ремонтними підприємствами, складом та технологіями виконання показана в (2), з урахуванням основних параметрів впливу ключових факторів:

$$\begin{aligned}
 & \{X1.6; X2.1; X3.4; X4.1; X5.2\} + (X6.5; X7.3; X8.2; X9.5; X10.1; X11.4) \\
 & + (X12.2; X13.1; X14.1; X15.1; X16.6; X17.1; X18.1; X19.5; X20.5; \\
 & X21.2; X22.6; X23.6; X24.1; X25.1) + (X26.1; X27.1; X28.1; X29.1; \\
 & X30.2; X31.1; X32.1; X33.5; X34.5; X35.2)\}
 \end{aligned} \tag{2}$$

Таким чином, у формулі показано, що це транспортний засіб, чия повна маса в базовій версії (X1.6) становить від 20,0 до 40,0 т, а у варіативній (X1.7) – понад 40,0 т. Він оснащений OBD-роз'ємом (X2.1), трекером-комунікатором і OBD-сканером для моніторингу стану (X3.4). За необхідності можуть бути встановлені окремо трекер-комунікатор (X3.2) або OBD-сканер (X3.3). Двигун обладнаний штатними датчиками й електронним блоком управління (ЕБУ) (X4.1),

а також датчиком рівня палива (X5.2). Є можливість встановлення систем контролю витрати палива через CAN-шину (X5.1). Транспортний засіб інтегрується з інфраструктурними засобами для моніторингу дорожніх (X6.1), транспортних (X6.2), атмосферно-кліматичних (X6.3) умов і культури експлуатації (X6.4). Інформація може надходити як із транспортної й дорожньої інфраструктури одночасно (X7.3), так і окремо: лише з транспортної (X7.1), лише з дорожньої (X7.2) або без залучення будь-якої інфраструктури (X7.4). Для забезпечення функціонування систем використовуються інформаційно-комунікаційні технології на базі I2V (X8.2) чи комбінований варіант (X8.5).

Моніторинг може охоплювати всі умови комплексно (X9.5) або окремо: дорожні (X9.1), транспортні (X9.2), атмосферно-кліматичні (X9.3). Додатково передбачений медичний контроль операторів: щозмінний одноразовий огляд (X10.1), системи контролю пульсу (X10.2), тиску (X10.3), рівня стресу (X10.4) і втомленості (X10.5). Взаємодія операторів реалізується через інформаційно-аналітичну керуючу систему (ITS) (X11.4), кінцеві звіти (off-line) (X11.1), мобільний чи радіозв'язок (X11.2) або в режимі онлайн-диспетчеризації (X11.3).

Для забезпечення матеріально-технічного супроводу процесів відновлення функціональності транспортних засобів, включаючи приймання на технічне обслуговування чи ремонт, виконання самого ТО/ремонту, роботу складу та замовлення запчастин, передбачені наступні заходи. Вибір варіанта проведення робіт здійснюється з урахуванням повної відповідності типу ремонту (плановий, аварійний тощо) (X12.2). Перелік робіт для попереднього огляду визначається відповідно до запиту (X13.1), а огляд перед ТО чи ремонтом проводиться на основній базі підприємства (X14.1). Наряд на ремонт фіксується із зазначенням усіх транспортних засобів у статусі «Ремонт» (X15.1). Процедура оформлення наряду на постановку в ремонт/ТО передбачає виконання всіх операцій, визначених регламентом (X16.6). Постанова транспортних засобів на плановий ремонт здійснюється за графіком (X17.1), а виконання ТО та ремонту проводиться в рамках запланованих заходів (X18.1). Для фіксації вибору варіантів ТО/ремонту вузлів і ТЗ у цілому передбачено реалізацію всіх технологічних опцій (X19.5, X20.5).

Постанова транспортного засобу в ремонт може здійснюватися без наряду, у плановому режимі з технічним обслуговуванням (X21.2). Фіксація аварійного чи планового ремонту в частині звітності також охоплює всі технологічні опції (X22.6, X23.6). Робота з нарядом у частині запланованих операцій здійснюється відповідно до технологічного переліку, а нормування часу проводиться послідовно за цим переліком (X24.1, X25.1). Для нарядів, пов'язаних із запчастинами, передбачено оновлення залишків на складі (X26.1), визначення необхідної кількості запчастин (X27.1), вибір ЗЧ під ремонт (X28.1) і використання актуальної інформації про залишки (X29.1). Запити на ЗЧ обробляються через загальний сервер, із повторним формуванням залишків на складі (X30.2). Доступ до складу здійснюється через відповідний режим (X31.1), а заявки на закупівлю формуються автоматизовано (X32.1). Закриття ремонту включає всі регламентовані дії (X33.1), а таблиць робочого часу оформлюється за завершення робіт (X34.1). Загальна інформація про завершення робіт переноситься на сервер у режимі доповнення (X35.2).

Морфологічний метод дозволяє структурувати всі варіанти робіт, формуючи схеми ознак із властивими їм показниками. Аналізуючи структуру за допомогою морфологічної матриці, можна визначити всі можливі схеми взаємодії транспортних засобів з інфраструктурою транспорту і інфраструктурою сервісного і ремонтного виробництва та складу. Кількість таких схем у заданих умовах складає:

$$N = 7 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 5 \cdot 6 \cdot 5 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 2 \cdot 6 \cdot 6 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 2 = 5,617 \cdot 10^{20} \text{ варіантів} \quad (3)$$

Отриману схему структури забезпечення технічної готовності транспортних засобів шляхом удосконалення матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення їх працездатності з варіантами її реалізації можливо розглядати як дієвий спосіб забезпечення підвищення технічної готовності транспортних засобів в умовах експлуатації, які на сьогодні складають основу парку вантажних і легкових транспортних засобів.

Висновки

Забезпечення технічної готовності транспортних засобів шляхом оптимізації матеріально-технічного забезпечення процесів їх відновлення може бути ефективно організоване на основі впорядкування структурних схем цього процесу. Проведено аналіз і розроблено варіанти структурних схем забезпечення технічної готовності транспортних засобів у взаємодії з інфраструктурою, удосконаливши матеріально-технічну базу для відновлення їх працездатності. Для впорядкування таких схем було виділено 4 функціональні елементи, які представляють собою сукупність спеціалізованого обладнання та заходів. Для кожного елемента розроблено від 2 до 7 можливих технічних рішень, що враховують 35 ключових морфологічних характеристик, які впливають на ефективність функціонування системи. Виділені морфологічні характеристики залежать від функцій, конструктивних особливостей, організаційних чи технологічних рішень, режимів роботи, стану, а також способів взаємодії компонентів системи. Сформовано перелік рішень для завдань оперативного контролю, управління технічним станом через витрати палива, а також для організації процесів відновлення працездатності – від приймання транспортного засобу на обслуговування або ремонт до виконання відповідних робіт, функціонування складів і замовлення запасних частин в умовах експлуатації. Процес формування структурних схем забезпечення технічної готовності транспортних засобів представлено у вигляді морфологічної формули. Розроблену схему з варіантами реалізації можна вважати ефективним способом підвищення технічної готовності транспортних засобів у реальних умовах експлуатації.

Перелік використаних джерел:

1. Інтелектуальні системи моніторингу транспорту: монографія / В.П. Волков и др. Харків : Вид-во НТМТ, 2015. 246 с.
2. The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. 2018-01-1773. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
3. Information Security Risk Management of Vehicles / D. Klets et al. *SAE Technical Paper*. 2018. 2018-01-0015. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0015>.
4. Матейчик В. П. Системний підхід до аналізу структурних схем енергоустановок транспортних засобів. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2002. № 7. Т. 2. С. 162-167.
5. Методи системного аналізу властивостей автомобільної техніки: навч. посіб. / Дмитриченко М. Ф., Матейчик В. П., Гришук О. К., Цюман М. П. Київ : НТУ, 2014. 168 с.
6. Катренко А. В. Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації: Навчальний посібник. Львів: «Новий світ – 2000», 2003. 420 с.
7. Пилипенко Д. Є. Оцінка достовірності результатів аналізу перехресного впливу при розв'язанні задач технологічного передбачення. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2008. № 3. С. 129-140.
8. Панкратова Н. Д., Савченко І. О. Стратегія застосування методу морфологічного аналізу в процесі технологічного передбачення. *Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2009. № 2. С. 35-44.
9. Панкратова Н. Д., Савченко І. О. Застосування методу морфологічного аналізу до задач технологічного передбачення. *Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили. Серія «Комп'ютерні технології»*. 2008. Т. 90. Вип. 77. С. 6-13.
10. The Analytic Hierarchy Process (AHP). URL: http://www.ivm.vu.nl/en/Images/MCA3_tcm234-161529.pdf (дата звернення: 08.05.2024).
11. Liu Y., Eckert C.M., Earl C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*. 2020. Vol. 161. Article 113738. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113738>.
12. Петруня Ю. Є., Говоруха В. Б., Літовченко Б. В. Прийняття управлінських рішень. Київ : Центр учбової літератури, 2011. 216 с.
13. Грабовецький Б. Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання. Вінниця: ВНТУ, 2010. 171 с.
14. Heller J.E., Loewer M., Feldhusen J. Rethinking morphological analysis application for concept

- synthesis in engineering design. *Athens Journal of Technology & Engineering*. 2016. Vol. 3. No. 2. Pp. 163-176. DOI: <https://doi.org/10.30958/ajte.3-2-4>.
15. Arciszewski T. Morphological Analysis in Inventive Engineering. *Technological Forecasting and Social Change*. 2018. Vol. 126. Pp. 92-101. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.10.013>.
 16. Ritchey T. Morphological Analysis – A general method for non-quantified modeling. URL: www.swemorph.com/pdf/gma.pdf (дата звернення: 13.06.2024).
 17. Ritchey T. Modeling Complex Socio-Technical Systems using Morphological Analysis. URL: www.swemorph.com/pdf/it-webart.pdf (дата звернення: 20.06.2024).
 18. Ritchey T. Futures Studies using Morphological Analysis. URL: www.swemorph.com/pdf/futures.pdf (дата звернення: 20.06.2024).
 19. Особливості алгоритмів моніторингу показників експлуатації засобів транспорту / І.В. Грицук та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. Серія: Технічні науки*. 2023. Вип. 47. С. 312-324. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300118>.
 20. Головащенко О. До питання про підвищення технічної готовності автотранспортних засобів удосконаленням матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення їх працездатності. *Покращення конструктивних та експлуатаційних показників автомобілів і машин* : зб. тез доп. Міжн. конф., м. Київ, 16-17 листопада 2022 р. Київ : НТУ, 2022. С. 170-172.
 21. Головащенко О. В. Особливості застосування тайм-трекерів для оцінювання технічної готовності автотранспортних засобів в життєвому циклі. *Наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету* : зб. тез доп. Київ : НТУ, 2023, Вип. 79. С. 145-146.
 22. Матейчик В. П., Головащенко О. В., Грицук А. І. Особливості ймовірного моделювання управління запасами запасних частин автотранспортного підприємства. *Відбудова транспортної інфраструктури України* : зб. тез доп. Всеукр. наук. конф. здобувачів освіти і молодих учених, м. Київ, 21 червня 2023 р. Київ : НТУ, 2023. С. 54-55.
 23. Матейчик В. П., Головащенко О. В., Грицук А. І. Особливості загальної методики моделювання матеріально-технічного забезпечення процесів відновлення працездатності транспортних засобів. *Ювілейна наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету* : зб. тез доп., 15-17 травня 2024 р. Київ : НТУ, 2024. Вип. 80. С. 182.
 24. Рижиков Ю. І. Управління запасами. Київ : Наука, 1969. 344 с.
 25. Білий Б. М., Дербенцев Д. А., Юхименко О. І. Моделі керування товарними запасами. Київ : КТЕІ, 1978. 50 с.
 26. Рубальський Г. Б. Управління запасами за випадкового попиту. Київ : Наука, 1977. 306 с.
 27. Хаврук В. А. Аналіз систем управління запасами. *Вісник Національного транспортного університету*. 2012. Вип. 26. С. 313-324.
 28. Матейчик В. П., Цюман М. П. Дослідження впливу регулювальних параметрів на паливну економічність і екологічні показники бензинового двигуна з системою нейтралізації відпрацьованих газів. *Наукові нотатки*. 2010. № 28. С. 331-335.
 29. Особливості алгоритму дослідження паливної економічності та екологічних показників транспортного засобу з урахуванням прогріву в процесі руху / Матейчик В. П., Цюман М. П., Волков В. П., Грицук І. В. *Автомобіль і електроніка. Сучасні технології*. 2015. Вип. № 8. С. 31-38.
 30. Особливості моделі для дослідження паливної економічності та екологічних показників транспортного засобу з урахуванням прогріву в процесі руху / Матейчик В. П., Цюман М. П., Волков В. П., Грицук І. В. *Вісник Донецької академії автомобільного транспорту*. 2014. № 4(2). С. 14-20.
 31. Грицук І. В., Кривоусков А. В., Гриценко Д. О. До питання вибору і обґрунтування типу випробувального їздового циклу для дослідження показників токсичності відпрацьованих газів двигунів. *Збірник наукових праць ДонІЗТ*. 2009. № 17. С. 106-119.
 32. Інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів: монографія / В. П. Волков та ін.; за ред. В. П. Волкова. Харків : Вид-во Панов А.М., 2018. 298 с.
 33. Cognitive Model of the Internal Combustion Engine / V. Vychuzhanin et al. *SAE Technical Paper*.

2018. 2018-01-1738. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.
34. Особливості моніторингу стану транспортних засобів з використанням бортових діагностичних комплексів / В. П. Матейчик та ін. *Управління проектами, системний аналіз і логістика*. 2014. Вип. 13. С. 126-138.
35. The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact / I. Kuric et al. *MATEC Web Conf.* 2018. Vol. 244. Pp. 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1051/matec-conf/201824403003>.
36. Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2019. 2019-01-0906. DOI: <https://doi.org/10.4271/2019-01-0906>.
37. Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems) / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2020. 2020-01-2031. DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-01-2031>.
38. Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator / I. Gritsuk, Y. Gutarevych, V. Mateichyk, V. Volkov. *SAE Technical Paper*. 2016. 2016-01-0204. DOI: <https://doi.org/10.4271/2016-01-0204>.
39. Information Model of V2I System of the Vehicle Technical Condition Remote Monitoring and Control in Operation Conditions / I. Gritsuk et al. *SAE Technical Paper*. 2018. 2018-01-0024. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-0024>.

References:

1. V.P. Volkov et al., *Intelektualni systemy monitorynhu transportu: monohrafiia* [Intelligent transport monitoring systems: a monograph]. Kharkiv, Ukraine: NTMT Publishing House, 2015. (Ukr.)
2. I. Gritsuk et al., «The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units», *SAE Technical Paper*, 2018-01-1773, 2018. doi: **10.4271/2018-01-1773**.
3. D. Klets et al., «Information Security Risk Management of Vehicles», *SAE Technical Paper*, 2018-01-0015, 2018. doi: **10.4271/2018-01-0015**.
4. V.P. Mateichyk, «Systemnyi pidkhyd do analizu strukturnykh skhem enerhustanovok transportnykh zasobiv» [«A systematic approach to the analysis of structural diagrams of vehicle power plants»], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut» – Bulletin of the National Technical University «KhPI»*, № 7, vol. 2, pp. 162-167, 2002. (Ukr.)
5. M.F. Dmytrychenko, V.P. Mateichyk, O.K. Hryshchuk, and M.P. Tsiuman, *Metody systemnoho analizu vlastyvostei avtomobilnoi tekhniki: navch. posib.* [Methods of system analysis of automotive equipment properties: training manual]. Kyiv, Ukraine : NTU Publ., 2014. (Ukr.)
6. A.V. Katrenko, *Systemnyi analiz obektiv ta protsesiv kompiuteryzatsii: Navchalnyi posibnyk* [Systems analysis of computerization objects and processes: Tutorial]. Lviv, Ukraine: «Novyi svit – 2000» Publ., 2003. (Ukr.)
7. D.Ye. Pylypenko, «Otsinka dostovirnosti rezultativ analizu perekhresnoho vplyvu pry rozviazanni zadach tekhnolo-hichnoho peredbachennia» [«Assessment of the reliability of the results of cross-influence analysis when solving technological foresight problems»], *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnologii – System Research & Information Technologies*, № 3, pp. 129-140, 2008. (Ukr.)
8. N.D. Pankratova, and I.O. Savchenko, «Stratehiia zastosuvannia metodu morfolohichnoho analizu v protsesi tekhnolo-hichnoho peredbachennia» [«Applying the method of morphological analysis in technological forecasting process»], *Naukovi visti Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskiy politekhnichnyi instytut» – Scientific News of the National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»*, № 2, pp. 35-44, 2009. (Ukr.)
9. N.D. Pankratova, and I.O. Savchenko, «Zastosuvannia metodu morfolohichnoho analizu do zadach tekhnolo-hichnoho peredbachennia» [«Application of the morphological analysis method to technological prediction problems»], *Naukovi pratsi Chornomorskoho derzhavnoho universytetu imeni Petra Mohyly. Serii «Kompiuterni tekhnologii» – Scientific papers of Petro Mohyla Black*

- Sea State University. Series «Computer Technologies»*, vol. 90, iss. 77, pp. 6-13, 2008. (Ukr.)
10. The Analytic Hierarchy Process (AHP). [Online]. Available: http://www.ivm.vu.nl/en/Images/MCA3_tcm234-161529.pdf. Accessed on: May 08, 2024.
 11. Y. Liu, C.M. Eckert, and C. Earl, «A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements», *Expert Systems with Applications*, vol. 161, article 113738, 2020. **doi: 10.1016/j.eswa.2020.113738**.
 12. Yu.Ye. Petrunia, V.B. Hovorukha, and B.V. Litovchenko, *Pryiniattia upravliniskykh rishen* [Making management decisions]. Kyiv, Ukraine: Tsentr uchbovoi literatury Publ, 2011. (Ukr.)
 13. B.Ye. Hrabovetskyi, *Metody ekspertnykh otsinok: teoriia, metodolohiia, napriamky vykorystannia* [Expert assessment methods: theory, methodology, areas of use]. Vinnytsia, Ukraine: VNTU Publ., 2010. (Ukr.)
 14. J.E. Heller, M. Loewer, and J. Feldhusen, «Rethinking morphological analysis application for concept synthesis in engineering design», *Athens Journal of Technology & Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 163-176, 2016. **doi: 10.30958/ajte.3-2-4**.
 15. T. Arciszewski, «Morphological Analysis in Inventive Engineering», *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 126, pp. 92-101, 2018. **doi: 10.1016/j.techfore.2017.10.013**.
 16. Ritchey T. Morphological Analysis – A general method for non-quantified modeling. [Online]. Available: www.swemorph.com/pdf/gma.pdf. Accessed on: June 13, 2024.
 17. Ritchey T. Modeling Complex Socio-Technical Systems using Morphological Analysis. [Online]. Available: www.swemorph.com/pdf/it-webart.pdf. Accessed on: June 20, 2024.
 18. Ritchey T. Futures Studies using Morphological Analysis. [Online]. Available: www.swemorph.com/pdf/futures.pdf. Accessed on: June 20, 2024.
 19. I.V. Gritsuk, A.I. Golovan, O.V. Polishchuk, M.Ye. Litvinov, O.V. Holovashchenko, «Osoblyvosti alhorytmiv monitorynhu pokaznykiv ekspluatatsii zasobiv transportu» [«Peculiarities of algorithms for monitoring vehicle performance»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu: zb. nauk. prats. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi state technical university. Section: Technical sciences*, vol. 47, pp. 312-324, 2023. **doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300118**. (Ukr.)
 20. O.V. Holovashchenko, «Do pytannia pro pidvyshchennia tekhnichnoi hotovnosti avtotransportnykh zasobiv udoskonalenniam materialno-tekhnichnoho zabezpechennia protsesiv vidnovlennia yikh pratsezdatsnosti» [«On the issue of increasing the technical readiness of motor vehicles by improving the logistical support for the processes of restoring their operational capacity»], in Proc. Int. Conf. «Improving the design and performance of cars and machines», Kyiv, 2022, pp. 170-172. (Ukr.)
 21. O.V. Holovashchenko, «Osoblyvosti zastosuvannia taim-trekeriv dlia otsiniuvannia tekhnichnoi hotovnosti avtotranspo-rtnykh zasobiv v zhyttievomu tsykli» [«Features of using time trackers to assess the technical readiness of vehicles in the life cycle»], in Proc. Sci. Conf. of faculty, postgraduate students, students and employees of separate structural divisions of the university, Kyiv, 2023, vol. 79, pp. 145-146. (Ukr.)
 22. V.P. Mateichyk, O.V. Holovashchenko, A.I. Gritsuk, «Osoblyvosti ymovirnisnoho modeliuvannia upravlinnia zapasamy zapasnykh chastyn avtotransportnoho pidpriemstva» [«Features of probabilistic modeling of spare parts inventory management of a motor transport enterprise»], in Proc. All-Ukrainian Sci. Conf. of students and young scientists «Rebuilding Ukraine's transport infrastructure», Kyiv, 2023, pp. 54-55. (Ukr.)
 23. V.P. Mateichyk, O.V. Holovashchenko, A.I. Gritsuk, «Osoblyvosti zahalnoi metodyky modeliuvannia materialno-tekhnichnoho zabezpechennia protsesiv vidnovlennia pratsezdatsnosti transportnykh zasobiv» [«Features of the general methodology for modeling the logistics of vehicle restoration processes»], in Proc. Anniversary Sci. Conf. of the teaching staff, postgraduate students, students and employees of separate structural divisions of the university, Kyiv, 2024, vol. 80, pp. 182. (Ukr.)
 24. Yu.I. Ryzhykov, *Upravlinnia zapasamy* [Inventory management]. Kyiv, Ukraine: Nauka Publ., 1969. (Ukr.)
 25. B.M. Bilyi, D.A. Derbentsev, and O.I. Yukhymenko, *Modeli keruvannia tovarnymy zapasamy* [Inventory management models]. Kyiv, Ukraine: KTEI Publ., 1978. (Ukr.)
 26. H. B. Rubalskyi, *Upravlinnia zapasamy za vypadkovoho popytu* [Inventory management for random

- demand]. Kyiv, Ukraine: Nauka Publ., 1977. (Ukr.)
27. V.A. Khavruk, «Analyz system upravleniia zapasamy» [«Inventory Management Systems Analysis»], *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu – The National Transport University Bulletin*, vol. 26, pp. 313-324, 2012. (Rus.)
 28. V.P. Mateichyk, and M.P. Tsiuman, «Doslidzhennia vplyvu rehuliuvalnykh parametriv na palyvnu ekonomichnist i ekolohichni pokaznyky benzynovoho dvyhuna z systemoiu neitralizatsii vidpratsovanykh haziv» [«Research into the influence of control parameters on fuel efficiency and environmental performance of a gasoline engine with an exhaust gas aftertreatment system»], *Naukovi notatky*, № 28, pp. 331-335, 2010.
 29. V. Mateichyk, M. Tsiuman, V. Volkov, and I. Grytsuk, «Osoblyvosti alhorytmu doslidzhennia palyvnoi ekonomichnosti ta ekolohichnykh pokaznykiv transportnoho zasobu z urakhuvanniam prohrivu v protsesi rukhu» [«Features of algorithm the research of fuel economy and environmental indexes of vehicles taking into account the warming up in the process of movement»], *Avtomobil i elektronika. Suchasni tekhnologii – Vehicle and electronics. Innovative technologies*, vol. № 8, pp. 31-38, 2015. (Ukr.)
 30. V. Mateichyk, M. Tsiuman, V. Volkov, and I. Grytsuk, «Osoblyvosti modeli dlia doslidzhennia palyvnoi ekonomichnosti ta ekolohichnykh pokaznykiv transportnoho zasobu z urakhuvanniam prohrivu v protsesi rukhu» [«Features of the model for the study of fuel efficiency and environmental performance of vehicles, taking into account warm-up in motion»], *Visnyk Donetskoi akademii avtomobilnoho transportu – Bulletin of the Donetsk Academy of Road Transport*, № 4(2), pp. 14-20, 2014. (Ukr.)
 31. I.V. Grytsuk, A.V. Kryvopuskov, and D.O. Hrytsenko, «Do pytannia vyboru i obgruntuvannia typu vyprobuvalnoho yizdovoho tsykladu dlia doslidzhennia pokaznykiv toksychnosti vidpratsovanykh haziv dvyhuniv» [«On the issue of choosing and justifying the type of test driving cycle for studying engine exhaust gas toxicity indicators»], *Zbirnyk naukovykh prats DonIZT – Collection of scientific works of DonIZT*, № 17, pp. 106-119, 2009. (Ukr.)
 32. V.P. Volkov, I.V. Grytsuk, Yu.V. Grytsuk, Yu.V. Volkov, and M.V. Volodarets, *Informatsiini systemy monitorynhu tekhnichnoho stanu avtomobiliv: monohrafiia* [Information systems for monitoring the technical condition of vehicles: monograph], V.P. Volkov, Ed., Kharkiv, Ukraine : Panov A.M. Publ., 2018. (Ukr.)
 33. V. Vychuzhanin et al., «Cognitive Model of the Internal Combustion Engine», *SAE Technical Paper*, 2018-01-1738, 2018. doi: [10.4271/2018-01-1738](https://doi.org/10.4271/2018-01-1738).
 34. V. Mateichyk et al., «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, Systems Analysis and Logistics*, vol. 13, pp. 126-138, 2014. (Ukr.)
 35. I. Kuric, V. Mateichyk, M. Smieszek, M. Tsiuman, N. Goridko, and I. Grytsuk, «The peculiarities of monitoring road vehicle performance and environmental impact», *MATEC Web Conf.*, vol. 244, pp. 1-7, 2018. doi: [10.1051/mateconf/201824403003](https://doi.org/10.1051/mateconf/201824403003).
 36. I. Grytsuk et al., «Features of Modeling Thermal Development Processes of the Vehicle Engine Based on Phase-Transitional Thermal Accumulators», *SAE Technical Paper*, 2019-01-0906, 2019. doi: [10.4271/2019-01-0906](https://doi.org/10.4271/2019-01-0906).
 37. I. Grytsuk et al., «Improving the Processes of Thermal Preparation of an Automobile Engine with Petrol and Gas Supply Systems (Vehicle Engine with Petrol and LPG Supplying Systems)», *SAE Technical Paper*, 2020-01-2031, 2020. doi: [10.4271/2020-01-2031](https://doi.org/10.4271/2020-01-2031).
 38. I. Grytsuk, Y. Gutarevych, V. Mateichyk, and V. Volkov, «Improving the Processes of Preheating and Heating after the Vehicular Engine Start by Using Heating System with Phase-Transitional Thermal Accumulator», *SAE Technical Paper*, 2016-01-0204, 2016. doi: [10.4271/2016-01-0204](https://doi.org/10.4271/2016-01-0204).
 39. I. Grytsuk et al., «Information Model of V2I System of the Vehicle Technical Condition Remote Monitoring and Control in Operation Conditions», *SAE Technical Paper*, 2018-01-0024, 2018. doi: [10.4271/2018-01-0024](https://doi.org/10.4271/2018-01-0024).

Стаття надійшла 08.11.2024

Стаття прийнята 06.12.2024

ДО УВАГИ АВТОРІВ!

До публікації у збірнику приймаються тільки наукові статті, виконані відповідно до вимог Постанови Президії ВАК України від 15.01.2003р. № 7-05/1, які мають наступні необхідні елементи: **постановка проблеми** у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; **аналіз останніх досліджень і публікацій**, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спирається автор, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття; **формулювання цілей статті** (постановка завдання); **виклад основного матеріалу** дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; **висновки** з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку та **перелік використаних джерел** (оформлений відповідно до стандарту – ДСТУ 8302:2015 «Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання»). Список джерел повинен бути складений в порядку спогаду в тексті. Посилання на літературу поміщають у квадратні дужки. Після списку використаних джерел надається приставлена бібліографія латиницею **References**, оформлена з використанням стилю цитування IEEE Citation Style.

Стаття 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.

Стаття може бути представлена на українській або англійській мовах в макетному варіанті. Формат листа – А4. Розміри полів: верхнє, нижнє – по 20 мм; лівє, правє – по 25 мм Основний текст набирається шрифтом Times New Roman, розмір 11, міжрядковий інтервал – 1,0. Червоний рядок абзаців відповідає відступу – 1 см. Нумерація сторінок не проставляється. Вирівнювання тексту виконується по ширині. Для спеціальних символів і формул використовувати шрифт Symbol MT Extra, в редакторі формул слід використовувати математичний курсив. Графічний матеріал, представлений у вигляді малюнків і графіків, повинен бути вмонтований в текст статті.

Стаття повинна містити номер УДК (в лівому верхньому кутку). На наступному рядку по правому полю, жирним шрифтом, розмір 11 – прізвище, ім'я та по батькові (у називному відмінку) з нарядковими номерами; в нижній частині першої сторінки у вигляді зноски курсивом, розмір шрифту 10 – науковий ступінь, вчене звання (як що немає – посада), місце роботи (без скорочень), місто, ORCID при наявності, адреса електронної пошти; іноземні автори вказують назву країни. Далі, після міжрядкового інтервалу друкується назва статті (прописними літерами, по центру, без заключної крапки); анотації двома мовами (для статей не англійською мовою обсяг анотації англійською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова; для статей не українською мовою обсяг анотації українською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), першою наводиться анотація на мові статті (відступ зліва і справа по 1 см, курсивом) та ключові слова (від трьох до восьми).

Наприкінці статті повинні бути приведені ініціали, прізвище, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи рецензента; дата подачі статті.

До статті надаються наступні супровідні матеріали (**по одному примірнику**):

- експертний висновок про можливість публікації статті у відкритому друці;
- рецензія фахівця за профілем статті, в якій повинні бути відображені наукова новизна результатів, їх цінність і значущість, зауваження по суті статті і по її оформленню;
- згода на обробку персональних даних (окрема для кожного з співавторів);
- ліцензійний договір (**у двох екземплярах**).

Форми необхідних документів та вимоги до оформлення статей представлені на сайті (https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/requirements). Архів видань див.: https://journals.uran.ua/vestnikpgtu_tech/issue/archive.

Відповідальність за зміст статті несе автор. Статті, що не відповідають зазначеним вимогам, не розглядаються.

Повністю оформлені статті і необхідні документи передаються в редакцію збірника відповідальному секретарю Савенко Ользі Сергіївні, тел.: (098) 480-24-03.

Підписано до друку 26.12.2024 р.

Папір тип № 2. Умов. друк. ар. 25,01. Тираж 100.

Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу. Ціна договірної