

ISSN-print 2313-4763  
ISSN-online 3041-1939

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ**

**НАУКОВИЙ ВІСНИК**  
**ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ**

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (30)

Видається з 2009 року

Херсон  
2025

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2025. № 1 (30). – 268 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії  
(протокол № 11 від 26.06.2025 р.)

#### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Проценко В. О., д.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, головний редактор.

*Тематична спрямованість – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології:*

Зінченко С. М., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Бень А. П., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Бідюк П. І., д.т.н., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, член редколегії;

Носов П. С., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Передерій В. І., д.т.н., Миколаївський національний університет імені В. О. Сухомлинського, Україна, член редколегії;

Поливода О. В., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, членка редколегії;

Степенко С. А., к.т.н., Національний університет «Чернігівська політехніка», Україна, член редколегії;

Prentkovskis Olegas, Sc.D., Vilnius Gediminas Technical University, Литва, член редколегії.

*Тематична спрямованість – Матеріалознавство:*

Сапронов О. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Голофєєва М. О., к.т.н., Національний університет «Одеська політехніка», Україна, членка редколегії;

Гусєв В. М., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Литвиненко В. В., д.т.н., Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Україна, член редколегії;

Пашинська О. Г., д.т.н., ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», Україна, членка редколегії;

Сизоненко О. М., д.т.н., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Україна, членка редколегії;

Стухляк П. Д., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Фесенко І. П., д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Україна, член редколегії;

Dulebova Ludmila, Ph.D., Technical University of Kosice, Словаччина, членка редколегії.

*Тематична спрямованість – Транспортні технології:*

Букетов А. В., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;

Аппазов Е. С., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Аргун Щ. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, членка редколегії;

Бабій М. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Варбанець Р. А., д.т.н., Одеський національний морський університет, Україна, член редколегії;

Войтович О. А., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, членка редколегії;

Гнатов А. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, член редколегії;

Клевцов К. М., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Клюєв О. І., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, член редколегії;

Кюлініч А. Г., Ph.D., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Ляшук О. Л., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна, член редколегії;

Мінчев Д. С., д.т.н., Одеський національний морський університет, Україна, член редколегії;

Настасенко В. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Піпченко О. Д., д.т.н., Національний університет «Одеська морська академія», Україна, член редколегії;

Цимбал М. М., д.т.н., Національний університет «Одеська морська академія», Україна, член редколегії;

Шарко О. В., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Якушенко С. В., Ph.D., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

Lukauskas Valdas, Ph.D., Lithuanian Maritime Academy, Литва, член редколегії;

Zaglinkis Justas, Ph.D., Lithuanian Maritime Academy, Литва, член редколегії.

Адреса редакційної колегії: 73003, м. Херсон, просп. Незалежності, 20, тел.: (0552) 22-35-69, email: journalnvksma@gmail.com. Індексатор медіа R30-03323 (рішення Національної ради України з питань телебачення та радіомовлення від 21.03.2024 №853). ЄДРПОУ 35219930.

Журнал внесено до Переліку наукових фахових видань України категорії «Б» (Наказ МОН України № 886 від 02.07.2020 р.)

Журнал індексується українською загальнодержавною реферативною базою даних «Україніка наукова», міжнародною реферативною базою даних Google Scholar, міжнародною наукометричною базою Researchbib, представлений у Науковій електронній бібліотеці Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського, міжнародній реферативній базі даних Crossref.

ISSN-print 2313-4763

ISSN-online 3041-1939

© Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 2025

ISSN-print 2313-4763  
ISSN-online 3041-1939

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE**  
**KHERSON STATE MARITIME ACADEMY**

**SCIENTIFIC BULLETIN**

**KHERSON STATE MARITIME ACADEMY**

Science journal

Published twice a year

№ 1 (30)

Issued from 2009

Kherson  
2025

**Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy** : science journal. – Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2025. № 1 (30). – 268 p.

**Founder and publisher** – Kherson State Maritime Academy

*Recommended to the publishing in a panel session of Kherson State Maritime Academy Academic Board  
(minutes of the panel session № 11 from 26.06.2025)*

#### **EDITORIAL STAFF:**

**Vladyslav Protsenko**, Doctor of Engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, editor in chief.

##### ***Thematic scope – Automation and computer integrated technologies:***

**Sergii Zinchenko**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;

**Andrii Ben**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Petro Bidiuk**, Doctor of Engineering Science, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, member of editorial board;

**Pavlo Nosov**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Viktor Perederii**, Doctor of Engineering Science, Mykolaiv National University named after V. O. Sukhomlynsky, Ukraine, member of editorial board;

**Oksana Polivoda**, Candidate of Engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

**Serhii Stepenko**, Candidate of Engineering Science, Chernihiv National University of Technology, Ukraine, member of editorial board;

**Prentkovskis Olegas**, Sc.D., Vilnius Gediminos Technical University, Lithuania, member of editorial board.

##### ***Thematic scope – Materials science and engineering:***

**Oleksandr Sapronov**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;

**Maryna Holofieieva**, Candidate of Engineering Science, National University "Odesa Polytechnic", Ukraine, member of editorial board;

**Viktor Husev**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Volodymyr Lytvynenko**, Doctor of Engineering Science, Institute of Electrophysics and Radiation Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, member of editorial board;

**Olena Pashynska**, Doctor of Engineering Science, LLC "Technical University "Metinvest Polytechnic", Ukraine, member of editorial board;

**Olha Syzonenko**, Doctor of Engineering Science, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, member of editorial board;

**Petro Stukhlyak**, Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

**Ihor Fesenko**, Doctor of Engineering Science, V. Bakul Institute for Superhard Materials, Ukraine, member of editorial board;

**Eudmila Dulebová**, Ph.D., Technical University of Kosice, Slovakia, member of editorial board.

##### ***Thematic scope – Transport technologies:***

**Andrii Buketov**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;

**Eduard Appazov**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Shchasiana Arhun**, Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, member of editorial board;

**Mykhailo Babii**, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Roman Varbanets**, Doctor of Engineering Science, Odesa National Maritime University, Ukraine, member of editorial board;

**Olha Voitovych**, Candidate of Engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

**Andrii Hnatov**, Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, member of editorial board;

**Kostiantyn Klevtsov**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Oleh Kliuiev**, Candidate of Engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

**Andrii Kulinich**, Ph.D., Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Oleh Lyashuk**, Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of editorial board;

**Dmytro Minchev**, Doctor of Engineering Science, Odesa National Maritime University, Ukraine, member of editorial board;

**Valentyn Nastasenko**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Oleksandr Pipchenko**, National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine, member of editorial board;

**Mykola Tsymbal**, National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine, member of editorial board;

**Oleksandr Sharko**, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Serhii Yakyschenko**, Ph.D., Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

**Lukauskas Valdas**, Ph.D., Lithuanian Maritime Academy, Lithuania, member of editorial board;

**Zaglinkis Justas**, Ph.D., Lithuanian Maritime Academy, Lithuania, member of editorial board.

**Address of the editorial board:** 73003, Nezalezhnosti avenue, 20, Kherson city, Phone: (0552) 22-35-69, email: journalnvsma@gmail.com. Media identifier R30-03323 (decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting dated 03/21/2024 No. 853). ЄДРПОУ 35219930.

**The journal has been brought into the list of scientific professional editions of Ukraine of category "B"** (the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 886 from 02.07.2020).

The journal is being indexed by Ukrainian national abstract database «**Ukrainika Scientific**», international abstract database **Google Scholar**, international scientometric database **Researchbib**, presented at the **Scientific E-library of Vernadsky National Library of Ukraine**, international fulltext scientific database **Crossref**.

***АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ***  
***AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES***

## COLLECTIVE CYBERSECURITY OF AUTONOMOUS MARITIME VESSELS BASED ON DECENTRALIZED INTELLIGENT ANALYSIS

**Kozachok Y.**, graduate student, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: kozak9995@gmail.com, ORCID: 0009-0005-6430-3961;

**Simanenkov A.**, Ph.D., Associate Professor, Ship Electrical Equipment and Automation Appliances Exploitation Department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: Simanenkov.andrii@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0797-527600:54;

**Zinchenko S.**, Sc.D., Associate Professor, Ship Handling Department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029.

*This paper presents a comprehensive approach to enhancing the collective cybersecurity of autonomous maritime platforms through the integration of intelligent data analysis methods, decentralized coordination mechanisms, and a custom hybrid architecture that combines Long Short-Term Memory (LSTM) neural networks with onboard large language models (LLMs). The core innovation lies in augmenting traditional LSTM-based anomaly detection with LLM-driven semantic interpretation of navigational inconsistencies — a fundamentally novel strategy for self-governing maritime environments.*

*Particular attention is paid to the detection, explanation, and decentralized coordination of responses to Global Positioning System (GPS) spoofing attacks, which pose a significant threat to navigational accuracy, operational safety, and the overall coherence of fleet activities. The proposed system, built on a proprietary LSTM-LLM configuration, equips each vessel with multi-level cognitive capabilities: real-time anomaly detection, natural language generation of contextual explanations, and autonomous formulation of strategic responses without dependence on centralized oversight or communication infrastructure.*

*Unlike conventional centralized solutions, the system empowers each vessel to independently analyze situational data, derive human-understandable contextual insights, and adapt its behavior accordingly. The architecture includes a lightweight protocol for structured message exchange in JavaScript Object Notation (JSON) format, enabling efficient, resilient, and secure inter-vessel communication. Additionally, a decentralized consensus mechanism, based on a dynamically updated trust matrix, enhances the fleet's robustness against partial compromise and improves operational integrity.*

*The effectiveness of the proposed approach is demonstrated through a simulated GPS spoofing scenario involving one compromised vessel within a five-vessel fleet. The results confirm the system's ability to detect anomalies accurately, isolate the compromised unit, and successfully adapt the navigational strategies of the remaining vessels — thus maintaining uninterrupted mission continuity despite active cyber disruption.*

**Key words:** autonomous vessels; collective cybersecurity; large language models; decentralized coordination; Ollama; Long Short-Term Memory; artificial Intelligence; cyber resilience; multi-agent systems; trust matrix consensus.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.006-015**

**Introduction.** The active development of autonomous maritime transport creates new opportunities for improving the efficiency, safety, and economy of maritime transportation. Modern autonomous vessels increasingly rely on navigation, communication, and computational systems that function without direct human intervention. Under these conditions, ensuring cybersecurity becomes a critical issue, both for individual platforms and for entire fleets.

Modern autonomous vessels heavily rely on complex navigation, communication, and computational systems that must operate reliably without direct human intervention. These systems process vast amounts of real-time data, including Global Positioning System (GPS) signals, Automatic Identification System (AIS) broadcasts, inertial navigation system (INS) inputs, and environmental sensor data. A disruption or manipulation of this information can critically impact a vessel's decision-making processes, making cybersecurity not merely a technical concern but a foundational requirement for safe and efficient operations.

One of the most dangerous threats is GPS spoofing attacks, where an attacker falsifies global positioning signals, causing the vessel to incorrectly determine its own location. In multi-vessel (collective) missions, where movement coordination relies on shared routes, even a single attack can have critical consequences for the entire fleet, including collisions, loss of orientation, mission disruptions, and more.

In response to these challenges, this article proposes a hybrid system for collective response to cyber threats, combining:

- Neural network models for anomaly detection in navigation data;
- Large Language Models (LLM), particularly Ollama, serving as situational interpreters and strategic decision generators onboard;
- Mechanisms for decentralized interaction between vessels, allowing coordinated responses to attacks without a centralized control point.

The proposed system enables an autonomous vessel not only to detect its own vulnerabilities but also to inform other fleet participants, initiate consistency checks for coordinates, receive recommendations from local artificial Intelligence (AI) assistants, and adjust the collective trajectory. Thus, it ensures collective cyber resilience capable of adapting to dynamic threats in real-time.

**Analysis of Recent Research and Publications.** With the increasing level of automation in vessel navigation, autonomous vessels become more vulnerable to cyber threats. Cyberattacks on autonomous maritime vessels can vary in nature and impact vectors, affecting navigation, sensors, communication, and software components. One of the most dangerous types of attacks is GPS spoofing, in which an attacker alters the coordinates perceived by the vessel, misleading it about its actual location [1]. Another common threat is GPS jamming, which can lead to a complete loss of navigation capability. Similarly, the AIS, responsible for information exchange between vessels, can also be spoofed. Furthermore, interference with the INS is possible, leading to accumulated errors in coordinate determination over time.

These threats can disrupt navigation systems, creating significant safety risks. Research [2] highlights that cyberattacks can result in loss of vessel control, physical damage, and navigational system disruptions.

Resource [3] describes a new type of Distributed Denial of Service (DDoS) attack, the largest in history, which resulted in a 30-minute outage affecting 15% of global internet services and several major providers, significantly impacting maritime systems as well. Special attention should be given to the vulnerability of satellite navigation systems. Work [4] emphasizes the necessity of enhanced protection against cyberattacks for maritime systems, especially when combined with terrestrial components of advanced long-range navigation systems.

Among contemporary approaches for detecting anomalies in navigational data, neural network models such as Long Short-Term Memory (LSTM) show promise. Specifically, study [5] demonstrates the effectiveness of the LSTM encoder-decoder algorithm in identifying deviations in Automatic Dependent Surveillance–Broadcast message sequences within air transportation. The proposed method autonomously models expected object behavior and detects discrepancies, an approach equally applicable to GPS spoofing detection in maritime environments. Despite the aviation focus of the research, its principles can directly transfer to tasks involving the safe navigation of autonomous vessels in open waters.

Recently, the Ollama platform has attracted researchers' attention due to its ability to locally deploy LLM, even in resource-constrained environments. Work [6] analyzed the performance of 28 quantized Ollama models deployed on Raspberry Pi devices, evaluating energy consumption, accuracy, and inference latency. Results demonstrate that local LLMs can effectively handle real-time tasks on autonomous devices. In an industry-specific context, research [7] explored using Ollama to develop PDF bots capable of efficiently processing technically complex documents. The authors underline the importance of adapting Retrieval-Augmented Generation (RAG) architectures to domain-specific requirements, particularly relevant to maritime contexts with extensive regulatory data, routing charts, and instructions.

The integration of LLMs, such as Ollama, into autonomous vessel systems opens new possibilities for interpreting and explaining detected threats. LLMs can provide clear recommendations to crew members or automated systems regarding further actions upon detecting anomalies caused by cyberattacks. Research [5] underscores LLMs' potential for contextual understanding and response generation, enhancing cybersecurity systems' effectiveness.

Analysis of current research [8–11] indicates that effective cybersecurity in autonomous maritime navigation requires a comprehensive approach, encompassing anomaly detection, decentralized coordination, and intelligent systems for threat interpretation. Integrating large language models into these systems can significantly improve their effectiveness and adaptability to emerging challenges.

**Purpose and Objectives of the Research.** The purpose of the research is to develop and experimentally verify a hybrid intelligent system for detecting and collectively responding to cyberattacks (particularly GPS spoofing) within a network of autonomous maritime vessels, utilizing a local language assistant based on an Ollama, which ensures decentralized adaptation and cybersecurity resilience of the fleet.

**Main Section.** Within the framework of this research, a hybrid cybersecurity system is proposed, combining anomaly detection in navigational data using neural network models [12–16] with LLM for interpreting and explaining threats, as well as forming context-dependent actions. A critical aspect of the system is its distributed nature, enabling autonomous vessels to exchange risk assessments and coordinate collective responses without centralized management.

The system comprises the following functional modules:

– **Anomaly Detection Module:** Built on an LSTM network trained on normal GPS/AIS coordinate behavior to forecast subsequent values. Deviations from actual values indicate potential attacks. LSTM networks represent a special class of recurrent neural networks (RNNs) specifically designed to learn and model temporal sequences and long-range dependencies. Unlike traditional RNNs, which often suffer from the vanishing gradient problem, LSTM networks utilize a gated cell structure that enables them to retain information over extended periods of time. Each LSTM cell incorporates input, output, and forget gates, allowing the network to dynamically control which information is stored, updated, or discarded. This architecture makes LSTM models particularly effective in tasks involving sequential data analysis, such as time series prediction, natural language processing, and anomaly detection. In the context of autonomous maritime systems, LSTM networks are widely employed for detecting anomalies in navigation data, predicting vessel trajectories, and enhancing situational awareness by modeling complex temporal patterns.

– **Language Model:** Implemented via the local Ollama platform which are advanced AI systems built upon large-scale transformer-based architectures capable of understanding, generating, and reasoning over human language with high contextual awareness. These assistants leverage pre-trained deep learning models, often containing billions of parameters, fine-tuned to perform a wide range of tasks, including question answering, decision support, summarization, and real-time information retrieval. Due to their ability to process complex queries and generate contextually relevant responses, LLM Assistants are increasingly integrated into autonomous systems to enhance their decision-making capabilities. In autonomous maritime platforms, LLM-based assistants can provide real-time situation analysis, interpret anomalous sensor data, and support the coordination of collective behavior among multiple vessels, offering a significant improvement in operational autonomy and cyber-resilience.

– **Inter-Vessel Communication Module:** Implemented through a lightweight JavaScript Object Notation (JSON) protocol (via Transmission Control Protocol/User Datagram Protocol), it enables the dissemination of threat alerts (including coordinates, timestamps, IDs, and recommendations).

– **Collective Decision Mechanism:** Each vessel performs a local verification of the attacked node's coordinates, assesses trust levels, consults its own LLM assistant, and subsequently adjusts its trajectory according to the new coordination strategy.

The system features a three-level structure (Fig. 1):

1. Sensory Level – Acquisition of GPS, AIS and INS data;
2. Analytical Level – Anomaly detection, LLM initiation for explanations;
3. Coordination Level – Dissemination of decisions, creation of new routes.

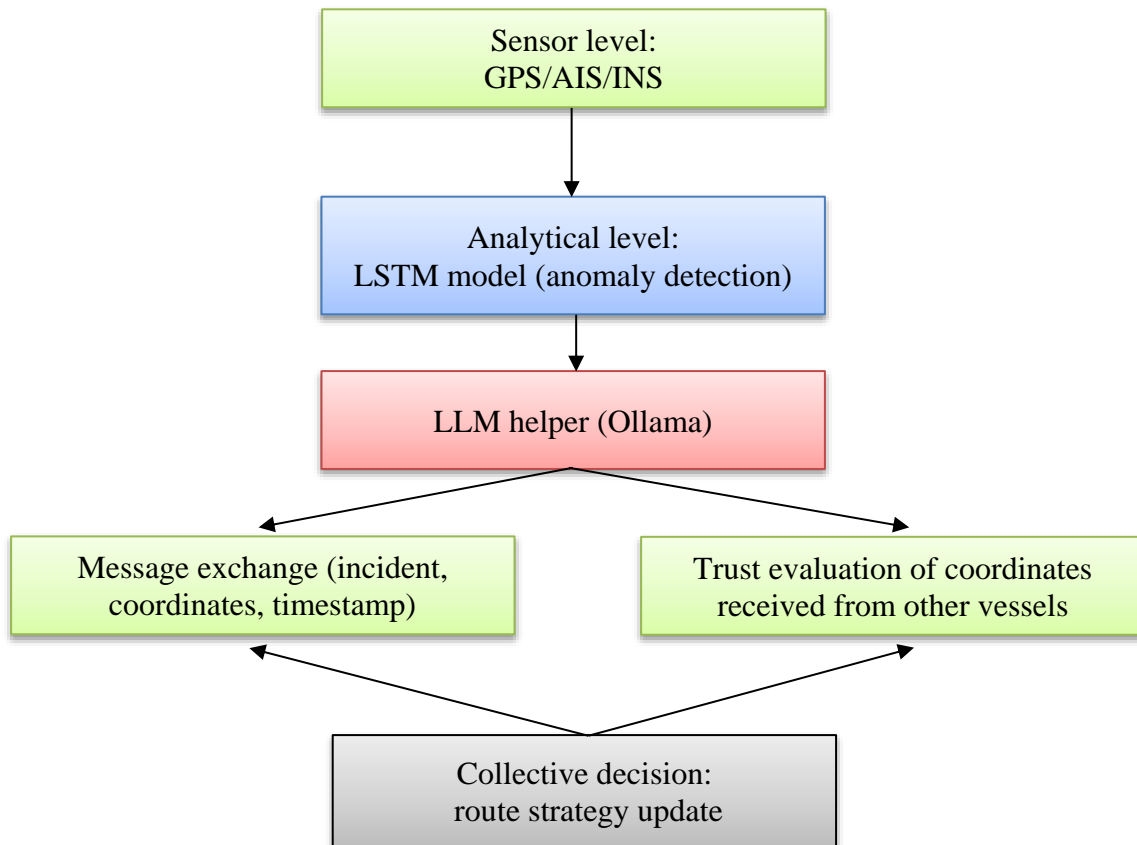


Figure 1 – Overview of the Decentralized Three-Layer Architecture Used in the AI Module

The proposed method for detecting anomalies in navigational data is based on the use of a LSTM network combined with a LLM assistant for explanation and decision support. A sliding window approach is used, where a fixed-length sequence of recent GPS coordinates is continuously processed. The LSTM model is trained on normal (non-spoofed) GPS sequences to predict the next expected position based on the historical input sequence.

During real-time operation, the system receives new GPS data points and updates the latest sequence accordingly. The LSTM model predicts the next expected coordinate, and the predicted value is compared to the actual received value using the Haversine distance formula, which measures the geographical distance between two points on the Earth's surface. If the calculated error exceeds a predefined threshold the system flags an anomaly.

When an anomaly is detected, the onboard LLM assistant is triggered to generate a contextual explanation of the incident and recommend appropriate actions. Additionally, an incident alert is broadcast to other vessels in the fleet, allowing the collective to respond in a coordinated manner. This hybrid LSTM-LLM approach ensures real-time anomaly detection with autonomous situational assessment and collaborative fleet behavior adjustment without reliance on centralized systems. The LSTM model is illustrated using pseudocode in Fig. 2.

The methodology is highly adaptable and scalable, as the LSTM model can be retrained for different vessel types, operational scenarios, or navigational environments. Moreover, by relying on learned sequential patterns rather than static thresholds, the system significantly reduces the occurrence of false positives caused by typical navigational noise. Finally, the architecture is designed with efficiency in mind: both LSTM networks and locally deployed, quantized LLMs can operate effectively on modern edge computing hardware, ensuring that real-time processing requirements are met without excessive energy consumption.

```

SequenceLength = number of points in the window (e.g., 10)
GPS_Data = list of coordinates [(lat1, lon1), (lat2, lon2), ..., (latn, lonn)]
Threshold = acceptable error threshold (e.g., 30 meters)

Train LSTM_Model on normal (non-spoofed) sequences:
for each i in (1, len(GPS_Data) - SequenceLength):
    InputSequence = GPS_Data[i : i + SequenceLength]
    Target = GPS_Data[i + SequenceLength]
    Train model to predict Target from InputSequence

Function Detect_Anomaly(Latest_Sequence):
    Predicted = LSTM_Model.predict(Latest_Sequence)
    Actual = GPS_Data[-1] # last observed value
    Error = Haversine_Distance(Predicted, Actual)

    if Error > Threshold:
        return "ANOMALY", Error
    else:
        return "NORMAL", Error

Loop:
    Continuously receive new GPS point
    Update Latest_Sequence with sliding window
    Status, Error = Detect_Anomaly(Latest_Sequence)

    if Status == "ANOMALY":
        Trigger AI Assistant (LLM) for explanation and recommendation
        Broadcast incident to fleet

```

Figure 2 – Pseudocode of LSTM Algorithm for Anomaly Detection

Let us consider a fleet  $F = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$  of autonomous vessels operating in a distributed environment and interacting with each other through communication channels with limited latency. The input parameters include the coordinates of vessel  $S_i$  at time  $t$  and the magnitude of its positional change.

$$p_i(t) = (\text{lat}_i(t), \text{lon}_i(t)) \in R^2; \tag{1}$$

$$\Delta p_i(t) = ||p_i(t) - p_i(t - \delta t)||, \tag{2}$$

where  $p_i(t)$  – the coordinates of the vessel at a given point in time,  $\Delta p_i(t)$  – the magnitude of movement Vessel  $S_k$  registers a potential deviation if:

$$\text{MSE}(\hat{p}_k(t), p_k(t)) > \tau, \tag{3}$$

where  $p_k(t)$  – the coordinate prediction from the LSTM model,  $\tau$  – the threshold value of the reconstruction error, MSE (Mean Squared Error) – the mean squared error Vessel  $S_k$  generates a message:

$$\mathcal{A}_k = (t, S_k, p_k(t), \Delta p_k(t), \text{recLLM}(S_k, t)), \quad (4)$$

where recLLM is a recommendation generated by the local LLM assistant based on the Ollama platform. The message  $\mathcal{A}_k$  is broadcast to  $S_j$ . Each vessel  $S_j$  calculates the relative discrepancy:

$$d_{jk}(t) = ||p_j(t) - p_k(t)||, \quad (5)$$

and determines the trust in the coordinates  $S_k$ :

$$\mu_{jk}(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } d_{jk}(t) \leq \eta \\ 0, & \text{if } d_{jk}(t) > \eta \end{cases}, \quad (6)$$

where  $\eta$  – the allowable inter-vessel error (GPS drift margin).

The vessels construct a trust matrix:

$$M(t) = [\mu_{jk}(t)]_{j \in F \setminus \{k\}}. \quad (7)$$

Final trust:

$$\mu_k(t) = \frac{1}{n-1} \sum \mu_{jk}(t). \quad (8)$$

If  $\mu_k(t) < 0$ , де  $0 \in [0,1]$  – a threshold value (e.g., 0.5), then  $S_k$  is considered compromised. The fleet transitions to a new state  $S_j \in F'$  and performs local trajectory optimization  $\gamma_j(t)$  taking into account the exclusion of the compromised node:

$$\gamma'_j(t) = \text{Optimize}(\gamma_j(t) \mid S_k \in /N_j(t)), \quad (9)$$

where  $N_j(t)$  – a set of neighboring vessels for coordinated navigation.

This approach ensures decentralized fleet resilience against GPS spoofing attacks, enabling autonomous agents to respond independently yet coordinately. The experimental part of this study aims to validate the functionality of the proposed collective cybersecurity system for autonomous vessels, integrating local detection of navigation anomalies, explanatory capabilities of the LLM language model, and decentralized fleet interaction under GPS spoofing conditions.

The experiment sought to confirm the LSTM model's capability to detect anomalous coordinate changes in real-time, assess the responsiveness and quality of explanations provided by the local AI-assistant (Ollama), verify the correctness of collective fleet decision-making during a simulated attack on one of the vessels, and evaluate the overall resilience of the system against partial disruption of coordinated navigation control.

The following software was used to model the system:

- OpenCPN – as a visualization platform for autonomous fleet navigation;
- gps-sdr-sim – to generate fake GPS signals using pre-prepared NMEA sequences;
- Python – an environment for processing coordinates and implementing the LSTM-based anomaly detection model;
- TensorFlow/Keras – for constructing and training the neural network model;
- Ollama – a local platform for running the LLM;
- Docker – for containerizing each vessel as a separate node with a network API;
- JSON communication – for exchanging incident information and coordinates between vessels.

The simulation modeled a fleet of five autonomous vessels  $S = \{S1, S2, S3, S4, S5\}$ , initially following identical routes in a parallel formation at a speed of 10 knots. The attack scenario included:

- At  $t=120$  seconds, vessel  $S3$  was subjected to a GPS spoofing attack, shifting coordinates by 70–90 meters within 2 seconds;

- The LSTM model was trained on 10,000 normal observations (without anomalies);
- Each vessel is equipped with a local LLM-assistant using the Ollama API, which receives incident data structured as JSON (Fig. 3).

```

{
  "vessel_id": "S3",
  "timestamp": "2025-04-12T14:36:00Z",
  "coordinates": [48.4650, 35.0455],
  "mse_error": 0.0037,
  "recommendation": "Switch to INS and notify fleet"
}
    
```

Figure 3 – communication API with LLM

Upon receiving the message, other vessels compare their coordinates with S3, assess the trust level, consult their local LLM-assistants to generate recommendations, and collectively exclude vessel S3 from the coordination matrix.

Main Results and Discussion. To evaluate the results, the following metrics are utilized:

- MSE – widely used to measure prediction accuracy or data reconstruction in machine learning, particularly in regression and anomaly detection tasks;
- LLM response time – the duration taken by the language model to respond to queries;
- Correctness of collective decision-making – evaluating whether the fleet’s collective response to the threat was appropriate;
- Time To Detect (TTD) – the interval from the attack's initiation to its detection (Fig. 4).

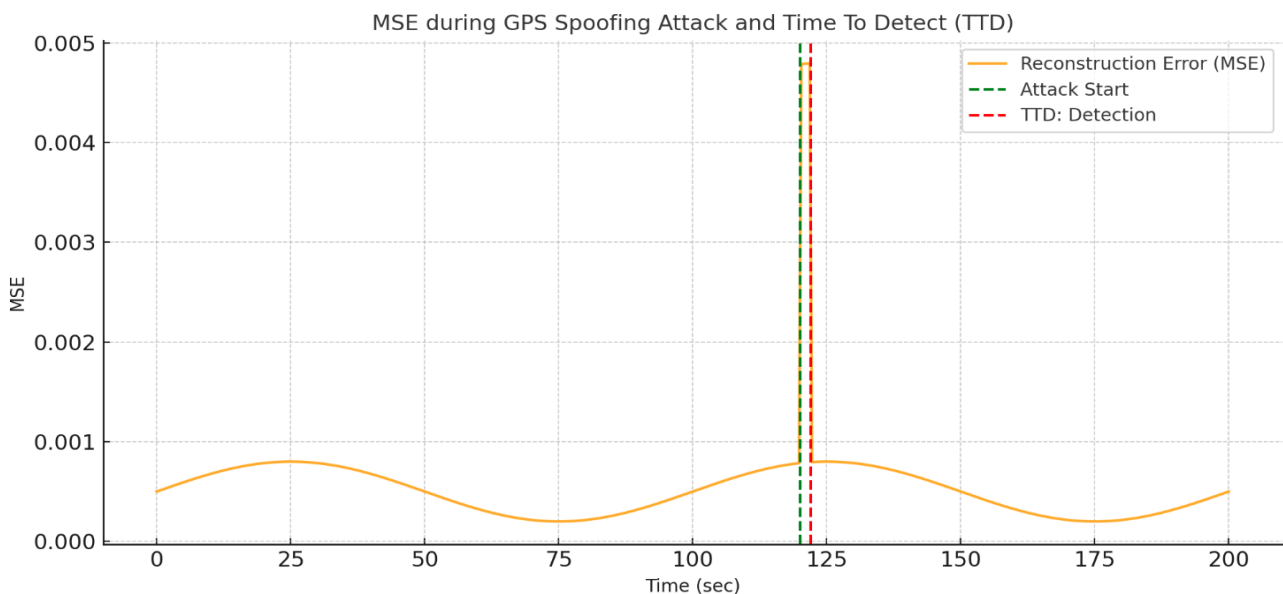


Figure 4 – MSE detection visualization

The experimental simulation results demonstrate that the system can promptly detect GPS spoofing attacks with an average detection delay of 1,8 seconds after the anomaly begins. The developed LSTM model provided high detection accuracy, achieving precision = 0,97 and recall = 0,94, confirming its ability to identify coordinate deviations even under minor external disturbances.

The local AI assistant based on the Mistral model deployed via the Ollama platform generated situational explanations in approximately 0,8 seconds on average, allowing its real-time use. In 100% of the simulation runs, the system correctly identified which vessel was compromised,

and all other fleet participants successfully excluded it from collective coordination, adapting their routes according to the new fleet configuration.

These findings confirm that the proposed system can swiftly and reliably detect coordinate anomalies related to GPS spoofing, generate meaningful and practical recommendations using a local AI assistant, and ensure stable collective response among autonomous vessels without the need for centralized control. Thus, the approach ensures functional cyber-resilience of the fleet, even when one of its elements is compromised.

The hybrid system's advantages demonstrate high efficiency under realistic GPS spoofing attack scenarios. Key advantages of the system include

- Decentralization: The system requires no centralized control or server; each vessel autonomously detects anomalies and generates recommendations.
- Intelligent Explanation: Through local deployment of LLM models, each agent can articulate the causes of incidents and suggest actions understandable both by humans and other software.
- Resilience to Partial Fleet Disruption: Even if one fleet participant is compromised, the collective behavior system maintains adaptability.
- Scalability: The architecture enables adding new vessels without modifying interaction principles.

Despite the successful results, the system has certain limitations:

- Model Quality Determines Reliability: An improperly trained LSTM model may fail to detect anomalies or produce false positives.
- Resource Requirements: Running the local LLM assistant demands adequate computational resources, particularly CPU and RAM.
- LLM Security: Language models can be susceptible to prompt injection or may generate ambiguous instructions under complex conditions.
- Network Reliability: Loss of communication between vessels could disrupt the collective coordinate verification mechanism.
- The current evaluation involved a relatively small group of vessels. To ensure robustness and scalability, the system should be validated in larger fleets and more diverse maritime environments.

**Conclusions.** This study introduces a cybersecurity architecture for autonomous maritime vessels that integrates real-time anomaly detection in navigational data, interpretative capabilities of a locally deployed AI assistant based on a LLM, and decentralized coordination mechanisms among fleet units. The system was evaluated in a simulated GPS spoofing scenario involving a five-vessel autonomous group.

Compared to traditional centralized methods, the proposed solution offers significant advantages in autonomy, scalability, explainability of decisions, and rapid situational response. These attributes make the system a strong candidate for integration into next-generation maritime platforms - including unmanned patrol, cargo, and oceanographic research vessels — where resilience and independence are mission-critical.

**Prospects for Further Research.** Future directions for research and enhancement of the proposed system may include:

- Multimodal Attack Detection: combining GPS, INS, AIS, and other sensor data into a unified anomaly detection model.
- Contextual Training of the LLM Assistant: adapting responses based on vessel type, mission objectives, and weather conditions.
- Model Optimization for Onboard Platforms: using lightweight models (such as Gemma2B) capable of operating on edge devices.
- Agent Voting Mechanisms: instead of simply excluding a compromised node, implementing opinion consensus algorithms (e.g., weighted consensus-based approaches).

## REFERENCES

1. Moraes, C. C., de Albuquerque, C. E. P., Machado, R. C. S., & de Sá, A. O. (2021). A triggering mechanism for cyber-attacks in naval sensors and systems. *Sensors*, 21, 3195. <https://doi.org/10.3390/s21093195>.
2. Balduzzi, M., Pasta, A., & Wilhoit, K. (2014). A security evaluation of AIS automated identification system. In *Proceedings of the 30th Annual Computer Security Applications Conference (ACSAC '14)* (pp. 436–445). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2664243.2664257>.
3. Androjna, A., Brcko, T., Pavic, I., & Greidanus, H. (2020). Assessing cyber challenges of maritime navigation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(10), 776. <https://doi.org/10.3390/jmse8100776>.
4. Svilicic, B., Rudan, I., Jugović, A., & Zec, D. (2019). A study on cyber security threats in a shipboard integrated navigational system. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 364. <https://doi.org/10.3390/jmse7100364>.
5. Greidanus, S. (2017). Using LSTM encoder-decoder algorithm for detecting anomalous ADS-B messages. *arXiv.org*. <https://arxiv.org/abs/1711.10192>.
6. Chen, J., Guo, D., Yao, Q., et al. (2024). Sustainable LLM inference for edge AI: Evaluating quantized LLMs for energy efficiency, output accuracy, and inference latency. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2403.15971>.
7. Khan, F., & Tomsett, R. (2024). Optimizing RAG techniques for automotive industry PDF chatbots: A case study with locally deployed Ollama models. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2403.18931>.
8. Tian, Z., Wang, S., Zhang, J., & Li, J. (2022). Cybersecurity risk assessment of unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering*, 248, 110766. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110766>.
9. Luo, Y., & Yu, F. R. (2021). Anomaly detection in autonomous systems using LSTM neural networks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3039102>.
10. Bommasani, R., Hudson, D. A., et al. (2021). On the opportunities and risks of foundation models. *Center for Research on Foundation Models (Stanford University)*. <https://crfm.stanford.edu/report.html>.
11. Cyber-MAR Project Consortium. (2022). Cyber range simulation for maritime cybersecurity training. *Cyber-MAR Project*. <https://cyber-mar.eu>.
12. Zinchenko, S. M., & Lyashenko, V. G. (2017). Usage of neural network model of the ship for control tasks. *Scientific Bulletin of KSMA*, 2(17), 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.
13. Kozachok, Y. A. (2024). Automation of information system architecture design for utility payments processing using artificial intelligence. *Tavriyskyi Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, (2), 62–72. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.2.6>.
14. Kozachok, Y. A., & Zinchenko, S. M. (2025). Integration of ChatGPT for decision support in autonomous ships in real-time mode. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, (2), 111–121. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/889/903>.
15. Tarelko, Wieslaw & Rudzki, Krzysztof. (2020). Applying artificial neural networks for modelling ship speed and fuel consumption. *Neural Computing and Applications*. 32. <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05111-2>.

**Козачок Ю., Сіманенков А., Зінченко С. КОЛЕКТИВНА КІБЕРБЕЗПЕКА АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ СУДЕН НА ОСНОВІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ**

*У даній статті представлено підхід до забезпечення колективної кібербезпеки автономних морських платформ шляхом інтеграції методів інтелектуального аналізу даних, децентралізованої координації та власної гібридної архітектури, що поєднує Long Short-Term Memory (LSTM) з локально вбудованою великою мовною моделлю (LLM). Основна інновація полягає у доповненні традиційної LSTM-моделі компонентом LLM – з метою не лише виявлення, але й семантичного інтерпретування аномалій у навігаційних даних, що є принципово новим підходом для автономного морського середовища.*

*Особлива увага приділяється виявленню, поясненню та децентралізованій координації реагування на атаки типу GPS-спуфінг, які становлять суттєву загрозу точності навігації та злагодженості дій автономних флотів. Запропонована система, заснована на власній модифікації LSTM-LLM, забезпечує суднам багаторівневу когнітивну здатність: виявлення відхилень у реальному часі, генерацію контекстуальних пояснень природною мовою, а також розробку стратегічних дій без необхідності централізованого управління.*

*Ключова відмінність від наявних рішень полягає в локальній автономності: кожне судно здатне самостійно аналізувати ситуаційні дані, формувати людиноорієнтовані пояснення та змінювати поведінку відповідно до поточної загрози. Архітектура системи підтримує легкий протокол обміну структурованими повідомленнями у форматі JavaScript Object Notation для швидкої міжсуднової комунікації та децентралізований консенсусний механізм на основі матриці довіри, що динамічно оновлюється.*

*Ефективність підходу продемонстровано на симульованому сценарії атаки GPS-спуфінг проти одного з п'яти автономних суден. Результати підтвердили здатність системи точно локалізувати джерело загрози, підтримувати цілісність місії флоту та адаптивно перебудовувати навігаційні рішення у відповідь на кіберінцидент.*

**Ключові слова:** автономні судна; колективна кібербезпека; GPS-спуфінг; великі мовні моделі; децентралізована координація; Ollama; AI-помічник; кіберстійкість; мультиагентні системи, матриця довіри.

© Kozachok Y., Simanenkov A., Zinchenko S.

Статтю прийнято до редакції 14.05.2025

## АВТОМАТИЧНЕ НАЛАШТУВАННЯ НАДЛИШКОВОЇ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПО ДЕТЕРМІНАНТУ

**Зінченко С. М.**, д.т.н., доцент, професор кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;

**Товстокорий О. М.**, к.т.н., доцент, завідувач кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028;

**Носов П. С.**, к.т.н., доцент, завідувач кафедри судових комп'ютерних систем та мереж, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: rason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766;

**Онишко Д. М.**, старший викладач кафедри судових комп'ютерних систем та мереж, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: Onushkodn@gmail.com, ORCID: 0009-0005-8394-3091;

**Козачок Ю. А.**, аспірант, розробник програмного забезпечення компанії N-IX LTD, Україна, e-mail: kozak9995@gmail.com, ORCID: 0009-0005-6430-3961.

Об'єктом дослідження є процеси динамічного позиціонування судна з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм. Автоматизація процесів керування рухом дозволяє значно підвищити ефективність систем керування за рахунок використання сучасних методів обробки інформації, включаючи оптимізацію. Нові можливості підвищення ефективності систем керування з'явилися з використанням надлишкового керування. У морській галузі надлишкова структура найбільшого поширення набули у системах динамічного позиціонування. Однією із вимог до таких систем є забезпечення максимальної точності процесів позиціонування, у тому числі при дії зовнішніх впливів з будь-якого напрямку. На думку авторів, таку можливість системи керування можна забезпечити максимальним розведенням керуючих векторів структури (максимізацією детермінанту). У роботі розроблено метод налаштування надлишкової структури, який забезпечує таку можливість. Отриманий результат пояснюється: використанням у системі керування бортового обчислювача; знаходженням на кожному кроці бортового обчислювача оптимального стану структури, який визначається максимальним детермінантом, із врахуванням обмежень типу рівностей, для створення структурою необхідних керувань, та типу нерівностей, для врахування обмежень структури по максимальній силі упору і куту повороту гвинтів; переналаштуванням структури у визначене оптимальне положення. Працездатність та ефективність методу підтверджені математичним моделюванням у середовищі MATLAB.

**Ключові слова:** інтелектуальні транспортні системи; навігаційна безпека; надлишкова структура; оптимальні налаштування; динамічне позиціонування; детермінант структури.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.016-030

**Вступ.** Автоматизація процесів керування рухом дозволяє значно підвищити ефективність систем керування за рахунок використання сучасних методів обробки інформації, включаючи оптимізацію. Авторами статті, у попередніх роботах, досліджувалися питання автоматизації та оптимізації процесів керування рухом судна для виконання швартових операцій [1], розходження з багатьма маневруючими цілями [2], ідентифікації математичної моделі судна [3] тощо. Нові можливості підвищення ефективності систем керування з'явилися з використанням надлишкового керування. Надлишкова структура виконавчих пристроїв традиційно почали використовуватися для резервування та підвищення надійності систем керування, шляхом виключення із роботи пристроїв, що відмовили. Згодом, вони почали використовуватися також для оптимізації процесів керування у космічній та авіаційній галузі [4], зварювальному виробництві [5], керуванні маніпуляторами тощо. У морській галузі надлишкова структура найбільшого поширення набули у системах динамічного позиціонування [6, 7]. Використання надлишкових структур виконавчих пристроїв суден для оптимізації енергоспоживання і керувань розглядалися

раніше у роботах авторів [8–10], дослідженню мінімально надлишкової структури офшорного судна присвячена робота [11], переналаштування надлишкових структур без збурень розглянуто у роботі [12]. У даній статті досліджується можливість використання надлишкового керування для зменшення динамічних похибок позиціонування. Забезпечення максимальної точності процесів позиціонування, у тому числі при дії зовнішніх впливів з будь-якого напрямку, є однією із найважливіших вимог до таких систем. На думку авторів, таку можливість системи керування можна досягти за рахунок максимального розведення керуючих векторів структури (максимізацією детермінанту).

Об'єктом дослідження є процеси динамічного позиціонування судна з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм.

Предметом дослідження є моделі та методи зменшення динамічних похибок позиціонування.

**Постановка проблеми.** Розробити метод керування надлишковою структурою виконавчих пристроїв судна з двома кормовими азиподами та носовим підрулюючим пристроєм, який дозволив би зменшити динамічні похибки позиціонування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Оптимізація процесів керування, використання надлишкових структур для резервування та оптимізації раніше розглядалися у багатьох роботах авторів.

Дослідження системи керування автономним надводним судном, яка б забезпечувала безпечне та точне виконання функціональних завдань за наявності вітру, течії та хвилювання, наведено у роботі [13]. Представлена нова топологія контролера, заснована на поєднанні ПД- регулятора та оптимального керування. Налаштування регулятора сформовані на основі отриманих результатів оптимального керування, що забезпечило мінімізацію модельних невизначеностей. Працездатність та ефективність методу перевірені на математичній моделі реального судна з 3 ступенями свободи (модель DoF). Результати моделювання показали, що ПД-регулятор, налаштований відповідно до запропонованого методу, здатний працювати за різних параметричних невизначеностей.

У статті [14] розглянуті питання оптимального керування стріловими кранами, що використовуються на судах. Модель динамічного стрілового крана лінеаризована шляхом розкладання в ряд Тейлора навколо робочої точки, яка перераховувалася на кожному кроці керування. Для розрахунку коефіцієнта підсилення у каналі зворотного зв'язку регулятора розв'язувалося алгебраїчне рівняння Ріккати. Запропонований підхід до оптимального керування забезпечив швидке та точне відстеження змінних станів стрілових кранів при помірних флуктуаціях вхідних керуючих сигналів.

Дослідженню швидкодії авіаційного маневру Кульбіт, при створенні бази маневрів, присвячена робота [15]. За допомогою методу заміни змінних і накладення функції штрафу, задача оптимального керування з вільним кінцевим станом і часом перетворена у задачу оптимального керування з фіксованим кінцевим станом. Результати моделювання показали, що запропонований метод дозволяє оптимізувати у часі керування для маневру Кульбіт.

У статті [16] розглянуто швартовий маневр автономного надводного судна (АНС) з використанням модифікованої механіки (тросу). Мала швидкість судна при швартуванні істотно знижує його маневрові можливості, а вітер і хвилювання значно підсилюють цей ефект. Внесок статті в розробку методів швартування АНС з використанням модифікованої механіки полягає у врахуванні провисання каната. Це досягнуто за рахунок використання гладкої штрафної функції та лінійного комплементарного рішення.

У статті [17] досліджено задачу оптимізації вертикального зниження космічного корабля під час посадки на планету, з урахуванням обмежень на глісаду та тягу двигуна. В якості критерію оптимальності прийнята функція мінімізації енерговитрат. Вперше доведено форму Max-Min-Max або Max-Singular-Max оптимального керування за принципом максимуму Понтрягіна. Отриманий результат поширено на задачі керування з урахуванням впливу атмосфери. Показано, що сингулярна структура не виникає в розширених задачах керування.

Так, у роботі [18] розглянуті питання підвищення надійності підшипників з магнітним підвісом у конструкціях із резервуванням, за рахунок реконфігурації конструкції у разі відмови окремих компонентів. Коефіцієнт струму зміщення є одним із ключових факторів у стійкому до відмов контролі. Авторами розроблено метод оптимізації коефіцієнта струму зміщення в резервній структурі. За допомогою математичного аналізу діапазону зміни коефіцієнта струму зміщення доведено існування оптимального рішення. Розроблено алгоритми пошуку оптимального рішення.

У статті [19] розглянуті питання створення відмовостійкої системи рульового керування безпілотних підводних апаратів. Проведений авторами аналіз показав, що надійність системи керування, яка використовує стратегію та алгоритми керування резервуванням, значно краща, ніж традиційна конфігурація.

Методи керування резервною структурою електрогідролічних приводів на основі нечіткої агрегації, правил нечіткої логіки Мамдані та теорії нечітких нейронних мереж досліджено в [20].

У керівництві [21] містяться рекомендації щодо практичного маневрування судном з двома кормовими азимутальними пристроями (АП). Розглянуто можливості кількох фіксованих режимів. Враховуючи, що ці режими реалізуються вручну, кути АП у всіх режимах вибираються кратними 45 крім режимів швидкого переміщення вліво та вправо. Структура з двома кормовими АП може виникнути, коли носовий і кормовий підрулюючі пристрої виходять з ладу через засмічення піском або мулом. Така конструкція є останнім «рубелем», який забезпечує тривимірне керування, тому вона особливо цікава.

У статті [22] розроблено відмовостійкий контролер для адаптивної висотної конструкції, який здатний адаптуватися до множинних відмов приводів і є важливим кроком для автоматизації адаптивних структур. Запропонований закон керування складається з двох частин – статичної компенсації зміщення, яка протидіє постійній силі, прикладеній несправними приводами до механічної конструкції, та реконфігурованого лінійного квадратичного регулятора, який оптимально мінімізує вібрації конструкції за допомогою решти функціонуючих приводів. Запропонований підхід перевірено моделюванням в умовах вітрових збурень. Результати моделювання показали, що відмовостійка схема керування забезпечує більш ефективну роботу системи (до 33% у порівнянні з номінальним контролером).

У статті [23] задача синтезу системи керування літальним апаратом пов'язана з можливістю структурної перебудови (реконфігурації) законів керування при збереженні динамічних властивостей замкнутого контуру «літак – система керування» у разі відмов і пошкоджень.

Модульні повітряні роботизовані системи (Modular Aerial Robotic Systems, MARS) складаються з багатьох модулів-дронів, зібраних в єдину інтегровану літаючу платформу. Завдяки вбудованій надлишковості MARS може самостійно змінювати конфігурацію для пом'якшення несправностей та підтримування стабільного польоту. В наявних роботах із самореконфігурації MARS часто не враховується практична керованість проміжних структур, що обмежує їхню застосовність. У статті [24] розглянута динамічна модель MARS із врахуванням обмежень проміжних структур та запропоновано надійний і ефективний алгоритм самовідновлення, який максимізує запас керованості на кожному проміжному етапі.

Резервування керуючих поверхонь дає можливість системі керування реконфігурувати закон керування при виникненні несправностей під час польоту. У роботі [25] запропоновано можливі несправності розділити на дві категорії: передбачувані та непередбачувані. Передбачувані несправності обробляються адаптивною схемою перемикання між моделями. Непередбачувані несправності обробляються простою адаптивною схемою керування, щоб змусити станцію з несправностями відстежувати задану еталонну модель. Результати моделювання показали, що розроблена стратегія реконфігурації здатна швидко виявити несправність і стабілізувати літальний апарат.

Модульні самореконфігуровані космічні кораблі (MSRS) складаються з однорідних або різнорідних модулів, які можуть автономно трансформувати конфігурацію без зовнішнього втручання. У статті [26] розглянуті ключові технології MSRS. Описано концепції модульних реконфігурованих космічних апаратів (MRS) і MSRS та проаналізовано переваги останнього. Введені типові MSRS. Проаналізовано ключові технології MSRS: технологія проектування складальної конструкції, технологія оптимізації конфігурації місії, технологія планування самостійної реконфігурації та технологія кооперативного керування позиціями. Представлені тенденції розвитку MSRS.

Оптимізація відіграє вирішальну роль у керуванні кінематичним рухом надлишкових маніпуляторів. Чинні кінематичні схеми не враховують оптимізацію маніпулятивності, або вимагають перетворення неопуклої задачі в опуклу, що може вплинути на оптимальну маніпулятивність. Також, чинні кінематичні схеми рідко враховують перешкоди. У роботі [27] пропонується оптимізація маніпулятивності з використанням рекурентної нейронної мережі (metaheuristic-based recurrent neural network MRNN) на основі метаевристики, яка може безпосередньо обробляти нелінійну та невипуклу задачу з обмеженнями та забезпечувати досягнення глобального оптимуму. Наведені результати комп'ютерного моделювання та фізичних експериментів, які демонструють переваги запропонованої схеми.

Оптимізація функціональної надлишковості є одним із найефективніших способів покращити продуктивність робота. Компромід між плавністю руху робота та іншими важливими аспектами робить проблему оптимізації надто нелінійною, яку неможливо розв'язувати при фрезерних операціях. У статті [28] показано, що рух робота буде приблизно плавним, коли функціональні надлишковості різця є змінними функції згладжування. На цій основі побудовано сурогатну модель Лежандра для планування оптимальної функціональної надлишковості, яка дозволяє значно скоротити обчислення. Результати реального експерименту з фрезерування тривимірних S-подібних канавок запропонованим методом показали, що, у порівнянні із відомими методами, досягається більша продуктивність фрезерування та ефективність обчислень.

У роботі [29] розглянуті питання максимізації керуючого моменту у каналі рискання суден з надлишковими структурами виконавчих пристроїв.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є зменшення динамічних похибок позиціонування офшорного судна з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм. Задачами дослідження є: визначення матриці стану структури та її мінорів; знаходження сингулярних станів та станів, максимально віддалених від сингулярних; розробка методу оптимального налаштування по детермінанту; вибір та налаштування процедури умовної оптимізації; перевірка працездатності та ефективності методу математичним моделюванням.

**Основна частина.** Схема керування судном з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм наведена на рис. 1.

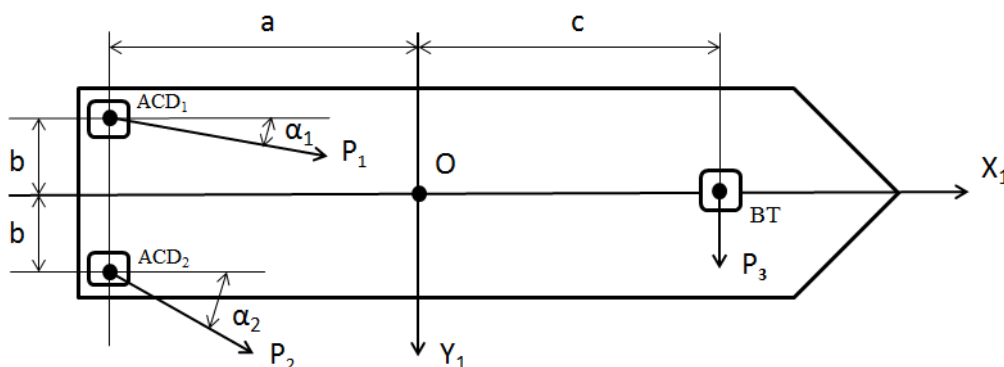


Рисунок 1 – Схема керування судном з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм

На рисунку зображена зв'язана система координат (ЗСК)  $OX_1Y_1Z_1$ , початок якої знаходиться у центрі обертання судна. Вісь  $OX_1$  лежить у діаметральній площині судна, паралельна палубі судна і направлена в носову частину судна. Вісь  $OY_1$  перпендикулярна діаметральній площині судна і направлена в сторону правого борту. Вісь  $OZ_1$  доповнює систему до «правої». Також на рисунку зображено два кормових азиподи  $ACD_1$  та  $ACD_2$  і носовий підрулюючий пристрій ВТ. Положення першого азиподу  $ACD_1$  у ЗСК визначається координатами  $(-a, -b, 0)$ ; положення другого азиподу  $ACD_2$  у ЗСК визначається координатами  $(-a, b, 0)$ ; положення носового підрулюючого пристрою ВТ у ЗСК визначається координатами  $(c, 0, 0)$ . Перший азипод  $ACD_1$  створює вектор сили упору гвинта  $\mathbf{P}_1 = (P_1 \cos \alpha_1, P_1 \sin \alpha_1)$ , де  $P_1$  – модуль сили упору гвинта першого азиподу,  $\alpha_1$  – кут повороту першого азиподу, та має обмеження на керування  $|\mathbf{P}_1| \leq P_1^{\max}$ ,  $|\alpha_1| \leq \pi$ . Другий азипод  $ACD_2$  створює вектор сили упору гвинта  $\mathbf{P}_2 = (P_2 \cos \alpha_2, P_2 \sin \alpha_2)$ , де  $P_2$  – модуль сили упору гвинта другого азиподу,  $\alpha_2$  – кут повороту другого азиподу, та має обмеження на керування  $|\mathbf{P}_2| \leq P_2^{\max}$ ,  $|\alpha_2| \leq \pi$ . Носовий підрулюючий пристрій створює бокову силу  $\mathbf{P}_3 = (0, P_3)$ , яка обмежена величиною  $|\mathbf{P}_3| \leq P_3^{\max}$ . Запишемо матрицю стану структури із векторів  $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} P_1 \cos \alpha_1 & P_1 \sin \alpha_1 \\ P_2 \cos \alpha_2 & P_2 \sin \alpha_2 \\ 0 & P_3 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Матриця  $\mathbf{S}[3,2]$  прямокутна і її ранг визначається найбільшим порядком не нульового мінору. Запишемо мінори другого порядку матриці  $\mathbf{S}[3,2]$ .

Перший мінор

$$M_1 = \begin{vmatrix} P_1 \cos \alpha_1 & P_1 \sin \alpha_1 \\ P_2 \cos \alpha_2 & P_2 \sin \alpha_2 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

$$\det M_1 = P_1 P_2 \sin \alpha_2 \cos \alpha_1 - P_1 P_2 \sin \alpha_1 \cos \alpha_2 = P_1 P_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1), \quad (3)$$

$$\det M_1 = 0 \rightarrow (\alpha_2 - \alpha_1) = \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

Другий мінор

$$M_2 = \begin{vmatrix} P_1 \cos \alpha_1 & P_1 \sin \alpha_1 \\ 0 & P_3 \end{vmatrix}, \quad (5)$$

$$\det M_2 = P_1 P_3 \cos \alpha_1, \quad (6)$$

$$\det M_2 = 0 \rightarrow \alpha_1 = \frac{\pi}{2} \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

Третій мінор

$$M_3 = \begin{vmatrix} P_2 \cos \alpha_2 & P_2 \sin \alpha_2 \\ 0 & P_3 \end{vmatrix}, \quad (8)$$

$$\det M_3 = P_2 P_3 \cos \alpha_2, \quad (9)$$

$$\det M_3 = 0 \rightarrow \alpha_2 = \frac{\pi}{2} \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (10)$$

У загальному випадку всі три визначники мінорів не дорівнюють нулю і матриця стану структури має ранг  $\text{rang}(\mathbf{S}) = 2$ , тобто структура у всіх випадках, за виключенням сингулярних (вироджених) станів, може створювати керування у площині  $OX_1Y_1$ . Сингулярні стани структури визначаються рівнянням

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{\pi}{2} \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

отриманим із рівнянь (4), (7), (10), коли всі три мінори другого порядку дорівнюють нулю.

У сингулярних станах вектори  $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$  колінеарні, ранг матриці стану  $\text{rang}(\mathbf{S}) = 1$  і структура втрачає можливість створювати керуючу силу вздовж осі  $OX_1$ .

При практичному застосуванні бажано утримувати стан структури подалі від сингулярного, що досягається максимізацією визначників мінорів

$$|\det M_1| = P_1 P_2 |\sin(\alpha_2 - \alpha_1)| \rightarrow \max, (\alpha_2 - \alpha_1) = \frac{\pi}{2} \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (12)$$

$$|\det M_2| = P_1 P_3 |\cos \alpha_1| \rightarrow \max, \alpha_1 = \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (13)$$

$$|\det M_3| = P_2 P_3 |\cos \alpha_2| \rightarrow \max, \alpha_2 = \pm \pi n, n = 0, 1, 2, \dots \quad (14)$$

Умови (12)–(14) не мають сумісного рішення, проте, використання будь-якої із них гарантує максимальну віддаленість структури від сингулярного стану і створення найкращої керованості судном. Це дозволяє зменшити динамічну затримку системи керування та похибки, викликані цією затримкою. Також, умови (12)–(14) можна використовувати для реконфігурації структури при відмові одного із виконавчих пристроїв, а саме, умову (12) – при відмові НПП, умову (13) – при відмові  $ACD_2$ , умову (14) – при відмові  $ACD_1$ .

Умови (12)–(14) є цільовими функціями, які максимізують визначник (детермінант) структури і забезпечують найкращу керованість судном. Також, додатково потрібно враховувати обмеження типу рівностей, які забезпечують створення структурою необхідних керуючих сил і моментів, а також обмеження типу нерівностей, які враховують допустимі діапазони зміни параметрів структури

$$\begin{cases} Q = |\sin(\alpha_2 - \alpha_1)| \rightarrow \max \\ P_1 \cos \alpha_1 + P_2 \cos \alpha_2 - P_x^* = 0 \\ P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_2 + P_3 - P_y^* = 0 \\ P_1 b \cos \alpha_1 - P_2 b \cos \alpha_2 - P_1 a \sin \alpha_1 - P_2 a \sin \alpha_2 + P_3 c - M_z^* = 0 \\ |P_1| \leq P_1^{\max}, |\alpha_1| \leq \pi \\ |P_2| \leq P_2^{\max}, |\alpha_2| \leq \pi \\ |P_3| \leq P_3^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

Вирішення оптимізаційної задачі (15) проводиться у бортовому обчислювачі із використанням процедури нелінійної оптимізації з обмеженнями типу рівностей та нерівностей.

**Математичне моделювання процесів динамічного позиціонування.** Для підтвердження працездатності та ефективності розробленого методу проведено математичне моделювання у середовищі MATLAB. Основні характеристики математичної моделі судна відповідають характеристикам офшорного судна ESNAAD-224 і наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики математичної моделі судна

Найменування параметра	Значення параметра
Маса судна $m$ , кг	$4,02e^6$
Довжина судна $L$ , м	70,4
Ширина судна $B$ , м	15,77
Осадка судна $d$ , м	4,85
Максимальна швидкість судна $V_{max}$ , м/с	5,5
Діапазон зміни сили упору гвинта першого $P_1$ та другого $P_2$ азиподу, н	$\pm 2,27e^5$
Діапазон зміни сили упору гвинта НПП, н	$\pm 0,57e^5$
Діапазон кута повороту гвинта першого $\alpha_1$ та другого $\alpha_2$ азиподу, рад	$\pm \pi$

Для моделювання використовувалися: диспетчер задач (організація виклику процедур, формування масивів для побудови графіків); модель об'єкта керування (система 17 диференційних рівнянь, із них 6 динамічних рівнянь лінійного та кутового руху судна, 6 кінематичних рівнянь лінійного та кутового руху судна, 5 диференційних рівнянь, які враховують інерційність зміни сили упору гвинта і кута повороту гвинта першого та другого азиподів, а також сили упору гвинта носового підрулюючого пристрою); модель системи керування (розрахунок керуючих сил і моменту рискання, необхідних для підтримування заданої позиції або переміщення, вирішення задачі умовної оптимізації (15); модель зовнішніх впливів; метод інтегрування Рунге-Кути 4-го порядку; тощо. У якості процедури умовної оптимізації використовувалася процедура MATLAB

$$f \min \text{con}(@ \text{func}, \mathbf{x0}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{A}_{eq}, \mathbf{b}_{eq}, \mathbf{lb}, \mathbf{ub}, @ \text{nonlcon}), \quad (16)$$

де  $@ \text{func}$  – посилання на цільову функцію,  $\mathbf{x0} = (P_1(0), \alpha_1(0), P_2(0), \alpha_2(0), P_3(0))$  – початковий вектор стану структури,  $\mathbf{A}$  – матриця системи лінійних обмежень типу нерівностей, у нашому випадку відсутня,  $\mathbf{b}$  – вектор правої частини системи лінійних обмежень типу нерівностей, у нашому випадку відсутній,  $\mathbf{A}_{eq}$  – матриця системи лінійних обмежень типу рівностей, у нашому випадку відсутня,  $\mathbf{b}_{eq}$  – вектор правої частини системи лінійних обмежень типу рівностей, у нашому випадку відсутній,  $\mathbf{lb} = (-P_1^{\max}, -\pi, -P_2^{\max}, -\pi, -P_3^{\max})$  – нижні значення параметрів керувань,  $\mathbf{ub} = (P_1^{\max}, \pi, P_2^{\max}, \pi, P_3^{\max})$  – верхні значення параметрів керувань,  $@ \text{nonlcon}$  – посилання на файл нелінійних обмежень типу рівностей.

**Експеримент 1.** Мета експерименту: перевірка можливості переналаштування структури у нестационарних режимах руху судна. Умови експерименту: під час поздовжнього переміщення судна провести переналаштування структури у стан з максимальним детермінантом.

Результати моделювання наведені на рис. 2 у вигляді графіків зміни у часі: поздовжньої швидкості  $V_x [м/с]$  та поздовжнього переміщення  $X_g [м]$  судна, бокової швидкості  $V_y [м/с]$  та бокового переміщення  $Y_g [м]$  судна, кутової швидкості  $\omega_z [град/с]$  та кута рискання  $Psi [град]$  судна, сили упору гвинта  $P_1 [н]$  та кута повороту гвинта  $\alpha_1 [гр]$  першого азиподу, сили упору гвинта  $P_2 [н]$  та кута повороту гвинта  $\alpha_2 [гр]$  другого азиподу, сили упору гвинта  $P_3 [н]$  носового підрулюючого пристрою, значення детермінанту структури

$Det$ , сумарної поздовжньої сили структури  $P_x[H]$ , сумарної бокової сили структури  $P_y[H]$  та сумарного моменту рискання  $M_z[HM]$ .

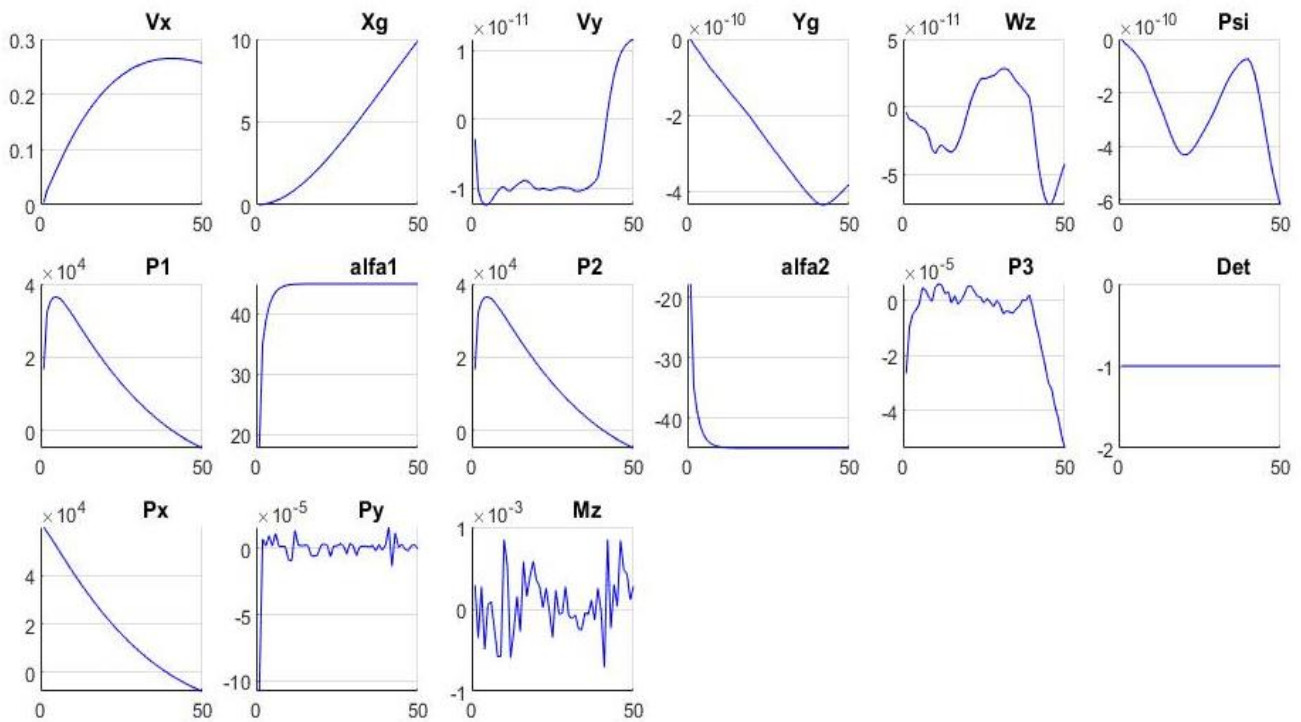


Рисунок 2 – Переналаштування структури в режимі нестационарного руху судна

Як видно із графіків  $V_x(t), X_g(t)$ , судно збільшує швидкість та переміщується у поздовжньому напрямку. Одночасно, відбувається переналаштування структури – вектор сили упору гвинта першого азиподу повертається з початкового положення  $\alpha_1(0) = 0^\circ$  у положення  $\alpha_1(t) = 45^\circ$ , а вектор сили упору гвинта другого азиподу повертається з початкового положення  $\alpha_2(0) = 0^\circ$  у положення  $\alpha_2(t) = -45^\circ$ . На момент завершення переналаштування, кут між вектором сили упору гвинта першого азиподу і вектором сили упору гвинта другого азиподу становить  $\alpha_1 - \alpha_2 = \frac{\pi}{2}$  (вектори перпендикулярні), а детермінант структури дорівнює  $Det(t) = -1$  (структура максимально віддалена від сингулярного стану). Під час переналаштування, відхилення у каналах бокового руху  $V_y(t), Y_g(t)$  та кутового руху  $\omega_z(t), Psi(t)$  незначні. Також, на графіках видно незначні зміни бокової сили  $P_y(t)$  та керуючого моменту структури у каналі рискання  $M_z(t)$ . Значні зміни поздовжньої сили структури  $P_x(t)$  викликані необхідністю розгону та гальмування судна при переміщенні.

Висновок по експерименту 1. Розроблений метод дозволяє переналаштовувати надлишкову структуру у положення максимального детермінанта без збурень.

**Експеримент 2.** Мета експерименту: визначення динамічних похибок позиціонування судна при використанні надлишкової структури, налаштованої на максимальний детермінант. Умови експерименту: моделювання процесів динамічного позиціонування за наявності поривів вітру. Результати математичного моделювання наведені у вигляді графіків у часі, рис. 3, та на фазовій площині  $X_g[m] - Y_g[m]$ , рис. 4.

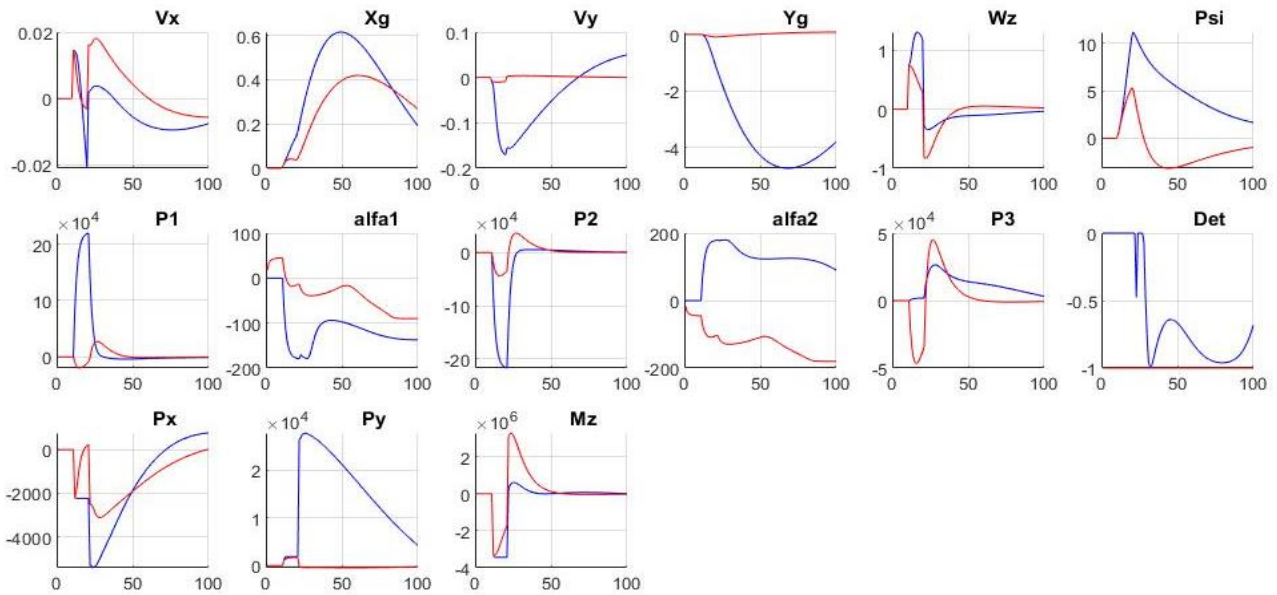


Рисунок 3 – Динамічні похибки позиціонування при використанні надлишкової структури, оптимізованої по детермінанту і мінімальному енергоспоживанню

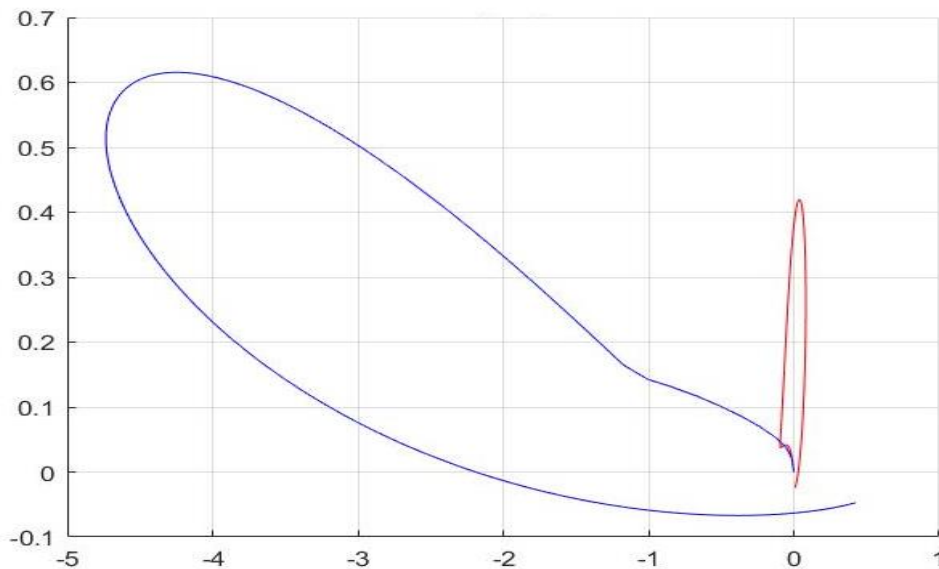


Рисунок 4 – Динамічні похибки позиціонування на фазовій площині

Червоним кольором зображені графіки, отримані з використанням методу оптимізації структури по детермінанту, а синім кольором зображені графіки, отримані з використанням методу мінімізації енергоспоживання, раніше описаному у роботах [8–11].

Початкові значення всіх параметрів дорівнюють нулю. На інтервалі часу  $t \in [10 - 12]c$  імітується перший порив вітру швидкістю  $W = 15 м/с$  і напрямком  $K_W = 45^\circ$ . На інтервалі часу  $t \in [20 - 22]c$  імітується другий порив вітру швидкістю  $W = 15 м/с$  і напрямком  $K_W = -45^\circ$ .

Із наведених результатів видно, що в інтервалі часу дії поривів вітру  $t \in [10 - 12]c$  та  $t \in [20 - 22]c$  з'являються динамічні похибки позиціонування в каналах поздовжнього  $V_x(t), X_g(t)$ , бокового  $V_y(t), Y_g(t)$  та кутового  $\omega_z(t), Psi(t)$  руху, а також керуючі сили  $P_x(t), P_y(t)$  та момент  $M_z(t)$  структури для відпрацювання цих похибок. Із графіка  $Det(t)$ , рис. 3, видно, що керування структурою по детермінанту постійно підтримує максимальне (за модулем) значення детермінанта, у той час як цільова функція мінімального

енергоспоживання допускає зміну значення детермінанта в межах  $0 \leq |Det(t)| \leq 1$ , включаючи значення  $Det(t) = 0$ . Із графіків  $\alpha_1(t)$ ,  $\alpha_2(t)$  також видно, що  $|\alpha_1(t) - \alpha_2(t)| = \frac{\pi}{2}$ , тобто керуючі вектори  $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$  завжди ортогональні.

Як видно із наведених графіків, динамічні похибки, при налаштуванні структури на максимальний детермінант, суттєво менші динамічних похибок, при налаштуванні структури на мінімальне енергоспоживання. Максимальні відхилення параметрів, при дії зовнішніх впливів, для розглянутих законів керування, зведені у таблицю 2.

Таблиця 2 – Динамічні похибки позиціонування

Закон керування	$\Delta V_x [м/с]$	$\Delta X_g [м]$	$\Delta V_y [м/с]$	$\Delta Y_g [м]$	$\Delta \omega_z [зр/с]$	$\Delta Psi [зр]$
$Q_1 = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 \rightarrow \min$	0,02	0,6	0,15	5,0	1,3	11
$Q_2 =  \det M_1  \rightarrow \max$	0,018	0,4	0,01	0,1	0,8	2,5

Висновок по експерименту 2. Налаштування надлишкової структури по максимальному детермінанту дозволяє зменшити динамічні похибки позиціонування, у порівнянні із відомим методом мінімального енергоспоживання.

**Основні результати та їх обговорення.** Розроблено метод налаштування надлишкової структури виконавчих пристроїв судна, який дозволяє, під час проведення операцій динамічного позиціонування, зменшити динамічні похибки та підвищити точність. Отриманий результат пояснюється: використанням у системі керування бортового обчислювача, знаходженням, на кожному кроці бортового обчислювача, оптимального стану структури, що визначається максимальним детермінантом, шляхом вирішення задачі умовної оптимізації, із врахуванням обмежень типу рівностей (для одночасного формування необхідних керувань), та типу нерівностей (для врахування фізичних обмежень структури на силу упору та кути повороту гвинтів); переналаштуванням структури у визначене оптимальне положення. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що дозволяють налаштовувати та підтримувати надлишкову структуру у положенні з максимальним детермінантом, що дозволяє зменшити динамічні похибки системи керування. Метод розроблений для використання в бортовому обчислювачі автоматичної / автоматизованої системи керування рухом судна з надлишковими структурами виконавчих пристроїв і не може використовуватися для ручного керування, або на судах без надлишкового керування. Отримані результати є відтворюваними і можуть застосовуватися при розробці автоматичних / автоматизованих систем керування рухом суден з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм. Подальші дослідження можуть бути пов'язані з розробкою методів переналаштування для інших структур виконавчих пристроїв.

**Висновки.** Проведено аналіз літературних джерел, у яких розглядалися питання оптимального керування та використання надлишкових структур для підвищення надійності систем керування і оптимізації. Встановлено, що найближчі технічні рішення реалізовані в системах динамічного позиціонування, які дозволяють використовувати надлишкові структури як для підвищення надійності, так і для оптимізації процесів керування. Разом з тим, серед відомих рішень авторами не знайдено таких, що дозволяють використовувати надлишкові структури для зменшення динамічних похибок шляхом налаштування та підтримування структури у положенні з максимальним детермінантом. Розроблено метод керування надлишковою структурою офшорного судна з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм, який дозволяє зменшити динамічні похибки позиціонування. Працездатність та ефективність методу перевірені математичним моделюванням у середовищі MATLAB. Отриманий результат пояснюється: використанням у системі керування бортового обчислювача; знаходженням на кожному кроці бортового обчислювача оптимального стану структури, який визначається максимальним

детермінантом, із врахуванням обмежень типу рівностей, що визначають необхідні керування для підтримування позиції або заданого руху, та типу нерівностей, що враховують обмеження структури; переналаштуванням структури у визначене оптимальне положення.

Теоретичне значення отриманих результатів полягає у розробці методу керування надлишковою структурою, що оптимізує детермінант структури та забезпечує зменшення динамічних похибок позиціонування.

Практичне значення отриманих результатів полягає у перевірці працездатності та ефективності методу математичним моделюванням, можливості використання методу при розробці систем автоматичного / автоматизованого керування суднами з надлишковими структурами виконавчих пристроїв, для підвищення точності динамічного позиціонування.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zinchenko S. N., Lyashenko V. G., Grosheva O. A. Synthesis of optimal control of a vessel with boundary conditions, *Scientific Bulletin of the KhSMA*. 2018, Vol. 1 (18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.
2. Zinchenko S. N., Lyashenko V. G., Shalaeva A. A. Calculation and implementation of the maneuver of divergence from target vessels in the on-board digital computer. *Materials of the 4-st International Scientific and Practical Conference "Safety of life in transport and information technology, science, practice"*, Kherson, 14–16 spring 2017, pp. 230–235.
3. Zinchenko S. N., Lyashenko V. G. Using a neural network model of a vessel to solve control problems, *Scientific Bulletin of the KhDMA*. 2017, Vol. 2 (17), pp. 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.
4. Jacobellis G., Gandhi F., Floros M. Using Control Redundancy for Power and Vibration Reduction on a Coaxial Rotor Helicopter at High Speeds. *Journal of the American Helicopter Society*. 2019. <https://doi.org/10.4050/JAHS.64.032008>.
5. Gao W., Tang Q., Yao J., Yang Y. Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101862>.
6. Pakaste R., Laukia K., Wilhelmson M., Kuuskoski J. Experience with Azipod® propulsion systems on board marine vessels. *Marine Propulsion*. 1999. <https://library.e.abb.com/public/2314773146eb2d77c1256ec300341511/12-18%20ENG%209902.pdf>.
7. IMCA Marine Division: Guidelines for the design and operation of dynamically positioned vessels. *The International Marine Contractors Association*. 2019. <https://www.imca-int.com/product/guidelines-for-the-design-and-operation-of-dynamically-positioned-vessels/>.
8. Zinchenko S., Kobets V., Tovstokoryi O., Nosov P., Popovych I. Intelligent System Control of the Vessel Executive Devices Redundant Structure. *CEUR Workshop Proceedings*. 2023, Vol-3403, pp. 582–594. <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper44.pdf>.
9. Zinchenko S. N., Lyashenko V. G., Grosheva O. A. Optimal control of redundant azipod structures, *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice"*, Kherson, September 13–15, 2018, pp. 78–81.
10. Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Nosov P. S. The use of excessive actuators structures in automatic vessel movement control systems. *Materials of the III International Maritime Scientific Conference of the ship power plants and technical operation department of odessa national maritime university (MPP&O-2021)*, Odessa, April 29–30, 2021, p.p. 466–472. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>.
11. Zinchenko S. Study of a minimally excessive complanary control structure with two azimuth control devices. *Materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice"*, Kherson, September 9–12, 2020, p. 319–325.

12. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mamenko P. P., Moiseenko V. S., Mateichuk V. M., Kyrychenko K. V., Polishchuk V. O. Use of zero movements for adjustment of redundancy structures, *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference "Problems of Sustainable Development of the Maritime Industry (PSDMI-2021)*, Kherson: KhDMA, November 3–4, 2021.
13. Santos M. F., Santos Neto A. F., Honorio L., Silva M. F., Mercorelli P. Robust and Optimal Control Designed for Autonomous Surface Vessel Prototypes. *IEEE Access*. 2023, (99):1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239591>.
14. Rigatos G. A. Nonlinear optimal control approach for underactuated offshore cranes. *Ships and Offshore Structures*. 2022. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2150420>.
15. Bao X., Jiang C. Time-Optimal Control Algorithm of Aircraft Maneuver, in book: *Advances in Guidance, Navigation and Control. Proceedings of 2022 International Conference on Guidance, Navigation and Control*. 2023. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2\\_454](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2_454).
16. Bartels S., Helling S., Meurer T. Inequality Constrained Optimal Control for Rope-Assisted ASV Docking Maneuvers. *IFAC-PapersOnLine*. 2023, pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.407>.
17. Leparoux C., Herisse B., Jean F. Structure of optimal control for planetary landing with control and state constraints. *ESAIM Control Optimisation and Calculus of Variations*. 2022. <https://doi.org/10.1051/cocv/2022065>.
18. Cheng X., Deng S., Cheng B., Meiqian L., Zhou R. Optimization of bias current coefficient in the fault-tolerance of active magnetic bearings based on the redundant structure parameters, *Automatika*. 2020. 602–613. <https://doi.org/10.1080/00051144.2020.1806012>.
19. Huang W., Xu H., Wang J., Miao C., Ren Y., Wang L. Redundancy Management for Fault-tolerant Control System of an Unmanned Underwater Vehicle. *5<sup>th</sup> International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE): Proceedings*, China, 19–20 Sept. 2020. <https://doi.org/10.1109/CACRE50138.2020.9230038>.
20. Li W., Shi G. Redundancy management strategy for electro-hydraulic actuators based on intelligent algorithms. *Advances in Mechanical Engineering*. 2020. <https://doi.org/10.1177/1687814020930455>.
21. Piloting Vessels Fitted with Azimuthing Control Devices (ACD's). *United Kingdom Maritime Pilot's Association (UKMPA)*, Transport House, London. 2013. <https://www.yumpu.com/en/document/view/13677403/piloting-vessels-fitted-with-azimuthing-control-devices-acds>.
22. Dakova S., Wagner J. L., Gienger A., Tarín C., Böhm M., Sawodny O. Reconfiguration Strategy for Fault-Tolerant Control of High-Rise Adaptive Structures. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021, Vol. 6, Issue: 4. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3093861>.
23. Gulay T. A., Zakharov V. V., Kron R. V., Litvin D. B., Popova S. V. Mathematical model of reconfiguration of the aircraft integrated control system on the basis of embedding systems technology, *AIP Conf. Proc.* 2021, Vol. 2402, Issue 1, 070052. <https://doi.org/10.1063/5.0074028>.
24. Huang R., Tang S., Cai Zh., Zhao L. Robust Self-Reconfiguration for Fault-Tolerant Control of Modular Aerial Robot Systems. 2025. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.09376>. <https://arxiv.org/pdf/2503.09376>.
25. Wen J., Song Ya., Wang H., Han D., Yang Ch. Hybrid Adaptive Control for Tiltrotor Aircraft Flight Control Law Reconfiguration, *Aerospace*. 2023. 10(12): 1001. <https://doi.org/10.3390/aerospace10121001>.
26. Hu G., Li Ya., Li X., Zhang G., Zhang Zh., Wang X., Man W. Modular self-reconfigurable spacecraft: Development status, key technologies, and application prospect, *Acta Astronautica*. 2023. Vol. 207, pp. 240–256, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.03.012>.
27. Tan J., Shang M., Jin L. Metaheuristic-Based RNN for Manipulability Optimization of Redundant Manipulators, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024, Vol. 20, Issue 4, 6489–6498. <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3348830>.

28. Liu Y., Chen X., Wu L., Huang G., Luo J., Huang Yu. Global optimization of functional redundancy in a 6R robot for smoothing five-axis milling operations, *Engineering Optimization*. 2024, Vol. 56, Issue 1, pp. 138–154. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2147519>.

29. Gritsuk I., Nosov P., Bondarchuk A., Bondarchuk O. Using redundant control to optimize control torque, *Technology audit and production reserves*. 2023, 3(2(71)):20–24. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.282042>.

## REFERENCES

1. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Grosheva, O. A. (2018). Synthesis of optimal control of a vessel with boundary conditions, *Scientific Bulletin of the KhSMA*, Vol. 1 (18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.

2. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Shalaeva, A. A. (2017). Calculation and implementation of the maneuver of divergence from target vessels in the on-board digital computer, *Materials of the 4-st International Scientific and Practical Conference "Safety of life in transport and information technology, science, practice"*, Kherson, 14–16 spring 2017, pp. 230–235.

3. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G. (2017). Using a neural network model of a vessel to solve control problems, *Scientific Bulletin of the KhDMA No. 2 (17)*, pp. 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.

4. Jacobellis, G., Gandhi, F., Floros, M. (2019). Using Control Redundancy for Power and Vibration Reduction on a Coaxial Rotor Helicopter at High Speeds, *Journal of the American Helicopter Society*. <https://doi.org/10.4050/JAHS.64.032008>.

5. Gao, W., Tang, Q., Yao, J., Yang, Y. (2020). Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101862>.

6. Pakaste, R., Laukia, K., Wilhelmson, M., Kuuskoski, J. (1999) Experience with Azipod® propulsion systems on board marine vessels, *Marine Propulsion*. <https://library.e.abb.com/public/2314773146eb2d77c1256ec300341511/12-18%20ENG%209902.pdf>.

7. IMCA Marine Division: Guidelines for the design and operation of dynamically positioned vessels. (2019). The International Marine Contractors Association. <https://www.imca-int.com/product/guidelines-for-the-design-and-operation-of-dynamically-positioned-vessels/>.

8. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych I. (2023). Intelligent System Control of the Vessel Executive Devices Redundant Structure, *CEUR Workshop Proceedings*, Vol-3403, pp. 582–594. <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper44.pdf>

9. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Grosheva, O. A. (2018). Optimal control of redundant azipod structures, *Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice"*, Kherson, September 13–15, 2018, pp. 78–81.

10. Cherniavskiy, V. V., Zinchenko, S. M., Nosov, P. S. (2021). The use of excessive actuators structures in automatic vessel movement control systems, *Materials of the III International Maritime Scientific Conference of the ship power plants and technical operation department of odessa national maritime university (MPP&O-2021)*, Odessa, April 29–30, 2021, p.p. 466–472. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>.

11. Zinchenko, S. (2020). Study of a minimally excessive complanary control structure with two azimuth control devices, *Materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice"*, Kherson, September 9–12, 2020, p. 319–325.

12. Zinchenko, S. M., Nosov, P. S., Mamenko, P. P., Moiseenko, V. S., Mateichuk, V. M., Kyrychenko, K. V., Polishchuk, V. O. (2021). Use of zero movements for adjustment of redundancy structures, *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference "Problems of Sustainable Development of the Maritime Industry (PSDMI-2021)"*, Kherson: KhDMA, November 3–4, 2021.

13. Santos, M. F., Santos Neto, A. F., Honorio, L., Silva, M. F., Mercorelli, P. (2023). Robust and Optimal Control Designed for Autonomous Surface Vessel Prototypes, *IEEE Access*, (99):1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239591>.
14. Rigatos, G. A. (2022). Nonlinear optimal control approach for underactuated offshore cranes, *Ships and Offshore Structures*. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2150420>.
15. Bao, X., Jiang, C. (2023). Time-Optimal Control Algorithm of Aircraft Maneuver, in book: *Advances in Guidance, Navigation and Control. Proceedings of 2022 International Conference on Guidance, Navigation and Control*. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2\\_454](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2_454).
16. Bartels, S., Helling, S., Meurer, T. (2023). Inequality Constrained Optimal Control for Rope-Assisted ASV Docking Maneuvers, *IFAC-PapersOnLine*, pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.407>.
17. Leparoux, C., Herisse, B., Jean, F. (2022). Structure of optimal control for planetary landing with control and state constraints, *ESAIM Control Optimisation and Calculus of Variations*. <https://doi.org/10.1051/cocv/2022065>.
18. Cheng, X., Deng, S., Cheng, B., Meiqian, L., Zhou, R. (2020). Optimization of bias current coefficient in the fault-tolerance of active magnetic bearings based on the redundant structure parameters, *Automatika*, 602–613. <https://doi.org/10.1080/00051144.2020.1806012>.
19. Huang, W., Xu, H., Wang, J., Miao, C., Ren, Y., Wang, L. (2020). Redundancy Management for Fault-tolerant Control System of an Unmanned Underwater Vehicle, 5<sup>th</sup> International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE): Proceedings, China, 19–20 Sept. 2020. <https://doi.org/10.1109/CACRE50138.2020.9230038>.
20. Li, W., Shi, G. (2020). Redundancy management strategy for electro-hydraulic actuators based on intelligent algorithms. *Advances in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/1687814020930455>.
21. Piloting Vessels Fitted with Azimuthing Control Devices (ACD's). (2013). United Kingdom Maritime Pilot's Association (UKMPA), Transport House, London. <https://www.yumpu.com/en/document/view/13677403/piloting-vessels-fitted-with-azimuthing-control-devices-acds>.
22. Dakova, S., Wagner, J. L., Gienger, A., Tarín, C., Böhm, M., Sawodny, O. (2021). Reconfiguration Strategy for Fault-Tolerant Control of High-Rise Adaptive Structures, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, Issue: 4, 2021. <https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3093861>.
23. Gulay, T. A., Zakharov, V. V., Kron, R. V., Litvin, D. B., Popova, S. V. (2021). Mathematical model of reconfiguration of the aircraft integrated control system on the basis of embedding systems technology, *AIP Conf. Proc.*, Vol. 2402, Issue 1, 070052. <https://doi.org/10.1063/5.0074028>.
24. Huang, R., Tang, S., Cai, Zh., Zhao, L. (2025). Robust Self-Reconfiguration for Fault-Tolerant Control of Modular Aerial Robot Systems, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.09376>. <https://arxiv.org/pdf/2503.09376>.
25. Wen, J., Song, Ya., Wang, H., Han, D., Yang, Ch. (2023). Hybrid Adaptive Control for Tiltrotor Aircraft Flight Control Law Reconfiguration, *Aerospace* 10(12), 1001. <https://doi.org/10.3390/aerospace10121001>.
26. Hu, G., Li, Ya., Li, X., Zhang, G., Zhang, Zh., Wang, X., Man, W. (2023). Modular self-reconfigurable spacecraft: Development status, key technologies, and application prospect, *Acta Astronautica*, Vol. 207, P. 240–256, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2023.03.012>.
27. Tan, J., Shang, M., Jin, L. (2024). Metaheuristic-Based RNN for Manipulability Optimization of Redundant Manipulators, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 20, Issue 4, 6489–6498. <https://doi.org/10.1109/TII.2023.3348830>.
28. Liu, Y., Chen, X., Wu, L., Huang, G., Luo, J., Huang, Yu. (2024). Global optimization of functional redundancy in a 6R robot for smoothing five-axis milling operations, *Engineering Optimization* Vol. 56, Issue 1, pp. 138–154. <https://doi.org/10.1080/0305215X.2022.2147519>.

29. Gritsuk, I., Nosov, P., Bondarchuk, A., Bondarchuk, O. (2023). Using redundant control to optimize control torque, *Technology audit and production reserves* 3(2(71)):20–24, <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.282042>.

**Zinchenko S. M., Tovstokoryi O. M., Nosov P. S., Onyshko D. M., Kozachok Yu. A. AUTOMATIC ADJUSTMENT OF THE DYNAMIC POSITIONING SYSTEM REDUNDANT STRUCTURE BY DETERMINANT**

*The object of the study is the dynamic positioning processes of a vessel with two stern azipods and a bow thruster. Automation of motion control processes allows to significantly increase the efficiency of control systems by using modern methods of information processing, including optimization, and is used in many industries: space, aviation, marine, welding production, etc. New opportunities for increasing the efficiency of control systems have appeared with the use of redundant control. Redundant structures of actuators have traditionally been used for redundancy and increasing the reliability of control systems by excluding failed devices from operation. Over time, they have also been used to optimize control processes. In the marine industry, redundant structures have become most widespread in dynamic positioning systems. One of the requirements for such systems is to ensure maximum accuracy of positioning processes, including under the influence of external influences from any direction. According to the authors, this ability of the control system can be ensured by maximum dilution of the control vectors of the structure (maximization of the determinant). The paper developed a method for tuning a redundant structure that provides this possibility. The obtained result is explained by: using the on-board computer in the control system; finding the optimal state of the structure at each step of the on-board computer, which is determined by the maximum determinant, taking into account the constraints of the type of equalities, to create the necessary controls by the structure, and the type of inequalities, to take into account the constraints of the structure on the maximum thrust force and the angle of rotation of the screws; reconfiguring the structure to a certain optimal position. The operability and effectiveness of the method are confirmed by mathematical modeling in the MATLAB environment. The modeling results showed that the reconfiguration of the structure can be carried out against the background of the execution of the main functional tasks, without creating disturbing forces and moments. The obtained results are reproducible and can be used in the design of dynamic positioning systems.*

**Key words:** intelligent transportation systems; navigational safety; redundant structures; optimal settings; dynamic positioning; structure determinant.

© Зінченко С. М., Товстокорій О. М., Носов П. С., Онишко Д. М., Козачок Ю. А.

Статтю прийнято до редакції 21.04.2025

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТА МОНІТОРИНГУ ГІБРИДНОГО СУДНОВОГО ТУРБОКОМПРЕСОРА З НЕЧІТКОЮ МОДЕЛЛЮ

**Лебеденко Ю. О.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних технологій Київського національного університету технологій та дизайну, м. Київ, Україна, e-mail: lebedenko.yo@knutd.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240;

**Тимофеев К. В.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: kvtimofeev2013@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8668-6159;

**Вороненко С. В.**, к.т.н., доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: vr.sergey@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3880-9556;

**Бігун С. В.**, аспірант кафедри експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: bigunsergej4@gmail.com, ORCID: 0009-0007-6385-3296.

*Стаття присвячена актуальній задачі підвищення ефективності, надійності та безпеки експлуатації суднових енергетичних установок (СЕУ) через удосконалення систем моніторингу та діагностики ключового обладнання. Розглянуто концепцію та структуру інтелектуальної інформаційно-виміральної системи (ІВС) для комплексного моніторингу технічного стану та діагностики гібридних суднових турбокомпресорів (ГТК), які поєднують енергію відпрацьованих газів і додатковий електричний привід, однак їх складна конструкція та жорсткі умови експлуатації вимагають передових діагностичних підходів.*

*Запропонована ІВС функціонує на основі безперервного аналізу багатопараметричних даних, отриманих у реальному часі від комплексу датчиків, що фіксують ключові робочі параметри ГТК: температуру газів, тиск наддування, вібраційні характеристики, частоту обертання ротора, а також параметри роботи електричної машини. Система передбачає використання інтелектуальної обробки інформації, з акцентом на алгоритми нечіткої логіки. Такий вибір обґрунтований здатністю нечітких систем ефективно обробляти неточні, неповні або якісно виражені дані та формалізувати експертні знання інженерів-механіків, що забезпечує адекватну оцінку стану.*

*Ключовою функцією ІВС є високоточна та гнучка діагностика технічного стану турбокомпресора. Система оперативно розпізнає та класифікує три основні режими роботи: стабільний нормальний; стан із потенційним відхиленням, що потребує превентивних заходів; та критично несправний стан, що вимагає негайного втручання. Залежно від діагнозу, система формує інформаційну підтримку для прийняття рішень щодо коригування параметрів керування, зокрема оптимізації роботи асинхронної машини ГТК для підтримки ефективного наддування, та для активації механізмів аварійного регулювання.*

*Впровадження розробленої інтелектуальної системи сприятиме підвищенню ефективності турбокомпресора, забезпечить раннє виявлення та прогнозування несправностей, оптимізує технічне обслуговування та керування. Це має важливе практичне значення для підвищення надійності, економічності та продуктивності суднових двигунів у різних експлуатаційних умовах, а також для загального підвищення безпеки судноплавства.*

**Ключові слова:** суднова енергетична установка; гібридний турбокомпресор; інформаційно-вимірально-аналітична система; нечітка логіка; адаптивне керування; діагностика стану; моніторинг.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.031-044**

**Вступ.** Сучасні суднові енергетичні системи спрямовані на підвищення ефективності та надійності, де ключову роль відіграє оптимізація наддування двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ). Ефективне керування турбокомпресорами, особливо гібридного типу з асинхронною машиною, забезпечує краще згоряння палива, збільшує потужність та знижує викиди.

Системи керування турбокомпресорними установками (ТКУ) використовують обертові частотні перетворювачі для адаптації роботи компресора до змінних умов, таких як

навантаження двигуна, температура газів та параметри навколишнього середовища, підтримуючи оптимальний тиск і витрату повітря [1].

Інформаційно-вимірювальні частини є критично важливими, забезпечуючи передачу даних у керуючий модуль та виконуючи первинну діагностику. Збір даних з датчиків тиску, температури, обертів та навантаження дозволяє прогнозувати несправності та приймати управлінські рішення.

Інтелектуальна обробка інформації за допомогою нейронних мереж та нечіткої логіки розширює можливості цих систем, дозволяючи оперативну коригувати параметри та підвищувати надійність турбокомпресора. Такі системи самостійно адаптуються до змін, забезпечуючи стабільну роботу двигуна.

**Постановка проблеми.** Оптимізація процесів наддування двигунів внутрішнього згоряння є ключовим напрямком для задоволення вимог щодо ефективності, екологічності та надійності. Турбокомпресори гібридного типу, що використовують енергію викидних газів та додатковий привід від асинхронної машини, є передовим рішенням у цій галузі [2]. Однак, їхня складна природа вимагає високоточних та адаптивних систем керування.

Відомі системи керування ТКУ забезпечують регулювання параметрів наддування за допомогою обертового частотного перетворювача, який дозволяє адаптувати роботу компресора до змінних експлуатаційних умов, таких як навантаження двигуна, температура вихлопних газів і баланс енергоспоживання. Проте, складність взаємодії між турбіною, компресором та асинхронною машиною, а також вплив динамічних змін у судовій електроенергетичній системі, створюють значні виклики для забезпечення оптимальної та стабільної роботи.

Попри наявність розгалужених штатних систем контролю, їх функціонал здебільшого обмежений реєстрацією параметрів та аварійною сигналізацією при виході за жорстко встановлені межі.

Існуючі інформаційно-вимірювальні системи, хоч і забезпечують передачу параметрів до керуючого модуля та виконують базову діагностику, часто стикаються з обмеженнями щодо глибокого аналізу даних та прогнозування несправностей. Застосування інтелектуальної обробки інформації, зокрема нейронних мереж та алгоритмів нечіткої логіки, відкриває нові можливості для підвищення надійності та ефективності роботи турбокомпресора шляхом прогнозування потенційних відхилень та оперативного коригування робочих параметрів.

Таким чином, розробка нових підходів до створення інформаційно-вимірювальних систем турбокомпресорних установок, удосконалення методів моніторингу, аналізу та адаптивного керування є актуальним науково-технічним завданням. Розв'язання цієї проблеми сприятиме підвищенню ефективності судових двигунів, забезпеченню їх стабільної роботи в широкому діапазоні експлуатаційних умов, мінімізації часу простою та зниженню експлуатаційних витрат.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Сучасний морський транспорт прагне підвищити ефективність судових енергетичних установок (СЕУ) шляхом оптимізації енергоспоживання та автоматизації. Ключову роль у цьому відіграють системи турбонаддування, особливо гібридні турбокомпресори (ГТК). ГТК складаються з компресора, турбіни та асинхронної машини, яка або додає обертальний момент компресора (двигунний режим), або відбирає надлишкову потужність турбіни (генераторний режим) [3].

Турбіна, з'єднана з випускним колектором, та компресор, підключений до впускного колектора головного двигуна, забезпечують перерозподіл енергії. Компресор використовує енергію вихлопних газів, що обертають турбінне колесо. Повітря на вході компресора очищується, а на виході – охолоджується, що гарантує ефективну роботу ГТК за різних умов. Таким чином, ГТК функціонує у двох режимах, забезпечуючи оптимальне використання енергії. Дослідження показують, що такі системи можуть значно підвищити ККД двигунів – Mitsubishi повідомляє про можливість генерування до 250 кВт електроенергії, а Bowman

Power Group звітує про зниження витрати палива на 7% та збільшення потужності на 15% [4].

Система керування гібридним турбокомпресором (рис. 1) аналізує параметри двигуна: швидкість  $\omega_D$ , температуру викидних газів  $T_G$ , рівень наддування  $p$ ) та оптимізує режим роботи, використовуючи частотний перетворювач для регулювання частоти обертання асинхронної машини [5].

Додатковим фактором, що впливає на режим роботи турбокомпресора, є баланс електроенергетичної системи судна  $P_C$ . Коригування параметрів регулятора здійснюється на основі поточного рівня виробленої і спожитої потужності. Окрім цього, система враховує змінні експлуатаційні умови, що дозволяє забезпечити гнучке налаштування режимів роботи.

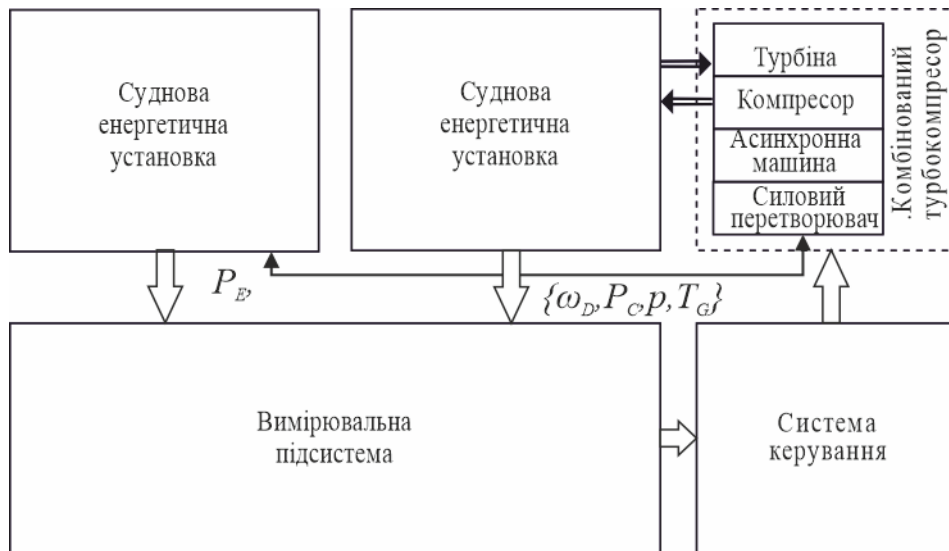


Рисунок 1 – Структурна схема системи гібридним турбокомпресором

Експлуатація суднових турбокомпресорів незмінно відбувається в екстремально складних умовах, що генерують значні та різнопланові навантаження на всі конструктивні елементи системи [6]. Зокрема, турбінна частина функціонує в умовах надзвичайно високих температур робочого середовища, які можуть регулярно сягати 600–700°C, а інколи й перевищувати ці показники. Такі температурні режими призводять до виникнення значних термічних напружень у металі, спричинених циклічним нагріванням та охолодженням, що неминуче веде до поступового термічного зношування матеріалів, втрати їх міцнісних характеристик та потенційної повзучості. Dodatkowo, інтенсивні механічні навантаження, включаючи значні відцентрові сили, що виникають під час обертання ротора з високою швидкістю, створюють постійний ризик пластичної деформації та втоми окремих прецизійних компонентів, особливо це стосується лопаткового апарату та самого ротора.

Крім термічних та механічних впливів, судновим турбокомпресорам доводиться постійно контактувати з високоагресивним корозійним середовищем. Викидні гази головного суднового двигуна містять різноманітні хімічно активні сполуки, такі як оксиди сірки та ванадію, які утворюються при згорянні важких сортів палива, і здатні інтенсивно руйнувати металеві поверхні. Процеси ерозії, спричинені твердими частками сажі та недогару, а також високотемпературна газова корозія найбільш інтенсивно проявляються на робочих та напрямних лопатках турбіни, які безперервно піддаються дії цих агресивних газів. Окрім корозійно-ерозійного зносу, важливим дестабілізаційним фактором є значні вібраційні навантаження. Вони можуть бути спричинені не лише нестабільною роботою самого двигуна чи нерівномірним розподілом потоку газів через турбіну, але й зовнішніми джерелами, такими як вібрації від гребного гвинта чи корпусу судна. Тривалий вплив таких вібрацій здатен викликати порушення прецизійного балансу ротора, що, у свою чергу, може призвести до значного зниження ефективності роботи компресорної частини, прискореного зносу та передчасного виходу з ладу підшипникових вузлів.

Ще однією з ключових експлуатаційних проблем турбокомпресорів є прогресивне забруднення їхньої проточної частини. Викидні гази, навіть після систем очищення, містять певну кількість твердих частинок – сажі, золи, продуктів неповного згоряння палива та мастила. Ці частинки поступово осідають та накопичуються на внутрішніх поверхнях компонентів, таких як лопатки компресора, дифузор та сопловий апарат турбіни. Такі відкладення змінюють аеродинамічні характеристики профілів, зменшують ефективну пропускну здатність каналів та негативно впливають на загальні робочі характеристики установки, призводячи до зниження ККД та збільшення витрат палива. Окрім цього, з часом можливі порушення герметичності ущільнень ротора, що можуть спричинити неконтрольовані витоки робочого тіла (повітря або газів), втрату тиску наддування, потрапляння мастила у проточну частину, і як наслідок – до подальшого зниження ефективності турбокомпресора та навіть його серйозного пошкодження.

Одним із основних викликів у забезпеченні ефективної та надійної роботи суднових гібридних турбокомпресорів є також необхідність постійного врахування та адаптації до широкого спектра змінних умов експлуатації. До таких умов належать не лише динамічне навантаження головного двигуна, але й загальний баланс суднової електроенергетичної системи, а також параметри навколишнього середовища, такі як температура, тиск і вологість повітря на вході в компресор. Тому сучасні системи керування повинні володіти розширеними можливостями, включаючи здатність до прогнозування розвитку потенційних несправностей, швидкого реагування на позаштатні ситуації та гнучкого адаптивного налаштування робочих параметрів ТКУ. Водночас аналіз літературних джерел показує, що більшість чинних систем зосереджені на керуванні, тоді як задачі глибокої інтелектуальної діагностики та прогнозування технічного стану залишаються менш дослідженими [7]. Широке використання сучасних технологій контролю, зокрема розгалужених сенсорних систем для безперервної оцінки ключових параметрів, таких як температура компонентів, рівні вібрацій у різних точках, тиск повітря та газів, електричні параметри асинхронної машини дозволяє значно підвищити інформативність системи керування, надійність роботи самої установки та мінімізувати ризики виникнення аварійних несправностей. Завдяки таким комплексним підходам, що поєднують точний моніторинг та інтелектуальне керування, експлуатація турбокомпресорів стає більш ефективною, економічною та довговічною, що є критично важливим для забезпечення конкурентоспроможності та безпеки морського транспорту.

Традиційні методи діагностування, які часто застосовуються в інженерних системах, зазвичай базуються на чітких, бінарних критеріях та жорстко визначених порогових значеннях, що розмежовують стани «норма» та «несправність». Однак, для такого складного та динамічного об'єкта, як судновий турбокомпресор, подібний підхід виявляється недостатньо гнучким та адекватним, оскільки не враховує плавність деградаційних процесів. У реальних умовах експлуатації технічний стан ТГУ характеризується низкою особливостей, що ускладнюють застосування класичних детермінованих моделей:

1. Поступовий розвиток дефектів: Більшість несправностей у турбокомпресорах (наприклад, знос підшипників, забруднення лопаток, утворення нагару) розвиваються не миттєво, а поступово. Технічний стан плавно переходить від ідеального до аварійного через низку проміжних, частково деградованих станів, що погано описуються бінарною логікою. Чітко визначити момент переходу від «ще нормального» до «вже несправного» стану часто буває неможливо.

2. Взаємний вплив різних параметрів: Робочі параметри ТГУ (температури, тиски, вібрації, оберти тощо) тісно взаємопов'язані. Зміна одного параметра часто спричиняє ланцюгову реакцію змін інших, і не завжди ця залежність є лінійною чи легко формалізованою, що робить ізольовану порогову оцінку окремих показників малоефективною.

3. Невизначеність граничних значень: Номінальні та гранично допустимі значення робочих параметрів можуть мати певні допуски, залежати від умов навколишнього середовища (температура та вологість повітря), режиму роботи двигуна, якості палива та мастильних матеріалів. Встановлення універсальних «чітких» меж для всіх можливих умов є складним завданням, яке часто призводить або до помилкових спрацьовувань, або до пропуску зароджуваних дефектів.

4. Суб'єктивність експертних оцінок: Значна частина знань про діагностику ТГУ накопичена у вигляді досвіду кваліфікованих інженерів-механіків. Ці знання часто мають якісний, описовий характер і важко піддаються строгій математичній формалізації в рамках традиційних логічних систем.

Техніка нечіткої логіки надає потужний математичний апарат, що дозволяє формально описати та врахувати вищезазначені типи невизначеностей, властиві складним технічним системам. Вона оперує поняттям ступеня належності до певної множини, а не лише бінарними значеннями, що дає змогу моделювати плавні переходи між станами, обробляти неточну та якісну інформацію та приймати обґрунтовані рішення в умовах неповної або нечіткої вхідної інформації, забезпечуючи таким чином більш адекватну, гнучку та реалістичну оцінку фактичного технічного стану турбокомпресора.

Аналіз актуальних наукових публікацій підтверджує значну перспективність інтелектуальних методів у діагностиці складного промислового обладнання. Є рішення для діагностики турбокомпресорних установок, спрямовані на виявлення несправностей у системах мінерального мастила турбогенераторів на плавучих видобувних платформах [8]. В основі таких діагностичних моделей лежить поєднання глибоких експертних знань, формалізованих через аналіз видів, наслідків та критичності відмов, з реальними експлуатаційними даними, отриманими від бортових датчиків.

Такий підхід демонструє високу ефективність діагностики навіть за умов дефіциту історичних даних про відмови, що є типовим для промислових систем і ускладнює навчання традиційних моделей машинного навчання. Нечіткі логічні системи забезпечують точну класифікацію несправностей та нормального функціонування, успішно виявляючи як аномалії, так і штатний стан. Важливою перевагою є можливість прямої інкорпорації знань експертів у модель, що робить її не лише точною, але й інтерпретованою для інженерного персоналу.

Водночас адаптація таких моделей до інших підсистем турбогенераторів або до складніших гібридних турбокомпресорів з інтенсивною взаємодією компонентів вимагає додаткових досліджень. Також актуальною залишається проблема вдосконалення моделей для ефективної діагностики швидкоплинних перехідних процесів та тимчасових розбіжностей у показаннях датчиків [9].

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є розробка та вдосконалення інформаційно-вимірювальної системи керування гібридними турбокомпресорами суднових двигунів шляхом інтеграції адаптивних інтелектуальних методів моніторингу та діагностики для підвищення ефективності, надійності та забезпечення стабільної роботи у змінних експлуатаційних умовах.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасні системи керування турбокомпресорами суднових двигунів потребують високоточної інформаційно-вимірювальної частини, яка забезпечує не лише контроль робочих параметрів, а й діагностику стану обладнання. Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану турбокомпресорної установки наведена на рис. 2.

Основною задачею системи є підтримка ефективного наддування двигуна шляхом комбінованої роботи турбіни та асинхронної машини. Оскільки керування здійснюється на основі складних взаємозв'язків між параметрами двигуна, важливу роль відіграє безперервний моніторинг таких величин, як тиск у впускному колекторі, температура

вихлопних газів, частота обертання компресора та навантаження двигуна. Дані параметри визначаються через систему датчиків, інформація з яких надходить до модуля керування.

Пропонована інтелектуальна інформаційно-вимірювальна підсистема (ІВП) є багатокомпонентним рішенням, спроектованим для всебічного моніторингу, глибокої діагностики технічного стану та реалізації адаптивного керування комбінованими судновими турбокомпресорними установками (ТГУ).

Центральним елементом є блок збору даних, що відповідає за оперативне та синхронізоване отримання вичерпної інформації про параметри роботи ТГУ.

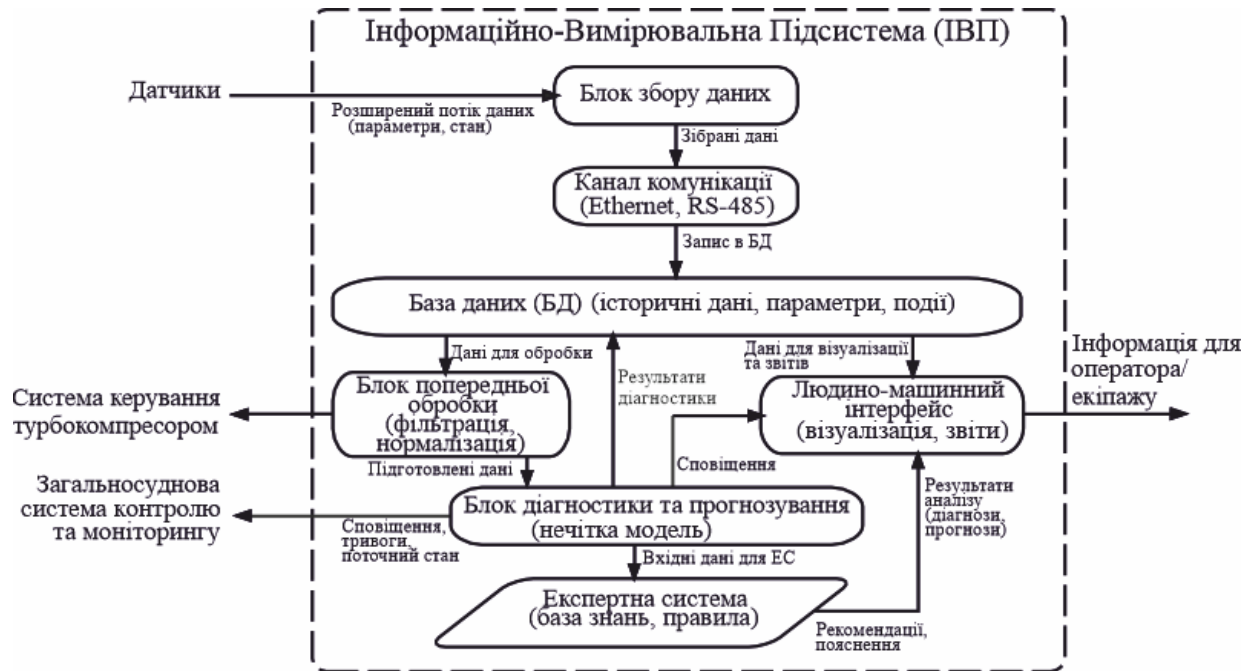


Рисунок 2 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи моніторингу стану гібридного турбокомпресора

Надійну та швидкісну передачу зібраних даних забезпечує канал комунікації, реалізація якого залежить від вимог до швидкості, відстані та надійності. Централізоване зберігання історичних даних параметрів ТГУ, результатів діагностики, подій, аварійних сигналів та налаштувань системи здійснюється спеціалізованою базою даних (БД). Функціонал БД охоплює запис, забезпечення цілісності, швидкий доступ для аналізу та візуалізації, а також довгострокове архівування.

Перед аналізом дані проходять через блок попередньої обробки, що включає фільтрацію, нормалізацію/стандартизацію, агрегацію та виділення ознак.

Блок діагностики та прогнозування стану аналізує оброблені дані для виявлення поточних несправностей, аномалій та прогнозування майбутнього технічного стану ТГУ, включаючи ймовірність відмов. Основними функціями блоку є виявлення відхилень, класифікація несправностей, оцінка їх серйозності та прогнозування залишкового ресурсу компонентів.

Експертна система надає оперативні рекомендації оператору на основі діагностики та закладених знань за допомогою механізму логічного виводу.

Взаємодія оператора з системою відбувається через людино-машинний інтерфейс, який візуалізує поточні параметри, історичні тренди, результати діагностики, прогнози, рекомендації та генерує звіти, забезпечуючи оперативне інформування через систему сповіщень та тривоги.

Переваги такої структури ІВП включають розширений моніторинг, ранню діагностику, прогнозування відмов для ефективного планування обслуговування та допомогу екіпажу, що підвищує надійність, безпеку та оптимізує роботу ТГУ.

Якщо в процесі аналізу ІВП фіксує зміни, які можуть призвести до зниження ефективності роботи компресора, вона ініціює передачу відповідних керуючих сигналів або рекомендацій для корекції параметрів. Інформаційно-вимірювальна підсистема здійснює комплексну оцінку технічного стану турбокомпресора через моніторинг чотирьох основних груп параметрів, що характеризують різні аспекти функціонування агрегату [10, 11]:

1. Температурні характеристики відіграють фундаментальну роль у діагностиці турбокомпресора, оскільки відображають енергетичну ефективність термодинамічних процесів та стан теплонапружених елементів конструкції. Температура газів перед турбіною  $T_1$  характеризує енергетичний потенціал робочого тіла та безпосередньо впливає на термічні напруження в лопатковому апараті турбіни. Температура газів після турбіни  $T_2$  відображає ступінь розширення робочого тіла в турбінному ступені та характеризує ефективність енергетичного перетворення. Зростання різниці  $T_1 - T_2$  свідчить про зниження ефективності турбіни внаслідок забруднення проточної частини або ерозійного зношування лопаток. Контроль температури повітря після компресора  $T_3$  дозволяє оцінити ефективність компресорної ступені та виявити процеси деградації компресорного колеса, що проявляються у зростанні температури стиснення. Особливе значення має моніторинг температури підшипників  $T_p$ , оскільки цей параметр безпосередньо характеризує механічний стан опорних вузлів ротора.

2. Система моніторингу параметрів тиску забезпечує оцінку аеродинамічної ефективності турбокомпресора та виявлення деградаційних процесів у проточній частині. Тиск наддувного повітря  $P_1$  характеризує продуктивність компресорної ступені та безпосередньо впливає на показники потужності двигуна. Зниження цього параметра при незмінних режимних умовах свідчить про погіршення аеродинамічних характеристик компресора внаслідок забруднення, ерозії або механічних пошкоджень робочого колеса. Контроль тиску випускних газів  $P_2$  дозволяє оцінити гідравлічний опір випускного тракту та ефективність турбінної ступені. Зростання цього параметра може вказувати на забруднення турбінного колеса або збільшення гідравлічних втрат у випускній системі. Особливо важливим діагностичним параметром є перепад тиску на компресорі  $\Delta P$ , який безпосередньо характеризує ступінь стиснення та енергетичну ефективність компресорної ступені.

3. Віброакустичні параметри є ключовим інформативним каналом для діагностики механічного стану турбокомпресора, дозволяючи виявляти дефекти ротодинамічної системи на ранніх стадіях [12, 13]. Середньоквадратичне значення вібрації відображає загальну динамічну активність агрегату і використовується для інтегральної оцінки. Його зростання може свідчити про дисбаланс ротора, ослаблення кріплень або проблеми з підшипниками. Спектральний аналіз вібросигналу надає детальну інформацію про природу та місцезнаходження дефектів, ідентифікуючи характерні частоти обертання ротора, лопаток та резонансні коливання. Контроль рівня шуму доповнює діагностику інформацією про аеродинамічні процеси, вказуючи на можливий помпаж чи кавітацію [14].

4. Моніторинг швидкісних параметрів забезпечує контроль кінематичних характеристик ротора турбокомпресора та виявлення порушень регулярності обертання. Частота обертання ротора  $n$  є основним режимним параметром, що визначає продуктивність агрегату та рівень динамічних навантажень. Нерівномірність обертання характеризує стабільність кінематичного режиму та може вказувати на розвиток механічних дефектів або порушень у системі регулювання. Зростання нерівномірності може свідчити про розвиток дисбалансу, ослаблення посадки робочих коліс на валу або нестабільність процесів у проточній частині.

5. Електричні характеристики асинхронної машини. Ця група параметрів є ключовою для діагностики саме гібридної частини установки. Моніторинг споживаного струму  $I$ , напруги  $U$  та електричної потужності  $P_{ам}$  дозволяє оцінити ефективність роботи машини як у

руховому, так і в генераторному режимах. Аномальне зростання струму при незмінному навантаженні може свідчити про проблеми з обмотками або підшипниками електричної машини, а аналіз потужності дає змогу оцінити її внесок у загальний ККД СЕУ.

Ефективність діагностичної системи забезпечується комплексним аналізом всіх груп параметрів з використанням алгоритмів багатомірної статистичної обробки та розпізнавання образів. Це дозволяє виявляти складні комбіновані дефекти та прогнозувати розвиток деградаційних процесів.

Для побудови діагностичної моделі на основі нечіткої логіки ключові контрольовані параметри ТГУ та її узагальнений технічний стан представляються у вигляді лінгвістичних змінних [15]. Кожна лінгвістична змінна характеризується набором терм-множин (термів) – якісних оцінок, що описують можливі значення цієї змінної мовою, наближеною до природної людської мови. Для кожного терму визначається відповідна функція належності, яка встановлює ступінь, з яким конкретне числове значення параметра належить до цієї нечіткої множини (терму).

Для кожного контрольованого параметра, дані про який надходять від ІВП, визначаються відповідні лінгвістичні змінні:

1. Температура газів перед турбіною ( $T_1$ ): Цей параметр є важливим індикатором теплового навантаження на турбіну та ефективності процесу згоряння в двигуні. Для нього можуть бути визначені такі терм-множини:

– «Низька» ( $\mu_1$ ): Вказує на можливі проблеми зі згорянням, недостатнє навантаження або несправності в паливній системі.

– «Нормальна» ( $\mu_2$ ): Оптимальний робочий діапазон.

– «Висока» ( $\mu_3$ ): Може свідчити про перевантаження, початкові проблеми з охолодженням або якістю палива.

– «Критична» ( $\mu_4$ ): Сигналізує про значне перевантаження, серйозні проблеми з охолодженням, наближення до небезпечних режимів.

2. Вібрація підшипникових вузлів ТГУ ( $V$ ): Рівень вібрації є прямим показником механічного стану роторних частин, стану підшипників та загального балансування установки.

– «Мінімальна» ( $v_1$ ): Ідеальний стан, низький рівень механічних шумів.

– «Допустима» ( $v_2$ ): Нормальний рівень вібрації для даного типу обладнання в робочому режимі.

– «Помірна» ( $v_3$ ): Вказує на можливий початковий знос, незначний дисбаланс або потребу у перевірці кріплень.

– «Значна» ( $v_4$ ): Сигналізує про суттєвий знос підшипників, серйозний дисбаланс, можливе пошкодження лопаток або інші механічні проблеми.

– «Недопустима» ( $v_5$ ): Критичний рівень вібрації, що може призвести до руйнування ТГУ.

3. Струм асинхронної машини ( $I$ ): Характеризує навантаження на електричну частину. Терм-множини: «Низький» ( $i_1$ ), «Номінальний» ( $i_2$ ), «Підвищений» ( $i_3$ ), «Критичний» ( $i_4$ ).

Вихідною лінгвістичною змінною діагностичної системи є узагальнена оцінка «Технічний стан ТГУ» ( $K$ ). Ця змінна інтегрує інформацію від аналізу всіх вхідних параметрів і відображає поточну працездатність та рівень деградації установки. Її терм-множина може включати:

– «Відмінний» ( $\sigma_1$ ): Установка працює в оптимальному режимі, параметри в нормі, ознаки зносу відсутні.

– «Добрий» ( $\sigma_2$ ): Незначні відхилення окремих параметрів, що не впливають на працездатність, можливий початковий природний знос.

– «Задовільний» ( $\sigma_3$ ): Наявні певні відхилення, що вказують на необхідність посиленого контролю або планового обслуговування; ефективність може бути дещо знижена.

– «Незадовільний» ( $\sigma_4$ ): Значні відхилення параметрів, висока ймовірність прогресування дефекту, потрібне найближче втручання для запобігання відмові.

– «Аварійний» ( $\sigma_5$ ): Критичний стан, що вимагає негайної зупинки та ремонту для запобігання серйозним пошкодженням або катастрофічним наслідкам.

Для кожної терм-множини, що характеризує лінгвістичну змінну в системі діагностики суднового турбокомпресора, визначаються функції належності. У практиці побудови нечітких систем діагностики часто використовуються трапецієподібні та трикутні функції належності завдяки їхній простоті, наочності та обчислювальній ефективності:

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a; \\ \frac{x-a}{x-b}, & a < x \leq b; \\ \frac{d-x}{d-c}, & b < x \leq c; \\ 1, & c < x \leq d; \\ 0, & x > d. \end{cases} \quad (1)$$

Приклади функцій належності для вхідних лінгвістичних змінних  $T_1$ ,  $V$  та  $I$  наведено на рис. 3, для вихідної змінної  $K$  – на рис. 4.

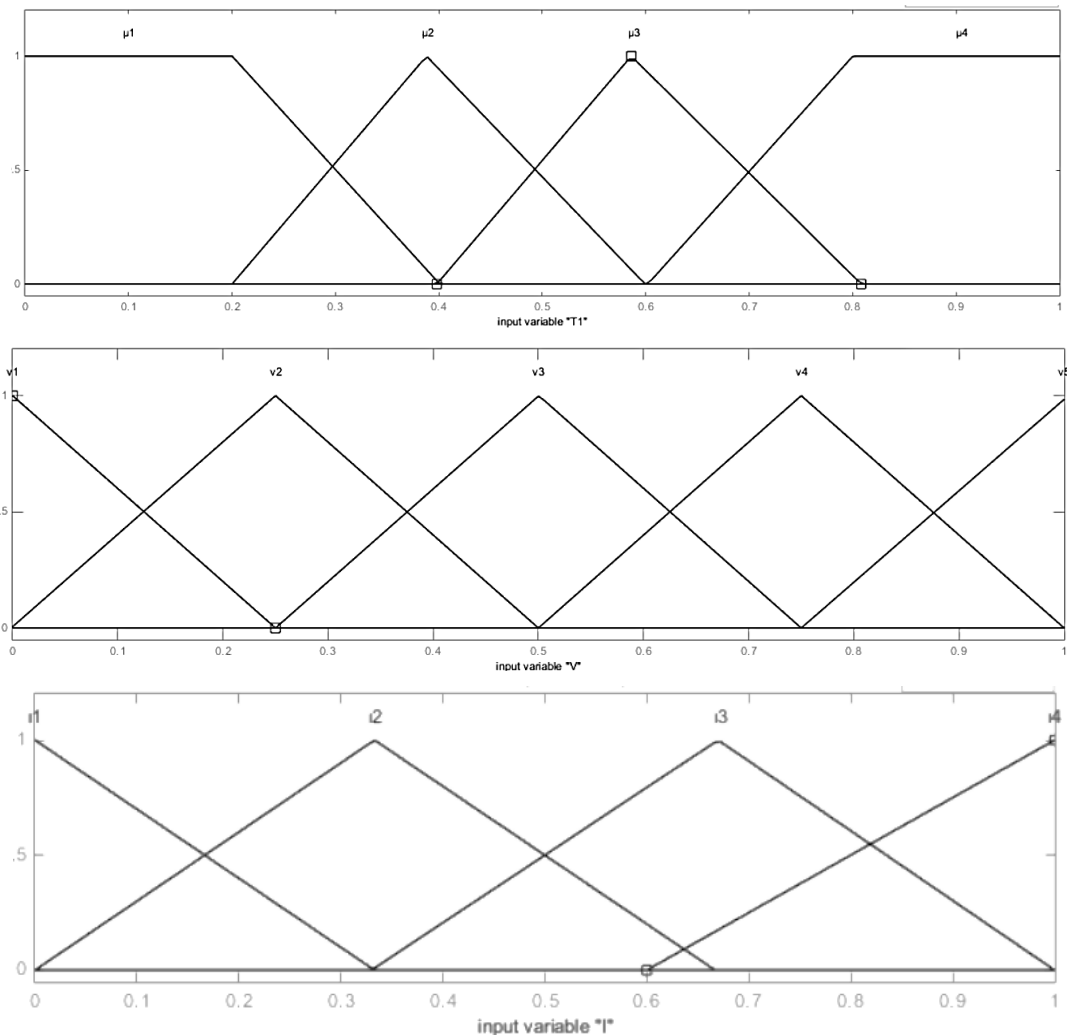


Рисунок 3 – Функції належності вхідних лінгвістичних змінних  $T_1$ ,  $V$  та  $I$

На основі цих лінгвістичних змінних та їх терм-множин формується база правил нечіткого логічного виводу:

Правило 1: Якщо температура газів перед турбіною є «Висока» або вібрація є «Недопустима», то технічний стан є «Аварійний».

Правило 2: Якщо температура газів перед турбіною є «Висока» та вібрація є «Значна» ТА тиск наддуву є «Знижений», то технічний стан є «Незадовільний».

Правило 3: Якщо всі параметри є в межах «Нормальних» значень, то технічний стан є «Відмінний».

Правило 4: Якщо вібрація є «Значна» та струм асинхронної машини є «Підвищений», то технічний стан є «Незадовільний».

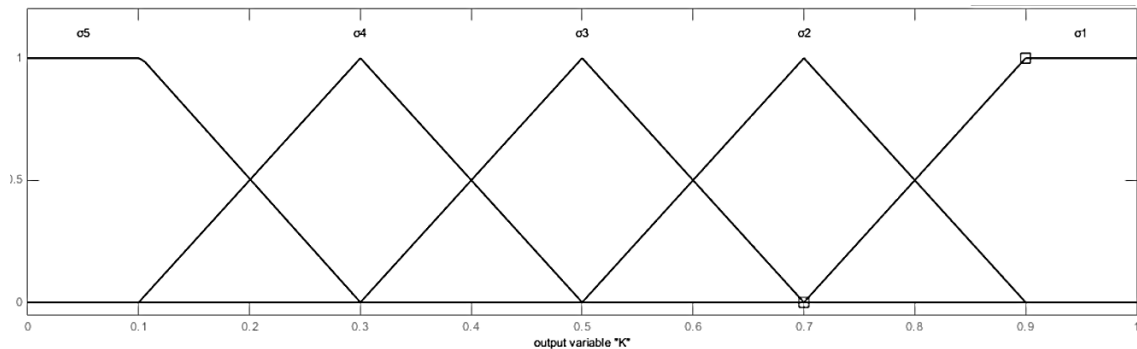


Рисунок 4 – Функції належності вихідної змінної K

Отримані від блоку попередньої обробки кількісні значення параметрів фазифікуються, обробляються системою нечіткого виводу за допомогою бази правил, і результат дефазифікується, перетворюючись на чітку кількісну або якісну оцінку, яка передається оператору та використовується експертною системою для формування рекомендацій [16, 17]. Цей підхід забезпечує гнучку та адаптивну діагностику, що враховує всю складність та невизначеність реальних умов експлуатації суднового турбокомпресора [7].

Для дефазифікації використовується метод центра ваги:

$$x_0 = \frac{\sum_i x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_i \mu(x_i)} \quad (2)$$

Технічний стан турбокомпресора характеризується інтегральним показником K, який обчислюється на основі нечіткого виведення:

$$K = F \{T_1, T_2, T_3, T_p, P_1, P_2, \Delta P, V, n\}, \quad (3)$$

де F – оператор нечіткого виведення.

Для прогнозування залишкового ресурсу використовується динамічна модель деградації технічного стану:

$$\frac{dK}{dt} = -\alpha(K) \cdot f(L, E), \quad (4)$$

де  $\alpha(K)$  – функція швидкості деградації, залежна від поточного стану; L – експлуатаційні навантаження; E – зовнішні впливи;  $f(L, E)$  – функція впливу експлуатаційних факторів.

Залишковий ресурс  $T_{res}$  визначається як час досягнення граничного стану  $K_{max}$ :

$$T_{res} = \int_{K(t)}^{K_{max}} \frac{dt}{\alpha(K) \cdot f(L, E)}. \quad (5)$$

Час відмови  $T_{res}$  визначається шляхом інтегрування зворотної величини швидкості деградації  $\alpha(K) \cdot f(L, E)$  в діапазоні від поточного стану  $K(t)$  до граничного стану  $K_{max}$ .

**Основні результати та їх обговорення.** Для розробки та комп'ютерного моделювання нечіткої моделі діагностики технічного стану турбокомпресорної установки (ТГУ) було використано редактор нечітких систем FIS у програмному комплексі MATLAB. У цьому редакторі модель нечіткого висновку представлена як ієрархічна структура, що інтегрує вхідні дані, базу правил та механізми генерації вихідних значень.

Для дослідження поведінки розробленої моделі діагностики в середовищі FIS MATLAB побудовані поверхні рішень. Приклад таких поверхонь наведено на рис. 5.

Вони наочно відображають залежність вихідної діагностичної змінної  $K$  від ключових вхідних параметрів, що дає можливість візуально оцінити коректність бази правил та точність налаштувань функцій належності.

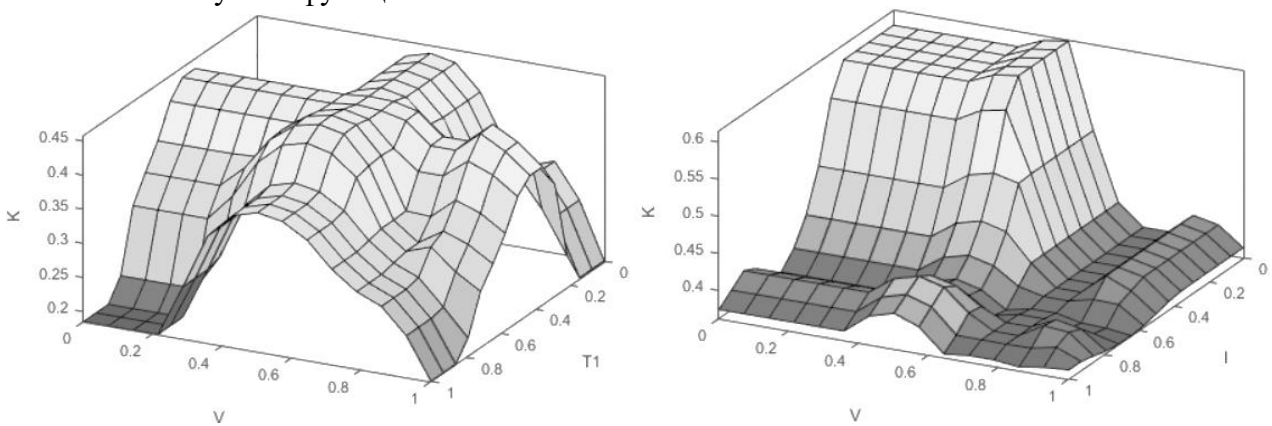


Рисунок 5 – Поверхні рішень нечіткої моделі системи моніторингу стану гібридного турбокомпресора

Оцінка ефективності створеної моделі здійснюється шляхом комп'ютерного моделювання в MATLAB Simulink із застосуванням імітаційної моделі [5]. Отримані результати дозволяють визначити рівень точності діагностики, швидкість реакції на виявлення несправностей та загальну надійність системи.

**Висновки.** Реалізація запропонованої інформаційно-вимірювальної системи дозволяє значно підвищити ефективність роботи турбокомпресора, забезпечити прогнозування потенційних несправностей та оптимізувати процеси керування. Вона виконує функцію не лише засобу збору даних, а й інтелектуального аналізу технічного стану обладнання, що сприяє безперервному підвищенню надійності та продуктивності суднового двигуна.

**Перспективи подальших досліджень.** Розроблена концепція інтелектуальної інформаційно-вимірювальної підсистеми для моніторингу стану суднових турбокомпресорів відкриває низку перспективних напрямків для подальших наукових та практичних досліджень. По-перше, існує значний потенціал у вдосконаленні алгоритмів діагностики та прогнозування шляхом застосування складніших моделей машинного навчання, таких як глибокі нейронні мережі або гібридних підходів, що поєднують переваги нечіткої логіки, нейронних мереж та експертних систем. По-друге, важливим напрямком є розвиток методів сенсорного злиття для інтеграції даних з різноманітних датчиків, що дозволить отримувати більш повне та надійне уявлення про стан ТГУ. Також перспективним є дослідження інтеграції розробленої ІВП з концепцією цифрового двійника турбокомпресорної установки, що уможливить проведення симуляцій, аналіз «що-якщо» сценаріїв та оптимізацію стратегій технічного обслуговування. Нарешті, дослідження можливостей оптимізації енергоефективності ТГУ на основі детальних даних моніторингу та прогнозів стану може призвести до розробки нових стратегій керування, що зменшують витрати палива та шкідливі викиди.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Woodyard D. Introduction: A Century of Diesel Progress. Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines. 2009. С. 2–5. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8984-7.00034-5>.
2. Adams J., Parlikad A. K., Amadi-Echendu J. A Bibliographic Review of Trends in the Application of 'Criticality' Towards the Management of Engineered Assets. Lecture Notes in Mechanical Engineering : Proceedings of the 12th World Congress on Engineering Asset Management and the 13th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery, 2–4 aug. 2017 p. Brisbane, Australia, 2017. С. 11–21. URL: <https://doi.org/10.3390/en17020392>.
3. Shiraishi K. Y., Ono Y., Sugishita K. Development of Large Marine Hybrid Turbocharger for Generating Electric Power with Exhaust Gas from the Main Engine. Shiraishi Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2010. Vol. 47, no. 3. P. 3–53.
4. Ono Y., Shiraishi K., Yamashita Y. Application of a Large Hybrid Turbocharger for Marine Electric-power Generation. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review. 2012. Vol. 49, no. 1. P. 29–33.
5. Аналіз ефективності роботи системи керування судновою комплексною електроенергетичною турбокомпресорною установкою з урахуванням впливу зовнішніх факторів / С. В. Вороненко та ін. Прикладні питання математичного моделювання. 2020. Т. 3, № 2.1. С. 60–71. URL: <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2020.3.2-1.5> (дата звернення: 31.05.2025).
6. TCA Project Guide. Exhaust Gas Turbocharger [Електронний ресурс]. – URL: <https://engine.od.ua/ufiles/TCA-turbochargers-Project-Guide.pdf> (дата звернення: 25.05.2025).
7. Parametric investigation and optimal selection of the hybrid turbocharger system for a large marine four-stroke dual-fuel engine / M. Figari та ін. Applied Thermal Engineering. 2022. Т. 208. С. 117991. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117991> (дата звернення: 31.05.2025).
8. Gharib H., Kovács G. Implementation and Possibilities of Fuzzy Logic for Optimal Operation and Maintenance of Marine Diesel Engines. Machines. 2024. Vol. 12, no. 6. URL: <https://doi.org/10.3390/machines12060425>.
9. Вороненко С., Короленко Е. Інтегровальний підхід до діагностики суднових турбогенераторів. IV осінні наукові читання: збірник наукових публікацій «Велес» за матеріалами міжнар. наук.-практ. конф. м. Київ, 12 жовт. 2015 р : Ч. 1., м. Київ, 12 жовт. 2015 р. Київ, 2015. С. 55–56.
10. Fuzzy Inference System Development for Turbogenerator Failure Diagnosis on Floating Production Offloading and Storage Platform / P. F. Castro et al. Energies. 2024. Vol. 17, no. 2. P. 392. URL: <https://doi.org/10.3390/en17020392> (дата звернення: 25.05.2025).
11. Fuzzy logic control of diesel engine turbocharging and exhaust gas recirculation / R. Wijetunge et al. Food Chemistry. 2000. P. 11–21.
12. Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems / O. Polyvoda et al. Advances in Intelligent Systems and Computing. Cham, 2019. P. 97–109. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7) (дата звернення: 25.05.2025).
13. Діагностика турбокомпресора дизельного двигуна за допомогою аналізу віброакустичного спектру / Р. Варбанець та ін. Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2020. № 6(166). С. 24–33 <http://dx.doi.org/10.32620/akt.2020.6.03>. (дата звернення: 25.05.2025).
14. ISO 20816-8:2018 Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration Part 8: Reciprocating compressor systems URL: <https://www.iso.org/standard/75440.html> (дата звернення: 25.05.2025).
15. Zadeh L. A. Fuzzy sets. Information and Control. 1965. Т. 8, № 3. С. 338–353. URL: [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x) (дата звернення: 31.05.2025).

16. Mamdani E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*. 1974. Vol. 121, no. 12. P. 1585. URL: <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328> (date of access: 31.05.2025).

17. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1985. SMC-15, № 1. C. 116–132. URL: <https://doi.org/10.1109/tsmc.1985.6313399> (дата звернення: 31.05.2025).

## REFERENCES

1. Woodyard, D. (2009). Introduction: A Century of Diesel Progress. *U Pounder's Marine Diesel Engines and Gas Turbines*. (s. 2–5). <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8984-7.00034-5>.

2. Adams, J., Parlikad, A. K., & Amadi-Echendu, J. (2017). A Bibliographic Review of Trends in the Application of ‘Criticality’ Towards the Management of Engineered Assets. *U Lecture Notes in Mechanical Engineering* (s. 11–21). <https://doi.org/10.3390/en17020392>.

3. Shiraishi, K. Y., Ono, Y., & Sugishita, K. (2010). Development of Large Marine Hybrid Turbocharger for Generating Electric Power with Exhaust Gas from the Main Engine. *Shiraishi Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 47(3), 3–53.

4. Ono, Y., Shiraishi, K., & Yamashita, Y. (2012). Application of a Large Hybrid Turbocharger for Marine Electric-power Generation. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 49(1), 29–33.

5. Voronenko, S. V., Subbotin, O. V., Lebedenko, Y. O., & Rudakova, H. V. (2020). Analysis of the Control System Efficiency of the Ship Integrated Electricity Installing Turbo with the Influence of External Factors. *Applied Questions of Mathematical Modeling*, 3(2.1). <https://doi.org/10.32782/kntu2618-0340/2020.3.2-1.5>.

6. TCA Project Guide. Exhaust Gas Turbocharger. (b. d.). <https://engine.od.ua/ufiles/TCA-turbochargers-Project-Guide.pdf>.

7. Figari, M., Theotokatos, G., Coraddu, A., Stoumpos, S., & Mondella, T. (2022). Parametric investigation and optimal selection of the hybrid turbocharger system for a large marine four-stroke dual-fuel engine. *Applied Thermal Engineering*, 208, 117991. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117991>.

8. Gharib, H., & Kovács, G. (2024). Implementation and Possibilities of Fuzzy Logic for Optimal Operation and Maintenance of Marine Diesel Engines. *Machines*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/machines12060425>.

9. Voronenko, S., & Korolenko, E. (2015). Intehruvalnyi pidkhid do diahnostryky sudnovykh turbogeneratoriv. *U IV osinni naukovi chytannia: zbirnyk naukovykh publikatsii «Veles» za materialamy mizhnar. nauk.-prakt. konf. m. Kyiv, 12 zhovt. 2015 r* (s. 55–56).

10. Castro, P. F., Lira, G. R. S. d., Vilar, P. B., Costa, E. G. d., & Carvalho, F. B. S. (2024b). Fuzzy Inference System Development for Turbogenerator Failure Diagnosis on Floating Production Offloading and Storage Platform. *Energies*, 17(2), 392. <https://doi.org/10.3390/en17020392>.

11. Wijetunge, R. S., Brace, C. J., Hawley, J. G., & Vaughan, N. D. (2000). Fuzzy logic control of diesel engine turbocharging and exhaust gas recirculation. *Food Chemistry*. P. 11–21.

12. Polyvoda, O., Rudakova, H., Kondratieva, I., Rozov, Y., & Lebedenko, Y. (2019). Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems. *U Advances in Intelligent Systems and Computing* (s. 97–109). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7).

13. Varbanets, R. A., Klymenko, V. H., Minchev, D. S., Zalozh, V. I., Kyrnats, V. I., & Aleksandrovska, N. I. (2020). Diahnostryka turbokompresora dyzelnoho dvyhuna za dopomohoiu analizu vibroakustychnoho spektru. *Aerospace technic and technology*, (6), 24–33. <https://doi.org/10.32620/akt.2020.6.03>.

14. ISO 20816-8:2018 Mechanical vibration – Measurement and evaluation of machine vibration Part 8: Reciprocating compressor systems URL: <https://www.iso.org/standard/75440.html> (дата звернення: 25.05.2025).

15. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x).

16. Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12), 1585. <https://doi.org/10.1049/piee.1974.0328>.

17. Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-15(1), 116–132. <https://doi.org/10.1109/tsmc.1985.6313399>.

**Lebedenko Yu. O., Tymofeev K. V., Voronenko S. V., Bihun S. V. INTELLIGENT INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM FOR DIAGNOSTICS AND MONITORING OF A HYBRID MARINE TURBOCHARGER WITH A FUZZY MODEL**

*This paper focuses on enhancing the efficiency and reliability of modern marine power units through advanced diagnostic and monitoring systems. It presents an intelligent information-measuring system (IMS) designed for real-time condition monitoring of hybrid marine turbochargers (HMTCs), which integrate exhaust gas recovery with auxiliary electric motor/generator support. Due to their complexity and demanding operational conditions, HMTCs require sophisticated diagnostics. The proposed IMS leverages fuzzy logic for adaptive control and predictive maintenance. The IMS is structured to process multi-parameter data streams from sensors that monitor not only key parameters of the turbo-gas-dynamic components (such as temperature, pressure, rotational speed, vibrations, and lubrication) but also the operational parameters of the electrical machine. Fuzzy logic algorithms enable precise sensor data interpretation, addressing real-world uncertainty and formalizing expert knowledge. The system employs fuzzification, fuzzy inference rules, and defuzzification to generate accurate diagnostic assessments, distinguishing normal operation, potential deviations, and critical faults. With growing industry demands for fuel efficiency and reliability, conventional diagnostics often fail to account for HMTC complexities. The scientific novelty of this research lies in its adaptive diagnostic process using fuzzy logic, which models expert-derived rules for nuanced fault detection. The IMS aids in optimizing control parameters, regulating supercharging, and activating emergency systems, thereby improving early fault detection. This IMS has significant maritime applications, particularly for vessels with hybrid turbocharging. By supporting condition-based maintenance, it reduces downtime and enhances operational efficiency. Its ability to ensure reliable engine performance promotes safer maritime operations and contributes to sustainable shipping through improved fuel economy. Future research could explore experimental validation and broader integration into ship energy management systems.*

**Key words:** marine power plant; combined turbocompressor; information-measuring system; fuzzy logic; adaptive control; condition diagnostics; monitoring.

© Лебеденко Ю. О., Тимофеев К. В., Вороненко С. В., Бігун С. В.

Статтю прийнято до редакції 01.06.2025

***ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ***  
***ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY***

## МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ОСАДКИ МОРСЬКОГО СУДНА ВНАСЛІДОК ЗМІНИ ГУСТИНИ ВОДИ

**Андрєєв А. М.**, д.пед.н., професор, завідувач кафедри загальної та прикладної фізики Запорізького національного університету, м. Запоріжжя, Україна, e-mail: andreevandrijn@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5390-6813;

**Стовба Т. А.**, к.е.н., доцент, доцент кафедри економіки та морського права Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: stovba.t1210@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2433-1122.

*У статті розглянуто проблему визначення зміни осадки морського судна, обумовленої зміною густини води. Її практичне значення тісно пов'язане з розв'язанням завдань безпечного плавання. Одним із таких завдань є розрахунок посадки судна на етапі розроблення його вантажного плану. Іншим завданням є визначення маси вантажу на основі вимірювання осадки судна до та після вантажної операції. Порівняльний аналіз деяких методів визначення зміни осадки судна зі зміною густини води виявив межі їх практичного застосування. Вони визначаються припущеннями, зробленими під час отримання робочої формули. Неврахування цих меж може призводити до виникнення грубих помилок у розрахунках посадки судна, а на практиці – до неправильного його завантаження. Розглянуті методи проілюстровані конкретними прикладами. У статті також показано можливість розширення практичної значущості методу граничної оцінки для визначення зміни осадки не лише прямокутних суден. Метод є також корисним у випадках: оцінювання верхньої межі зміни осадки судна, викликаній зміною густини води; визначення зміни осадки у випадку, коли густина води при переході судна змінюється не суттєво. Запропоновано критерій, що дозволяє встановити точність методу граничної оцінки зміни осадки судна. Зокрема, показано, що можна знайти для певного діапазону осадок критичні значення коефіцієнта вертикальної повноти, за яких похибка методу граничної оцінки дорівнюватиме наперед заданому значенню (за конкретної різниці густини води). Визначений критерій дозволяє оцінювати умови, коли розбіжність у результатах за «точними» методами та методом граничної оцінки може бути прийнятною для практичних цілей. Важливі напрями подальших досліджень пов'язані з підвищенням точності вимірювання осадки судна та густини води, адже похибки цих вимірювань значно обмежують точність визначення водотоннажності судна.*

***Ключові слова:** плавучість; вантажна марка; осадка судна; густина води; вплив густини води на осадку судна; коефіцієнти повноти; метод граничної оцінки зміни осадки судна.*

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.046-058**

**Вступ.** Однією з найважливіших морехідних характеристик судна, що пов'язана із безпекою плавання, є плавучість. Ця характеристика відображає здатність судна ходити із певною осадкою за заданої кількості вантажу [1]. Запас плавучості забезпечується висотою надводного борта, його мінімальне значення регламентується Міжнародною конвенцією про вантажну марку [2]. Отже, важливим завданням безпечного плавання є розрахунок посадки судна на етапі розроблення його вантажного плану. Для цього, зокрема, визначають осадки судна (носом та кормою) відповідно до його водотоннажності та густини води, в якій відбуватиметься перехід. На практиці прапляється також зворотна задача, що передбачає вимірювання осадки судна до та після навантаження/розвантаження для визначення маси вантажу (зокрема, навалочного). Тож осадка тісно корелює з економічною складовою експлуатації морського судна. Наприклад, зміна осадки судна «SUNRAY» навіть на 1 см (з 9,50 м до 9,51 м), відповідає понад 56 тонам вантажу або приблизно 36400–42000 дол. США (для сирової нафти) залежно від впливу різних факторів (маршруту, типу судна, геополітичних факторів, цін на бункер тощо).

**Постановка проблеми.** Тоді як об'єм зануреної частини судна визначається лише водотоннажністю та густиною води, його осадка залежить також від форми корпусу (його обводів) і цей вплив аналітично врахувати складно. Саме ця обставина ускладнює визначення зміни осадки судна  $\Delta T$  залежно від зміни густини води при переході.

Аналіз відомих підходів визначення зміни осадки судна, що викликана зміною густини води, дав змогу виділити рекомендації щодо їх застосування в конкретних випадках.

Було також виявлено певні некоректності у застосуванні методів визначення зміни осадки судна зі зміною густини води. Адже кожен метод має свої межі застосування, що визначаються припущеннями, зробленими під час отримання робочої (розрахункової) формули. Неврахування цих меж може призводити до виникнення грубих помилок у розрахунках посадки судна, а на практиці – до неправильного його завантаження.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Теоретичні основи гідростатики суден розглядалися Т. Фоссеном (Thor I. Fossen) у роботі [3]. Різні аспекти проблеми врахування впливу густини води на осадку морського судна розглядалися у науковій та навчальній літературі. Зокрема, проведений В. В. Івченком аналіз внеску різних чинників на густину забортної води виявив, що помітний внесок у зміну густини води, а, отже, й осадки судна, чинять зміна солоності та температура води [4].

Деякі методи визначення зміни осадки судна зі зміною густини води наведені у навчальних посібниках Х. Дж. Персі (H. J. Pursey) [5] та І. К. Кларка (I. C. Clark) [6]. Розглянуто, зокрема, особливості визначення зміни осадки за допомогою поправки FWA [6], а також більш загальний випадок – за допомогою параметра «число тон на 1 см осадки» (параметр TRC) [5]. Окремо розглянуто спосіб визначення зміни осадки у випадку прямостінних суден [5], однак не наводиться критерій, за яким можна було б оцінювати точність цього способу у випадку реальних суден.

Точність методів визначення зміни осадки судна на практиці обмежується точністю вимірювання самої осадки. Серед причин можливих похибок можуть бути такі [7]: погані погодні умови, хвилі на поверхні води; крен судна; явище паралакса при зчитуванні значень осадки; просідання судна внаслідок течії, особливо на міліні; велика різниця температури повітря і води, що призводить до різниці в тепловому розширенні зануреної та надводної частини корпусу судна; диферент судна; значення густини води можуть дещо відрізнятись з глибиною та в різних місцях навколо судна; можливий прогин/перегин судна. У цьому ж документі вказується на те, що наявну на судні табличну залежність водотоннажності від осадки також не можна вважати абсолютно точною (похибки методів обчислень).

Підвищення точності вимірювання осадки судна також було предметом наукових досліджень. Зокрема, у статті [8] досліджено вплив похибки у вимірюванні осадки судна на результати визначення водотоннажності за гідростатичними таблицями. Як альтернатива візуального вимірювання осадки запропоновано оптоволоконний датчик рівня рідини. Є відомим також спосіб контролю та вимірювання осадки за допомогою рідинних манометрів, шкали яких закріплюють на однаковій висоті з обох бортів судна [7]. У роботі [9] запропоновано протиколівальний пристрій, що дозволяє підвищити точність вимірювання осадки судна в умовах хвилювання на поверхні води. У дослідженнях [10, 11, 12] порівнюються методи візуального вимірювання осадки та методи її визначення розпізнаванням зображення, другий метод вважається більш перспективним. Точність вимірювання осадки судна цими методами обмежується формою меніска води на межі зі змоченою поверхнею борта (за повного штилю).

**Мета та задачі дослідження.** Метою статті є порівняльний аналіз відомих методів визначення зміни осадки судна, що обумовлена зміною густини води, а також з'ясування меж застосування цих методів.

Відповідно до мети були сформульовані такі завдання дослідження:

1. Проаналізувати припущення, що мають місце під час отримання робочої формули в основних методах визначення зміни осадки судна, обумовленої зміною густини води.
2. З'ясувати межі практичного застосування цих методів.
3. Обґрунтувати можливість розширення практичної значущості методу граничної оцінки для визначення зміни осадки суден, запропонувати критерій застосування методу.
4. Проілюструвати розглянуті методи конкретними прикладами.

**Виклад основного матеріалу.** Нехай судно переходить із води густиною  $\rho_1$  у воду густиною  $\rho_2$ . Для визначеності приймемо, що  $\rho_1 > \rho_2$  (рис. 1). Відповідно до закону Архімеда за такого переходу зменшення сили Архімеда (сили підтримки) завдяки

зменшенню густини води  $(\rho_1 - \rho_2)V_1$  компенсується збільшенням цієї сили завдяки зростанню об'єму зануреної частини судна:

$$(\rho_1 - \rho_2)V_1 = \rho_2(V_2 - V_1). \quad (1)$$

Вводячи позначення  $\Delta\rho \equiv \rho_2 - \rho_1$ ,  $\Delta V \equiv V_2 - V_1$ , маємо:

$$\Delta\rho \cdot V_1 = -\rho_2 \cdot \Delta V. \quad (2)$$

З формули (2) видно, що зменшення густини води ( $\Delta\rho < 0$ ) призведе до збільшення осадки судна ( $\Delta V > 0$ ) і навпаки. Формула (1) є вихідною для виведення робочих формул описаних нижче методів визначення зміни осадки судна. У статті осадкою вважатимемо середню осадку судна.

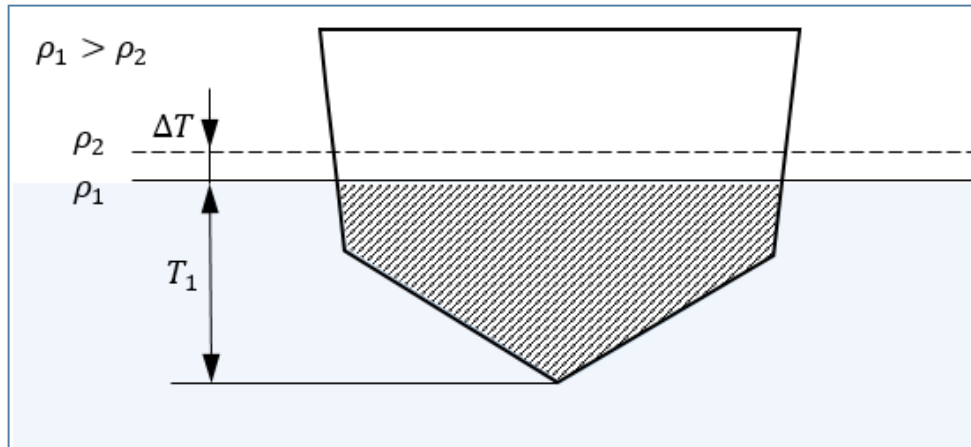


Рисунок 1 – Зміна осадки судна  $\Delta T$  при переході з води густиною  $\rho_1$  у воду густиною  $\rho_2$  ( $\rho_1 > \rho_2$ ):  $T_1$  – осадка судна у воді густиною  $\rho_1$

**Метод визначення зміни осадки за водотоннажністю судна  $D$  та параметром ТРС.**

Параметр ТРС (Tones per 1 cm) чисельно дорівнює масі вантажу, що спричиняє збільшення осадки судна на 1 см:

$$\text{TPC} \equiv q_{1\text{см}} = \frac{\delta D}{\delta T} \cdot \frac{1}{100}, \left( \frac{\text{т}}{\text{см}} \right). \quad (3)$$

Із зануренням судна на малу величину  $\delta T$  (1 см) площа  $S$  ватерлінії практично не змінюється, тому відповідна зміна об'єму занурення судна дорівнює:

$$\delta V = S\delta T,$$

а зміна водотоннажності

$$\delta D = \rho S\delta T. \quad (4)$$

Після підстановки (4) в (3) отримуємо:

$$q_{1\text{см}} = \frac{\rho S}{100}. \quad (5)$$

Після заміни об'єму  $V_1$  у рівнянні (1) формулою  $V_1 = D/\rho_1$  та наступної підстановки формули (5) отримуємо робочу формулу методу:

$$\Delta T = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \cdot \frac{D}{100q_{1\text{см}}}. \quad (6)$$

Цей метод є найбільш загальним за сферою використання, оскільки дозволяє визначати зміну осадки, обумовленої зміною густини води, за довільної (але відомої) водотоннажності судна. Проте для його використання потрібно знати ще й ТРС (за густини води  $\rho_1$ ), що відповідає цій водотоннажності. Відповідну інформацію можна знайти за вантажною шкалою судна або таблиці гідростатичних елементів.

*Приклад 1.* Судно з водотоннажністю  $D = 40000$  т здійснює перехід з району, де густина води  $\rho_1 = 1,015$  т/м<sup>3</sup> до району з густиною води  $\rho_2 = 1,005$  т/м<sup>3</sup>. Знайти зміну його

осадки, якщо число тон на 1 см осадки в воді густиною  $\rho_0 = 1,025 \text{ т/м}^3$  дорівнює  $q_{1\text{см}}(\rho_0) = 55,1 \text{ т/см}$ .

*Розв'язання.* Приведемо значення  $q_{1\text{см}}$  до густини води  $\rho_1 = 1,015 \text{ т/м}^3$ . Для цього скористаємось очевидним співвідношенням:

$$\frac{q_{1\text{см}}(\rho_1)}{q_{1\text{см}}(\rho_0)} = \frac{\rho_1}{\rho_0} \quad (7)$$

Справедливість виразу (7) є наслідком того, що в межах зміни осадки судна, викликаній зміною густини води, площа ватерлінії практично не змінюється.

$$q_{1\text{см}}(\rho_1) = \frac{\rho_1}{\rho_0} \cdot q_{1\text{см}}(\rho_0) = 54,6 \text{ т/см}. \quad (8)$$

За формулою (6), врахувавши (8), визначаємо зміну осадки судна:  $\Delta T \approx 7,3 \text{ см}$ .

**Метод визначення зміни осадки за відомою поправкою FWA.** Поправка на прісну воду FWA (Fresh Water Allowance) визначається для кожного судна. Вона дорівнює зміні осадки судна ( $u$  мм) з водотоннажністю, що відповідає літній вантажній марці, при його переході з морської води в прісну та навпаки. Іншими словами, FWA чисельно дорівнює відстані ( $u$  мм) між літньою вантажною маркою та вантажною маркою в прісній воді.

Формулу для розрахунку FWA можна отримати з (6). Якщо судно переходить із морської води ( $\rho_1 = 1,025 \text{ т/м}^3$ ) у прісну ( $\rho_2 = 1,000 \text{ т/м}^3$ ), формула для зміни осадки (6) набуває вигляду:

$$\Delta T = \frac{1}{40} \cdot \frac{D}{100q_{1\text{см}}}. \quad (9)$$

Якщо у формулу (9) підставити значення водотоннажності  $D$ , що спричиняє осадку судна по літню вантажну марку, а також відповідне цій осадці значення  $q_{1\text{см}}$  (TPC), отримаємо формулу для поправки на прісну воду. Виражена в мм ця поправка дорівнюватиме:

$$FWA = \Delta T(\text{мм}) = \frac{D}{4q_{1\text{см}}}. \quad (10)$$

Отже, визначення зміни осадки судна  $\Delta T$  за відомою поправкою FWA буде коректним, якщо, по-перше, судно завантажене повністю (повністю використана його вантажопідйомність), та, по-друге, судно переходить із морської води ( $\rho_1 = 1,025 \text{ т/м}^3$ ) у прісну ( $\rho_2 = 1,000 \text{ т/м}^3$ ) або навпаки. В іншому випадку (наприклад, за неповного завантаження) метод буде давати похибку.

*Приклад 2.* Судно має осадку  $T_1 = 7,18 \text{ м}$  у морській воді густиною  $1,025 \text{ т/м}^3$ . Якою буде осадка судна в воді густиною  $1,009 \text{ т/м}^3$ ? Поправка FWA для судна дорівнює 122 мм.

*Розв'язання.* Поправка FWA справедлива для випадку, якщо густина води змінюється від значення  $1,025 \text{ т/м}^3$  до значення  $1,000 \text{ т/м}^3$  та навпаки. У задачі ця зміна відбувається в межах від  $1,025 \text{ т/м}^3$  до  $1,009 \text{ т/м}^3$ , тож маємо це врахувати. Відповідна скоригована поправка називається поправкою на «портову» воду – DWA (Dock Water Allowance) [5]. Цю поправку знаходять за поправкою FWA пропорцією:

$$DWA = FWA \frac{\rho_{\text{sw}} - \rho_{\text{dw}}}{\rho_{\text{sw}} - \rho_{\text{fw}}}, \quad (11)$$

де  $\rho_{\text{sw}}$  – густина морської води,  $\rho_{\text{sw}} = 1,025 \text{ т/м}^3$ ;

$\rho_{\text{fw}}$  – густина прісної води,  $\rho_{\text{fw}} = 1,000 \text{ т/м}^3$ ;

$\rho_{\text{dw}}$  – густина води, на яку робиться корекція FWA (густина «портової» води),  $\rho_{\text{dw}} = 1,009 \text{ т/м}^3$ .

Отже, згідно з формулою (11) маємо  $DWA = 78 \text{ мм}$ , тож нова осадка  $T_2 = 7,26 \text{ м}$ .

**Метод визначення зміни осадки за відомою залежністю осадки  $T$  судна від його водотоннажності  $D$  за певного значення густини.** Таку залежність можна знайти за вантажною шкалою судна, за таблицею гідростатичних елементів, за кривою вантажного розміру. На практиці часто трапляються випадки, коли залежність осадки судна від його водотоннажності  $T = T(D)$  відома для певного значення густини (наприклад, для морської води густиною  $\rho = 1,025 \text{ т/м}^3$ ), а треба знайти осадку у воді іншої густини. Наприклад, на

балкерах вантажна шкала може містити залежність осадки від водотоннажності лише для морської води [13], тож при роботі із такими шкалами виникає завдання визначення осадки або її зміни для фактичної густини води. Розглянемо конкретний приклад.

Судно має осадку  $T_1$  у прісній воді ( $\rho_1 = 1,000 \text{ т/м}^3$ ). Потрібно знайти осадку  $T_2$  в морській воді ( $\rho_2 = 1,025 \text{ т/м}^3$ ), якщо відома залежність  $T = T(D)$  за відповідної густини. Для визначення  $T_2$  необхідно спочатку знайти водотоннажність судна  $D$ . Скористаємось прийомом, що покладено в основу методу, що розглядається. Оскільки за умовою задачі відома залежність  $T = T(D)$  для морської води, подумки довантажимо судно до водотоннажності  $D^*$  так, щоб його осадка в морській воді залишилась такою самою як у прісній. З рівності об'ємів зануреної частини судна в прісній та морській воді отримуємо вираз:

$$\frac{D}{D^*} = \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (12)$$

З виразу (12) знаходимо вихідну водотоннажність судна:

$$D = D^* \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (13)$$

Отже, за відомою залежністю  $T = T(D)$  для морської води знаходимо значення водотоннажності  $D^*$  судна, що має в морській воді таку ж саму осадку  $T_1$ , що й у прісній. І за формулою (13) визначаємо вихідну водотоннажність  $D$  судна. За цим значенням водотоннажності визначаємо осадку судна  $T_2$  в морській воді, а потім і її зміну  $\Delta T$ .

Суть методу, що розглядається, можна наочно пояснити за допомогою графіків залежності  $T = T(D)$  (рис. 2). Якщо під час визначення  $\Delta T$  одна із залежностей є відомою (наприклад, залежність за густини  $\rho_2$ ), іншу (за густини  $\rho_1$ ) можна визначити за допомогою формули (13). У нашому прикладі була відома осадка  $T_1$  у прісній воді. Цій осадці відповідає т.  $A$  на графіку за густини  $\rho_1$  та т.  $B$  на графіку за густини  $\rho_2$ . Абсциси цих точок  $D$  та  $D^*$  відповідно пов'язані співвідношенням (13). Тож визначивши спочатку  $D^*$ , можна знайти й  $D$  (вихідну водотоннажність судна) і за нею вже знайти осадку  $T_2$  в морській воді (т.  $C$  на рис. 2).

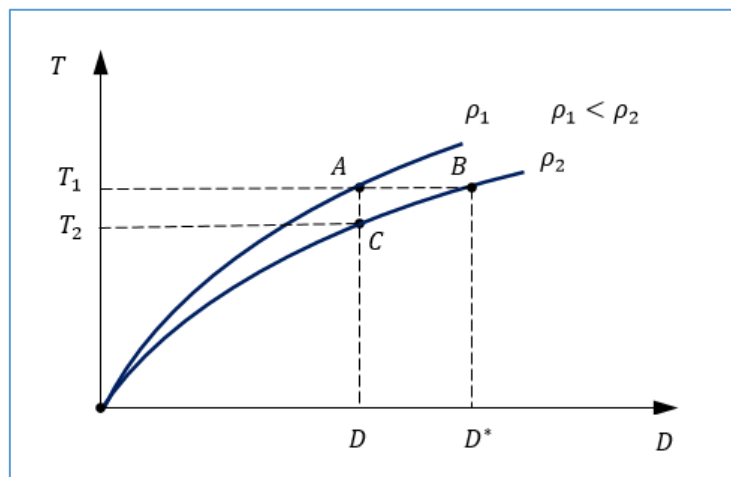


Рисунок 2 – Графіки залежності осадки судна від водотоннажності (вантажний розмір) за різної густини води ( $\rho_1 < \rho_2$ )

*Зауваження.* У навчально-методичній літературі зустрічається неправильне тлумачення формули (13), що начебто вона виражає той факт, що при переході судна з води густиною  $\rho_1$  у воду густиною  $\rho_2$ , його водотоннажність змінюється відповідно з  $D$  до  $D^*$ . Таке твердження є принципово не правильним. Водотоннажність судна дорівнює його масі, вона аж ніяк не може змінюватися зі зміною густини води. Змінюється об'єм зануреної частини судна (його осадка). Формула ж (13) описує випадок, коли судно має однакову осадку у воді різної густини, зрозуміло, що це може бути лише за різних значень водотоннажності.

До переваг описаного методу визначення  $\Delta T$  можна віднести його відносну точність, адже значення осадок відповідають фактичній водотоннажності судна. Проте для використання методу має бути відомий великий масив даних, зокрема, залежність  $T = T(D)$ , подана, наприклад, у табличній (вантажна шкала) або графічній (вантажний розмір) формі. Слід також зважати на те, що самі ці залежності можуть містити похибки [7].

**Метод визначення  $\Delta T$  за осадкою  $T$  судна та коефіцієнтами повноти.** Цими коефіцієнтами у теорії судна вважають безрозмірні числові показники, що характеризують форму підводної частини корпусу, дають інформацію про повноту його обводів [14, 15]. Розрізняють п'ять таких коефіцієнтів (три з яких є незалежними). Для цілей нашого дослідження розглянемо такі:

– коефіцієнт загальної повноти  $\delta$  – відношення об'єму  $V$  зануреної частини судна до об'єму паралелепіпеда, що має довжину  $L$  та ширину  $B$ , що відповідають сторонам прямокутника, в який вписано чинну ватерлінію, а також висоту  $T$ , що дорівнює осадці судна:

$$\delta = \frac{V}{LBT}; \quad (14)$$

– коефіцієнт повноти площі ватерлінії  $\alpha$  – відношення площі  $S$  чинної ватерлінії до площі прямокутника, в який вписано чинну ватерлінію:

$$\alpha = \frac{S}{LB}; \quad (15)$$

– коефіцієнт вертикальної повноти  $\chi$  – відношення об'єму  $V$  зануреної частини судна до об'єму вертикального циліндра з площею основи  $S$ , що дорівнює площі ватерлінії, та висотою  $T$ , що дорівнює осадці судна:

$$\chi = \frac{V}{ST} = \frac{\delta}{\alpha}. \quad (16)$$

Для отримання робочої формули цього методу, виразимо об'єм  $V_1$  та зміну об'єму  $\Delta V$  для формули (1) через параметри судна: коефіцієнт загальної повноти  $\delta$ , довжину  $L$ , ширину  $B$ , осадку  $T$  та площу чинної ватерлінії  $S$ :

$$V_1 = \delta LBT, \quad (17)$$

$$\Delta V = S\Delta T. \quad (18)$$

Припускаємо, що в межах зміни осадки  $\Delta T$  судна його довжина, ширина, площа ватерлінії та коефіцієнт загальної повноти практично не змінюються.

Підставивши формули (17) та (18) у вираз (1) та врахувавши формули (15) та (16), отримаємо робочі формули для визначення зміни осадки:

$$\Delta T = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \cdot T_1 \cdot \frac{\delta}{\alpha}, \quad (19)$$

або

$$\Delta T = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \cdot T_1 \cdot \chi. \quad (20)$$

Метод дозволяє знайти точні значення  $\Delta T$  за умови, що коефіцієнти повноти  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\chi$  відповідають фактичній його осадці  $T$ . Якщо ця умова не виконується (наприклад, коефіцієнти повноти взяті для випадку осадки судна з неповним завантаженням), метод дає наближений результат, хоча й прийнятний з практичного погляду (див. метод граничної оцінки).

*Приклад 3.* Судно переходить з Атлантичного океану в Середземне море. Як зміниться осадка судна? Водотоннажність судна  $D = 12000$  т, його розміри  $L \cdot B \cdot T = 120\text{м} \cdot 17\text{м} \cdot 7,2\text{м}$  за чинної ватерлінії площею  $S = 1750$  м<sup>2</sup>. Вважати густину води Атлантичного океану рівною  $\rho_1 = 1,025$  т/м<sup>3</sup>, а Середземного моря –  $\rho_2 = 1,029$  т/м<sup>3</sup>.

*Розв'язання.* Розміри судна в умові задачі відповідають чинній ватерлінії. Об'єм зануреної частини судна в Атлантичному океані:  $V = D/\rho_1 = 11707$  м<sup>3</sup>.

За формулами (14), (15), (16) визначаємо коефіцієнти повноти:

- коефіцієнт загальної повноти  $\delta = 0,8$ ;
- коефіцієнт повноти площі ватерлінії  $\alpha = 0,86$ ;
- коефіцієнт вертикальної повноти  $\chi = 0,93$ .

Зміну осадки судна знаходимо за формулою (19) або (20):  $\Delta T \approx -2,6$  см. Отже, осадка зменшиться на 2,6 см.

**Метод граничної оцінки зміни осадки судна (припущення прямоствінності судна).** Якщо судно прямоствінне (судно із коробчастими обводами), об'єм  $V_1$  у рівнянні (1) можна представити добутком осадки  $T_1$  та площі ватерлінії  $S$ , яка тепер не залежить від осадки. Врахувавши це, а також формулу зміни об'єму  $\Delta V = S\Delta T$ , отримуємо з (1) робочі формули методу граничної оцінки:

$$\Delta T = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_2} \cdot T_1, \quad (21)$$

або

$$T_2 = T_1 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_2}. \quad (22)$$

Цей метод дозволяє знайти точні значення зміни осадки для випадку прямоствінних суден. Проте значення методу граничної оцінки цим не обмежується. Простота методу робить його цінним у випадках:

- оцінювання *верхньої межі* зміни осадки судна  $\Delta T$ , викликаній зміною густини води, адже не поодинокі випадки, коли потрібно встановити, чи не перевищить осадка судна критичну межу (це й пояснює назву методу, що розглядається). Ця оцінка буде справедливою для суден, у яких площа чинної ватерлінії зростає із збільшенням осадки (тобто для переважної більшості суден);

- наближеного визначення  $\Delta T$  у випадку, коли густина води при переході судна змінюється не значно.

*Приклад 4.* Судно переходить з Атлантичного океану в Середземне море. Оцінити зміну осадки судна. Осадка судна в Атлантичному океані дорівнювала  $T_1 = 7,2$  м. Вважати густину води Атлантичного океану рівною  $\rho_1 = 1,025$  т/м<sup>3</sup>, а Середземного моря –  $\rho_2 = 1,029$  т/м<sup>3</sup>.

*Розв'язання.* Метод граничної оцінки (формула (21)) дозволяє досить просто знайти наближене значення  $|\Delta T| = 2,8$  см, не потребуючи для цього додаткової інформації про судно. Відхилення від «точного» значення  $|\Delta T| = 2,6$  см, знайденого у прикладі 3, складає 2 мм (8%). Цей приклад є показовим – іноді точність може бути надмірною, невиправданою з практичного погляду. Тож у подібних випадках корисно спочатку оцінити «зверху» можливе значення  $\Delta T$  за допомогою методу граничної оцінки. Перевагою цього методу є його простота, оскільки не потребує додаткової довідкової інформації про судно.

Порівняння формул (20) та (21) для точного та наближеного визначення  $\Delta T$  дозволяє з'ясувати критерій точності застосування методу граничної оцінки. Для цього розглянемо вирази для абсолютної  $\Delta$  та відносної  $\varepsilon$  похибок (розбіжностей) наближеного обчислення зміни осадки методом граничної оцінки:

$$\Delta = \Delta T_{\text{набл}} - \Delta T_{\text{точн}} = \Delta T_{\text{набл}}(1 - \chi); \quad (23)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{\Delta T_{\text{точн}}} = \frac{1}{\chi} - 1. \quad (24)$$

Формула (24) дозволяє знайти критичне значення коефіцієнта вертикальної повноти  $\chi_{\text{крит}}$ , вище якого відносна похибка визначення  $\Delta T$  не перевищуватиме наперед заданого значення  $\varepsilon_0$ :

$$\chi_{\text{кр}} = \frac{1}{\varepsilon_0 + 1}. \quad (25)$$

Наприклад, з похибкою не більше 10% будуть результати визначення  $\Delta T$  за методом граничної оцінки для суден з коефіцієнтами вертикальної повноти не менше  $\chi_0 = 0,91$ .

Як ілюстрацію можливого використання методу граничної оцінки для визначення зміни осадки судна для випадків із різними значеннями зміни густини води наведено розрахунки для судна «SUNRAY» (табл.). У випадку невеликої різниці між значеннями густини води (у таблиці цій умові відповідають  $\Delta\rho = 0,005 \text{ т/м}^3$  та  $\Delta\rho = 0,010 \text{ т/м}^3$ ) метод граничної оцінки виявляє точність до 1 см для всього діапазону можливих значень осадки судна (від 4,5 м до 12,8 м). За порівняно великої різниці густини ( $\Delta\rho = 0,029 \text{ т/м}^3$ ) абсолютна розбіжність у значеннях  $\Delta T$ , отриманих точним та наближеним методами, вже перевищує 1 см, хоча й для цього випадку існує деякий інтервал осадок (приблизно до 6 м) з малою розбіжністю результатів.

Таблиця 1 – Порівняння результатів визначення зміни осадки судна двома методами: точним (за параметром ТРС) та наближеним (метод граничної оцінки) для деяких значень зміни густини води

Вихідні дані			Зміна осадки за зміни густини води											
$\rho_1=1,029 \text{ т/м}^3$			$\rho_2=1,024 \text{ т/м}^3$				$\rho_2=1,019 \text{ т/м}^3$				$\rho_2=1,000 \text{ т/м}^3$			
Осадка $T$ , м	Водотоннажність $D$ , т	Коеф. верг. повн. $\chi$	За ТРС $\Delta T_{\text{точн.}}$ , см	За гран. метод. $\Delta T_{\text{набл.}}$ , см	Розбіжн.		За ТРС $\Delta T_{\text{точн.}}$ , см	За гран. метод. $\Delta T_{\text{набл.}}$ , см	Розбіжн.		За ТРС $\Delta T_{\text{точн.}}$ , см	За гран. метод. $\Delta T_{\text{набл.}}$ , см	Розбіжн.	
					абсол. $\Delta$ , см	відн. $\varepsilon$ , %			абсол. $\Delta$ , см	відн. $\varepsilon$ , %			абсол. $\Delta$ , см	відн. $\varepsilon$ , %
4,50	21460,0	0,924	2,0	2,2	0,2	8	4,1	4,4	0,3	8	12,1	13,1	1,0	8
5,00	24051,1	0,923	2,3	2,4	0,2	8	4,5	4,9	0,4	8	13,4	14,5	1,1	8
5,50	26671,7	0,920	2,5	2,7	0,2	9	5,0	5,4	0,4	9	14,7	16,0	1,3	9
6,00	29318,7	0,919	2,7	2,9	0,2	9	5,4	5,9	0,5	9	16,0	17,4	1,4	9
6,50	31988,3	0,917	2,9	3,2	0,3	9	5,9	6,4	0,5	9	17,3	18,8	1,6	9
7,00	34682,6	0,915	3,1	3,4	0,3	9	6,3	6,9	0,6	9	18,6	20,3	1,7	9
7,50	37401,2	0,913	3,3	3,7	0,3	9	6,7	7,4	0,6	9	19,9	21,7	1,9	9
8,00	40142,9	0,911	3,6	3,9	0,3	10	7,2	7,9	0,7	10	21,1	23,2	2,1	10
8,50	42914,9	0,910	3,8	4,2	0,4	10	7,6	8,3	0,8	10	22,4	24,6	2,2	10
9,00	45711,3	0,907	4,0	4,4	0,4	10	8,0	8,8	0,8	10	23,7	26,1	2,4	10
9,50	48533,5	0,903	4,2	4,6	0,4	11	8,4	9,3	0,9	11	24,9	27,5	2,7	11
10,00	51382,9	0,900	4,4	4,9	0,5	11	8,8	9,8	1,0	11	26,1	29,0	2,9	11
10,50	54259,0	0,897	4,6	5,1	0,5	11	9,2	10,3	1,1	11	27,3	30,4	3,1	11
11,00	57154,1	0,897	4,8	5,4	0,6	12	9,7	10,8	1,1	12	28,6	31,9	3,3	12
11,50	60063,1	0,897	5,0	5,6	0,6	11	10,1	11,3	1,2	11	29,9	33,3	3,4	11
12,00	62984,3	0,898	5,3	5,9	0,6	11	10,6	11,8	1,2	11	31,2	34,8	3,6	11
12,50	65916,6	0,899	5,5	6,1	0,6	11	11,0	12,3	1,2	11	32,6	36,2	3,7	11
12,80	67681,1	0,899	5,6	6,2	0,6	11	11,3	12,6	1,3	11	33,4	37,1	3,7	11

На практиці точність визначення  $\Delta T$  обмежується багатьма факторами: похибка вимірювання осадки судна (допустимою межею відповідної похибки часто вважають 1 см [7]); похибка під час використання вантажної шкали (допустиму межу похибки вважають 1 см [1]); похибки вимірювання фактичної густини води (інструментальні та випадкові); похибки внаслідок припущень, зроблених під час отримання робочої формули методу

(наприклад, у методі визначення  $\Delta T$  за параметром ТРС площа ватерлінії приймається незмінною для всього діапазону зміни осадки внаслідок зміни густини води) та інші. Тож у деяких випадках розбіжність у результатах визначення  $\Delta T$  за «точними» методами та методом граничної оцінки може бути прийнятною для практичних цілей.

Інколи практичний інтерес має також зворотна задача: знайти для певного діапазону осадок судна критичні значення коефіцієнта вертикальної повноти  $\chi_{\text{крит}}$ , за яких похибка методу граничної оцінки дорівнює наперед заданому значенню  $\Delta$  (за конкретної різниці густини води). Якщо значення  $\chi_{\text{крит}}$  відомі, то порівняння їх із фактичними значеннями коефіцієнта вертикальної повноти  $\chi_{\text{факт}}$  для судна дає змогу робити висновок про можливість використання методу граничної оцінки із заданою точністю. Самі ж значення  $\chi_{\text{крит}}$  можна знайти з виразу (23), врахувавши також формулу (21):

$$\chi_{\text{крит}} = 1 - \frac{\rho_2 \cdot \Delta}{(\rho_1 - \rho_2) \cdot T_1} \quad (26)$$

Проілюструємо цю можливість на прикладі вже згаданого судна «SUNRAY». Для цього судна були розраховані фактичні значення коефіцієнта вертикальної повноти  $\chi_{\text{факт}}$  для деяких значень осадки (див. табл.). Для тих самих значень осадки за формулою (26) знайдені критичні значення  $\chi_{\text{крит}}$  цього ж коефіцієнта для наперед заданої точності  $\Delta$  на рівні 1 см. Отримані залежності  $\chi_{\text{факт}} = \chi_{\text{факт}}(T)$  та  $\chi_{\text{крит}} = \chi_{\text{крит}}(T)$  (для трьох випадків різниці густини води ( $\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ )) подані графічно на рис. 3.

З графіків, наведених на рис. 3, видно, що для зазначеного судна у випадку значної різниці густини води ( $\Delta\rho = 0,029 \text{ т/м}^3$ ) фактичні значення  $\chi_{\text{факт}}$  лежать нижче критичних  $\chi_{\text{крит}}$  практично для всіх значень осадки. За такої різниці  $\Delta\rho$  метод граничної оцінки буде давати наближені значення  $\Delta T$  із розбіжністю з точним методом більшою за 1 см. За різниці густини води  $\Delta\rho = 0,010 \text{ т/м}^3$  розбіжність у точних та наближених значеннях  $\Delta T$  перевищує задане значення 1 см лише для осадок, більших за 10 м. У випадку ж малої різниці густини води ( $\Delta\rho = 0,005 \text{ т/м}^3$ ) можна використовувати метод граничної оцінки з похибкою, що не перевищує 1 см на всьому діапазоні можливих значень осадки (для всього діапазону значень осадки графік  $\chi_{\text{крит}} = \chi_{\text{крит}}(T)$  лежить під графіком  $\chi_{\text{факт}} = \chi_{\text{факт}}(T)$ ).

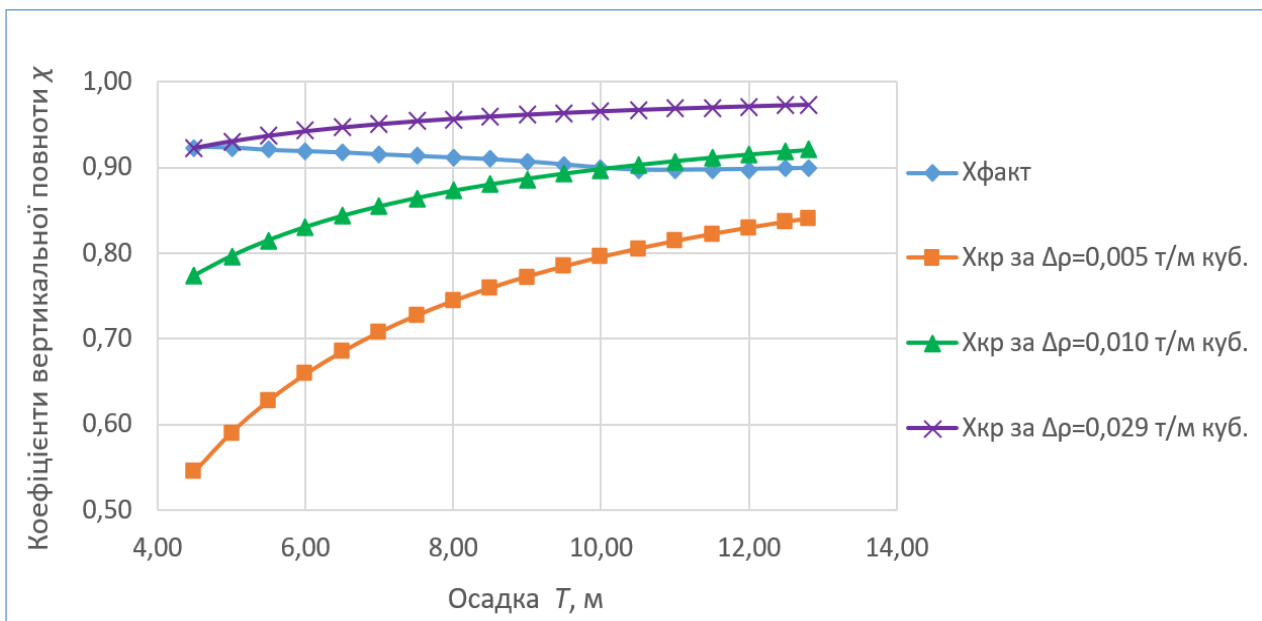


Рисунок 3 – Порівняння критичних значень коефіцієнта вертикальної повноти  $\chi_{\text{кр}}$  із фактичними  $\chi_{\text{факт}}$  за деяких значень різниці густини води  $\Delta\rho$  при переході судна

**Основні результати та їх обговорення.** У статті проаналізовано методи визначення зміни осадки судна, обумовленої зміною густини води, виділено межі застосування цих методів, що визначаються припущеннями, зробленими під час отримання робочої формули. Аналізом охоплено методи:

– за водотоннажністю судна  $D$  та параметром ТРС. Метод є найбільш загальним за сферою використання, оскільки дозволяє визначати зміну осадки, обумовленої зміною густини води, за довільної (але відомої) водотоннажності судна. Для його використання потрібно знати параметр ТРС (за певного значення густини води), що відповідає цій водотоннажності;

– за відомою поправкою FWA. Визначення зміни осадки судна за цим методом буде коректним, якщо, по-перше, судно завантажене повністю (повністю використана його вантажопідйомність), та, по-друге, судно переходить із морської води ( $\rho_1 = 1,025 \text{ т/м}^3$ ) у прісну ( $\rho_2 = 1,000 \text{ т/м}^3$ ) або навпаки. В іншому випадку (наприклад, за неповного завантаження) метод буде давати похибку;

– за відомою залежністю осадки  $T$  судна від його водотоннажності  $D$  за певного значення густини. Перевагою методу є його відносна точність, адже значення осадок відповідають фактичній водотоннажності судна, однак для використання методу має бути відомий великий масив даних, зокрема, залежність  $T = T(D)$ , що подана, наприклад, у табличній (вантажна шкала) або графічній (вантажний розмір) формі;

– за осадкою  $T$  судна та коефіцієнтами повноти корпусу судна. Метод дозволяє знайти точні значення зміни осадки за умови, що коефіцієнти повноти  $\delta$ ,  $\alpha$ ,  $\chi$  відповідають фактичній його осадці. Якщо ця умова не виконується (наприклад, коефіцієнти повноти взяті для випадку осадки судна з повним вантажем), метод дає наближений результат;

– за граничною оцінкою зміни осадки судна (припущення прямостінності судна). Метод дозволяє знайти точні значення зміни осадки для випадку прямостінних суден. Проте теоретичний аналіз цього методу виявив можливість розширення його практичного значення: для оцінювання верхньої межі зміни осадки судна  $\Delta T$ , викликані зміною густини води (оцінка буде справедливою для суден, у яких площа чинної ватерлінії зростає зі збільшенням осадки, тобто для переважної більшості суден); для наближеного визначення  $\Delta T$  у випадку, коли густина води при переході судна змінюється не значно. Запропоновано критерій, що дозволяє встановити точність цього методу. Зокрема, на прикладі конкретного судна показано, що в методі граничної оцінки можна знайти для певного діапазону осадок критичні значення коефіцієнта вертикальної повноти  $\chi_{\text{крит}}$ , за яких похибка цього методу дорівнює наперед заданому значенню  $\Delta$  (за конкретної різниці густини води).

**Висновки.** Порівняльний аналіз деяких методів визначення зміни осадки судна, що обумовлена зміною густини води, дозволив виявити межі їх практичного застосування, що визначаються припущеннями, зробленими під час отримання робочої формули. Показано можливість розширення практичної значущості методу граничної оцінки для визначення зміни осадки не лише прямостінних суден. Метод є також корисним у випадках: оцінювання верхньої межі зміни осадки судна, викликані зміною густини води; визначення зміни осадки у випадку, коли густина води при переході судна змінюється не значно.

Запропоновано критерій, що дозволяє встановити точність методу граничної оцінки зміни осадки судна. Зокрема, показано, що можна знайти для певного діапазону осадок критичні значення коефіцієнта вертикальної повноти  $\chi_{\text{крит}}$ , за яких похибка методу граничної оцінки дорівнюватиме наперед заданому значенню  $\Delta$  (за конкретної різниці густини води).

У зв'язку з тим, що на практиці точність визначення зміни осадки обмежується багатьма факторами (зокрема, інструментальні та випадкові похибки вимірювання осадки судна, фактичної густини води; похибки внаслідок припущень, зроблених під час отримання

робочої формули методу та інші), мають місце випадки, коли розбіжність у результатах визначення  $\Delta T$  за «точними» методами та методом граничної оцінки може бути прийнятною для практичних цілей.

**Перспективи подальших досліджень.** Важливі напрями подальших досліджень пов'язані з підвищенням точності вимірювання осадки судна та густини води, адже похибки цих вимірювань значно обмежують точність визначення водотоннажності судна.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Шибасєв О. Г., Вишневська О. Д., Вишневський Д. О. Техніка і технології морського транспорту: навч. посібн. Одеса: ОНМУ, 2022. 128 с. URL: <https://surl.li/ieuwsp>.
2. Міжнародна конвенція про вантажну марку (1966 р.). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896\\_007#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_007#Text).
3. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control / Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. Hoboken, NJ: Wiley, 2021, P. 731.
4. Івченко В. В. Фізика для моряків у прикладах і задачах. Механіка: навч. посібн.: у 2 ч. Ч. 1. Херсон: ХДМА, 2021. 64 с.
5. Pursey H. J. Merchant Ship Stability (Metric Edition). A Companion to "Merchant Ship Construction". Glasgow Brown: Son & Ferguson, LTD, Nautical publishers. 1996. P. 212.
6. Clark I. C., BSc, MSc. The Management of Merchant Ship Stability, Trim & Strength. London: The Nautical Institute, 2011. P. 292.
7. Draught survey. Carefully to Carry Consolidated Edition 2023. Chapter 16. URL: <https://surl.li/uuyuqf>.
8. Ivče R., Jurdana I., Mohović R. Determining weight of cargo onboard ship by means of optical fibre technology draft reading. *Promet-Traffic and Transportation*. 2011. Vol. 23 (6). pp. 421–429. <https://doi.org/10.7307/ptt.v23i6.177>.
9. Wei Y., Du H., Hu Q., Wang H. Optimizing Ship Draft Observation with Wave Energy Attenuation and PaddlePaddle-OCR in an Anti-Fluctuation Device. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. 12(10). 1865. <https://doi.org/10.3390/jmse12101865>.
10. Wei Y. Research Review of Ship Draft Observation Methods. *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2023. 8(2). pp. 33–42. <https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20230802.11>.
11. Wang Z. A Ship Draft Line Detection Method Based on Image Processing and Deep Learning. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Ser. 1575 012230. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1575/1/012230>.
12. Tsujii T., Yoshida H., Liguni Y. Automatic draft reading based on image processing. *Optical Engineering*. 2016. 55(10). 104104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.10.104104>.
13. Давидов І. П., Кучер Ю. П., Сіряченко В. Ф., Бурмака О. І. Теорія і будова судна: конспект лекцій. Одеса: НУ «ОМА», 2019. 96 с.
14. Праднюх В. І., Капліна А. А. Морехідні якості суден: навч. посібн. Херсон: ХДМА, 2021. 108 с.
15. Колеченцева Т. Фізичні задачі практичного спрямування як засіб підвищення ефективності навчання здобувачів вищої освіти морської галузі. *Актуальні питання гуманітарних наук: міжвузівський збірник наукових праць молодих вчених Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка* / [редактори-упорядники М. Пантюк, А. Душний, І. Зимомря]. Дрогобич: Видавничий дім «Гельветика», 2020. Вип. 31. Том 3. С. 231–237.

## REFERENCES

1. Shybaiev, O. H., Vyshnevskaya, O. D., Vyshnevskiy, D. O. (2022). Tekhnika i tekhnologii morskoho transportu: navch. posibn. Odesa: ONMU. URL: <https://surl.li/ieuwcp>.
2. Mizhnarodna konventsia pro vantazhnu marku. (1966). URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896\\_007#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_007#Text).
3. Fossen, T. I. (2021). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. Hoboken, NJ: Wiley.
4. Ivchenko, V. V. (2021). Fizyka dla moriakiv u prykladakh i zadachakh. Mekhanika: navch. posibn.: u 2 ch. Ch. 1. Kherson: KhDMA.
5. Pursey, H. J. (1996). Merchant Ship Stability (Metric Edition). A Companion to "Merchant Ship Construction". Glasgow Brown: Son & Ferguson, LTD, Nautical publishers.
6. Clark, I. C., BSc, MSc. (2011). The Management of Merchant Ship Stability, Trim & Strength. London: The Nautical Institute.
7. Draught survey. Carefully to Carry Consolidated Edition 2023. Chapter 16. URL: <https://is.gd/5vbOuv>.
8. Ivčec, R., Jurdana, I., Mohović, R. (2011). Determining weight of cargo onboard ship by means of optical fibre technology draft reading. *Promet-Traffic and Transportation*. Vol. 23 (6). 421–429. <https://doi.org/10.7307/ptt.v23i6.177>.
9. Wei, Y., Du, H., Hu, Q., Wang, H. (2024). Optimizing Ship Draft Observation with Wave Energy Attenuation and PaddlePaddle-OCR in an Anti-Fluctuation Device. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12(10). 1865. <https://doi.org/10.3390/jmse12101865>.
10. Wei, Y. (2023). Research Review of Ship Draft Observation Methods. *American Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 8(2). 33-42. <https://doi.org/10.11648/j.ajtte.20230802.11>.
11. Wang, Z. (2020). A Ship Draft Line Detection Method Based on Image Processing and Deep Learning. *Journal of Physics: Conference Series*. Ser. 1575 012230. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1575/1/012230>.
12. Tsujii, T., Yoshida, H., Liguni, Y. (2016). Automatic draft reading based on image processing. *Optical Engineering*. 55(10). 104104. <https://doi.org/10.1117/1.OE.55.10.104104>.
13. Davydov, I. P., Kucher, Yu. P., Siriachenko, V. F., Burmaka, O. I. (2019). Teoriia i budova sudna: konspekt lektsii. Odesa: NU «OMA».
14. Pradiukh, V. I., Kaplina, A. A. (2021). Morekhidni yakosti suden: navch. posibn. Kherson: KhDMA.
15. Kolechentseva, T. (2020). Fizychni zadachi praktychnoho spriamuvannia yak zasib pidvyshchennia efektyvnosti navchannia здобувачив vyshchoi osvity morskoi haluzi. Aktualni pytannia humanitarnykh nauk: mizhvuzivskiy zbirnyk naukovykh prats molodykh vchenykh Drohobyt'skoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Ivana Franka / [redaktery-uporiadnyky M. Pantiuk, A. Dushnyi, I. Zymomria]. Drohobych: Vydavnychiy dim «Helvetyka». Vyp. 31. Tom 3. 231–237.

**Andreev A. M., Stovba T. A. LIMITS OF THE APPLICATION OF METHODS FOR DETERMINING THE CHANGE IN THE DRAFT OF A SEA VESSEL DUE TO A CHANGE IN THE DENSITY OF WATER**

*Abstract* The article considers the problem of determining the change in the draft of a seagoing vessel due to a change in water density. Its practical significance is closely related to solving the problems of safe navigation. One such problem is the calculation of a vessel's draft at the stage of developing its cargo plan. Another is determining the cargo mass based on measuring the vessel's draft before and after cargo operations. A comparative analysis of several methods for determining the change in a ship's draft due to a change in water density has revealed the limits of their practical application. These limits are defined by the assumptions made when deriving the working formula. Failure to consider these limits can lead to gross errors in draft calculations and, in practice, to incorrect vessel loading. The methods under consideration are illustrated with specific examples.

The article also demonstrates the potential for expanding the practical significance of the marginal estimation method for determining draft changes not only in straight-walled vessels. The method is also useful in cases such as: estimating the upper limit of draft change caused by a change in water density; determining draft changes in cases where water density does not vary significantly during the ship's passage.

A criterion is proposed that allows for evaluating the accuracy of the marginal estimation method for determining draft changes. In particular, it is shown that it is possible to identify critical values of the vertical fineness coefficient for a certain draft range at which the error of the marginal estimation method equals a specified value (for a given difference in water density). This criterion allows us to assess the conditions under which the discrepancy between the results of "exact" methods and the marginal estimation method may be acceptable for practical purposes.

Important areas of further research are related to improving the accuracy of measuring the ship's draft and the water density, as the errors in these measurements significantly limit the accuracy of determining the vessel's displacement.

**Key words:** buoyancy; load-lines; ship's draft; water density; the effect of water density on the draft of a ship; fineness coefficients; method of marginal estimation of the vessel's draft change.

© Андреев А. М., Стомба Т. А.

Статтю прийнято до редакції 12.05.2025

## ІНТЕГРАЦІЯ РИЗИК-АНАЛІЗУ В ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН ПРИ ЗМІНІ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ

**Булгаков М. П.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: [prbulgakov2@gmail.com](mailto:prbulgakov2@gmail.com), ORCID: 0000-0002-7172-8678;

**Мельник О. М.**, д.т.н., професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: [m.opm@ukr.net](mailto:m.opm@ukr.net), ORCID: 0000-0001-9228-8459;

**Алексішин А. В.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри електронних комплексів судноводіння, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: [aav1978opm@gmail.com](mailto:aav1978opm@gmail.com), ORCID: 0009-0003-7666-5674;

**Мазур О. М.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри устрою судна, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: [mazuronm@gmail.com](mailto:mazuronm@gmail.com), ORCID: 0000-0002-9316-288X;

**Онищенко О. А.**, д.т.н., професор, професор кафедри управління судном, Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: [oleganaton@gmail.com](mailto:oleganaton@gmail.com), ORCID: 0000-0002-3766-3188.

У статті представлено комплексну математичну модель оцінювання ризиків в умовах зниження швидкості руху морських суден, режиму *slow steaming*, з інтеграцією показників енергоефективності, викидів парникових газів та експлуатаційних витрат. Проведено моделювання для різних типів суден у декількох швидкісних сценаріях, що дозволило визначити зв'язок між економією пального та накопиченням відповідних ризиків, пов'язаних із людським фактором, технічними несправностями та несприятливими погодними умовами. Запропоновано інтегральний показник оцінювання ефективності, що враховує одночасно екологічну вигоду та потенційні витрати на ліквідацію наслідків аварій. Результати симуляцій виявили наявність такого діапазону швидкостей для кожного типу судна, при якому досягається найкращий компроміс між енергоекологічною ефективністю та експлуатаційною безпекою. Динамічне моделювання ризику показало, також, що тривалі рейси без адаптації систем контролю та профілактики призводять до стрімкого зростання витрат на ліквідацію наслідків. Отримані результати мають практичну цінність при плануванні роботи флоту судноплавних компаній із метою розроблення адаптивних до швидкісних режимів руху стратегій управління, які поєднують екологічні цілі із забезпеченням безпеки та фінансової сталості морських перевезень.

**Ключові слова:** морський транспорт; рух суден; швидкісний режим; повільний хід; судноплавство; ризик-аналіз; енергоефективність; викиди CO<sub>2</sub>; технічні несправності; людський фактор; погодні ризики; оптимізація швидкості; інтегральна ефективність; сталий розвиток; сценарне моделювання; оптимізація витрат; профілактика аварій; екологічна безпека; управління ризиками.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.059-068**

**Вступ.** У сучасних умовах глобального потепління та посилення регулювання викидів парникових газів у морській галузі, особливу увагу привертають стратегії, спрямовані на зниження екологічного навантаження від судноплавства. Однією з таких стратегій є такий повільний рух або таке зниження швидкості суден, які забезпечують значне скорочення споживання палива та, що безумовно, одночасно викидів CO<sub>2</sub> на одиницю вантажообігу. Водночас довші за тривалістю рейси, суттєво змінюють умови експлуатації, що потенційно впливає на рівень аварійності та пов'язані з цим ризики. Збільшення тривалості морських переходів призводить до кумулятивного впливу погодних факторів, людського фактора та зносу обладнання, що, у сукупності, може знизити ефективність режиму такого повільного ходу, як загальної стратегії. Таким чином, існує потреба у комплексному аналізі взаємозв'язку між енергоефективністю та рівнем ризику при уповільненні руху суден або їх роботи в режимі зменшених швидкостей, що пов'язано із практичними завданнями

«Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року» та затвердженим операційним планом заходів з її реалізації у 2025–2027 роках.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми та виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Сучасні дослідження з оптимізації за різними критеріями швидкості суден охоплюють дуже широкий спектр використаних методів і підходів. Так, у роботах [1, 6] запропоновані методи багатокритеріальної оптимізації швидкості судна, які враховують критерії енергоефективності та додаткові експлуатаційні фактори. Стратегії, які поєднують керувану зміну швидкості та низки диференціальних параметрів, ретельно розглянуто у [2], зокрема, з урахуванням завантаження судна. У роботах [3, 10] особлива увага зроблена на дотримання екологічних стандартів, наприклад, таких, як показник вуглецевої інтенсивності (СІ), із чітким фокусом на зменшенні CO<sub>2</sub>-викидів та покращенні загальної енергоефективності. У статті [4] обговорюється застосування «вдосконаленого алгоритму A\*» для спільної оптимізації швидкості та курсу гібридного судна. У роботі [5] пропонується оптимізація маршруту, швидкості та заправки для суден, що працюють на зрідженому природному газі, з урахуванням альтернативних портів бункерування. У роботі [7] аналізуються задачі оптимізації швидкості за змінних метеорологічних умов, а [8, 9] розширюється підхід, що включає впровадження екологічних технологій, управління інтервалами та коливання цін на паливо. Нарешті, [11, 12] розглядають конфігурацію двигуна, залежність від його вихідних даних і маршрутизацію для круїзних і лінійних суден, що відкриває перспективи для побудови моделей з низьким обсягом інших вихідних даних і гібридних моделей. Таким чином, наукові джерела підтверджують доцільність комплексної оптимізації швидкості, яка враховує не лише паливну ефективність, але й можливі ризики, зовнішні умови та експлуатаційні обмеження.

**Постановка проблеми.** Попри численні дослідження з економічного обґрунтування і визначення повільного ходу суден, недостатньо уваги приділено його впливу на загальний ризик аварійності та пов'язані з ним витрати. Більшість моделей оцінки ефективності зосереджені виключно на економії палива і скороченні викидів, ігноруючи потенційне збільшення ризику аварій, людських жертв, технічних відмов або погіршення умов безпеки. Відсутність комплексних моделей, що враховують динамічну зміну ризику в умовах зміни швидкості руху, створює розрив між теоретичними підходами та реаліями експлуатації флоту.

**Мета і задачі дослідження.** Метою дослідження є розробка комплексної моделі оцінювання ризику з урахуванням людських, технічних і погодних чинників, її інтеграція в енергетичні та економічні розрахунки для п'яти типів суден, проведення сценарного моделювання для різних режимів швидкості руху (10–20 вузлів), визначення оптимальних швидкостей із позиції балансу між енергоефективністю, рівнем ризику та витратами на реагування, а також формулювання практичних рекомендацій щодо безпечного впровадження режиму повільного ходу.

**Виклад основного матеріалу.** Для аналізу впливу повільного ходу на загальний рівень ризику експлуатації суден розроблено багатофакторну модель, що враховує ймовірності настання аварійних подій на основі трьох ключових тригерів: людський фактор, технічні несправності та погодні умови. Кожен із факторів має свій механізм розвитку у часі, а їхній сукупний ефект визначає загальний профіль ризику рейсу. Всі ймовірності моделюються у динаміці, з урахуванням дій системи контролю та пом'якшення наслідків. Базове рівняння сукупного ризику має вигляд:

$$R = P(T) \times P(A|T) \times P(C|A) - M, \quad (1)$$

де  $P(T)$  – ймовірність виникнення тригера (ініціюючої події),  $P(A|T)$  – умовна ймовірність аварії при наявності тригера,  $P(C|A)$  – ймовірність настання негативних наслідків,  $M$  – ефективність пом'якшувальних заходів (страхування, аварійне реагування тощо).

Ймовірність тригера розглядається як комбінація трьох незалежних підсистем:

$$P(T) = 1 - \prod_i (1 - P(T_i)), \quad (2)$$

де  $P(T_i)$  – ймовірність окремого тригера, яка містить підсистеми:  $P(T_h)$  – людський фактор;  $P(T_t)$  – технічна відмова;  $P(T_e)$  – вплив зовнішніх (погодних) умов.

Кожен тригер оцінюється окремо. Для людського фактора враховується втома екіпажу та рівень підготовленості (ефективність навчання):

$$P(T_h) = P(F) \times (1 - E_T), \quad (3)$$

де  $P(F)$  – ймовірність втоми,  $E_T$  – ефективність навчальних заходів.

Технічна надійність судових систем описується експоненційною функцією з урахуванням віку обладнання:

$$P(T_t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – інтенсивність відмов,  $t$  – тривалість рейсу.

Погодні ризики моделюються з урахуванням ймовірності настання несприятливих умов та ефективності роботи моніторингових систем:

$$P(T_e) = P(W) \times (1 - E_W), \quad (5)$$

де  $P(W)$  – ймовірність несприятливої погоди,  $E_W$  – ефективність прогнозування та запобігання.

Урахування заходів контролю знижує ймовірність тригера:

$$P(T') = P(T) \times (1 - E_C), \quad (6)$$

де  $E_C$  – ефективність контрольних заходів (регламенти, автоматизація, трекінг ризиків).

Ймовірність аварії після тригера моделюється експоненційним зростанням ризику:

$$P(A|T) = 1 - e^{-\mu t}, \quad (7)$$

де  $\mu$  – інтенсивність розвитку небезпечної ситуації у часі.

Наступним етапом є оцінка наслідків аварії, яка ґрунтується на зваженій сумі компонент:

$$C = \alpha L + \beta E + \gamma F + \delta R, \quad (8)$$

де  $L$  – людські втрати,  $E$  – екологічні,  $F$  – фінансові,  $R$  – репутаційні втрати;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  – відповідні вагові коефіцієнти.

З урахуванням пом'якшувальних заходів наслідки знижуються:

$$C' = C \times (1 - E_M), \quad (9)$$

де  $E_M$  – ефективність систем реагування (пожежогасіння, евакуація, страхування).

Ймовірність тяжких наслідків при аварії має форму:

$$P(C|A) = 1 - e^{-\sigma C}, \quad (10)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт тяжкості наслідків.

Підсумкова модель з урахуванням всіх модифікацій набуває вигляду:

$$R' = P(T') \times P(A|T') \times P(C'|A) - M. \quad (11)$$

Для оцінювання балансу між енергетичними та екологічними вигодами повільного ходу та зростанням ризиків сформовано інтегральний показник ефективності [13]. Цей показник дозволяє кількісно порівнювати сценарії з різною швидкістю ходу за критерієм комплексної доцільності:

$$E_{\text{net}} = \frac{\Delta E_{\text{fuel}} + \Delta CO_2}{R' + C_{\text{res}}}, \quad (12)$$

де  $\Delta E_{fuel}$  – економія енергії (в одиницях витрат пального або еквіваленту енергії);  $\Delta CO_2$  – зменшення викидів  $CO_2$  у порівнянні з базовим режимом;  $R'$  – сукупний ризик, отриманий із динамічної моделі;  $C_{res}$  – очікувані витрати на ліквідацію наслідків аварій або інцидентів.

Чим вищим є значення  $E_{net}$ , тим більш доцільним є сценарій, із погляду визначеної комплексної ефективності, його застосування. Таким чином, даний показник дозволяє об'єднати у єдиний розрахунок і екологічну вигоду, і ризики, що виникають при зміні швидкості.

Таким чином, запропонований алгоритм і модель на його основі, враховують інтегративний вплив швидкості судна на рівень ризику, відображаючи взаємозв'язок між зменшенням технічного навантаження при повільному ході, подовженням періоду впливу погодних чинників та поступовим накопиченням втоми екіпажу. Проведений таким чином аналіз дає змогу визначати оптимальні швидкісні режими, які забезпечують не лише паливну ефективність, а й високий рівень експлуатаційної безпеки та економічно обґрунтовані витрати на ліквідацію можливих аварійних ситуацій.

**Візуалізація логіки моделі ризик-аналізу.** Побудована модель інтегрує послідовність переходу від первинних факторів ризику до остаточних наслідків аварій. На рис. 1 представлено структурну схему причинно-наслідкових взаємозв'язків між основними елементами ризику в умовах експлуатації суден.

Діаграма охоплює ключові тригери ризику (людський, технічний та екологічний фактори), модифікатори їх дії (навчальні програми, нормативне регулювання, моніторинг), а також засоби пом'якшення та реагування.

Як видно із наведеної схеми, вихідні фактори ризику (втома, знос техніки, погодні умови) можуть активізувати аварійну ситуацію через різні тригери. Втома та інші зміни когнітивних чинників сприяють виникненню людських помилок, які частково усуваються завдяки ефективним навчальним програмам, підвищенню кваліфікації, організації праці та контролю. Технічні збої, спричинені старінням систем або недостатнім або неякісним технічним обслуговуванням, можуть бути мінімізовані шляхом дотримання регламентів. Негативний вплив природних факторів знижується завдяки системам моніторингу, прогнозування і відповідним діям.

Усі ці елементи, у сукупності, можуть призводити до аварій, а їх наслідки, у свою чергу, зменшуються шляхом використання засобів безпеки, роботи рятувальних служб, та екстрених протоколів.

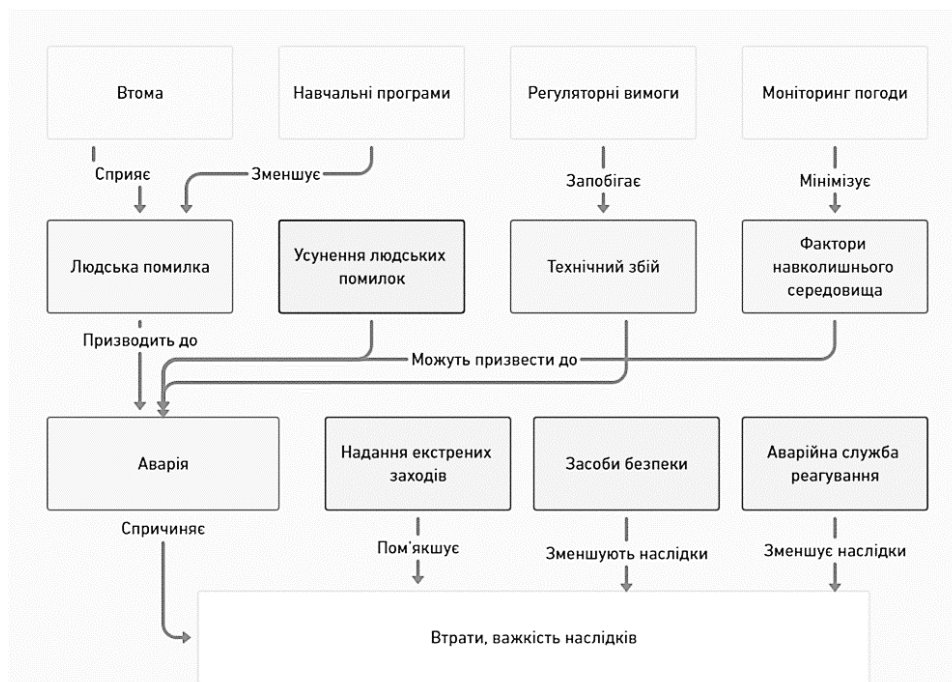


Рисунок 1 – Структурна схема ризик-факторів і механізмів впливу на наслідки аварій

Саме це підкреслює важливість інтегрованого управління ризиками, де швидкість судна лише один із регулювальних параметрів у складній багатофакторній системі.

**Результати й обговорення.** У межах дослідження проведено імітаційне моделювання еволюції ризику, яке враховує хронологічну зміну впливу трьох основних джерел небезпеки: людського фактора, технічних збоїв та погодних умов.

Кожне джерело розглядається як динамічна змінна, що реагує на час, накопичення втоми, старіння обладнання або тривалість перебування судна в зоні метеорологічної нестабільності. Застосування інтегрованої моделі дозволяє оцінити, як зростає загальний ризик аварій у процесі експлуатації.

На рис. 2 зображено зміну часткових і загального ризиків у часовому вимірі.

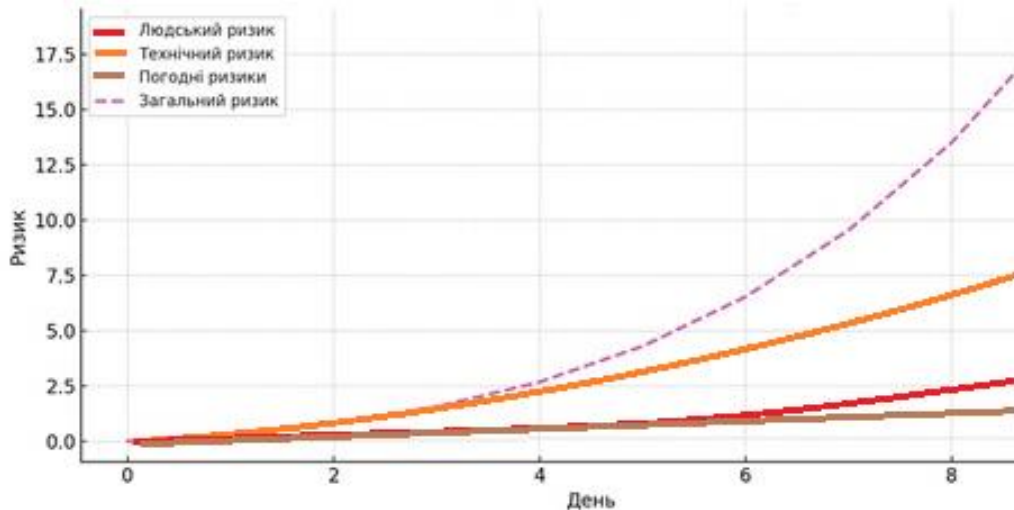


Рисунок 2 – Динаміка ризиків протягом часу: людський, технічний, погодний, загальний

Аналіз графіку, що наведений на рис. 2, показує, що найінтенсивніше зростає технічний ризик, що є наслідком кумулятивного зношення систем і відсутності належного техобслуговування. Людський ризик збільшується помірно, однак залишається стабільним завдяки початковим контрзаходам (тренінги, навчання, вчасні зміни екіпажу). Погодні ризики мають рівномірне зростання, оскільки тривалість перебування в морі пропорційно підвищує ймовірність потрапляння в небезпечні умови. Сукупний ризик демонструє нелінійне зростання, яке стає помітним вже після тижня роботи.

На рис. 3 представлено зміни ефективності аварійного реагування, витрат на запобігання та ліквідацію.

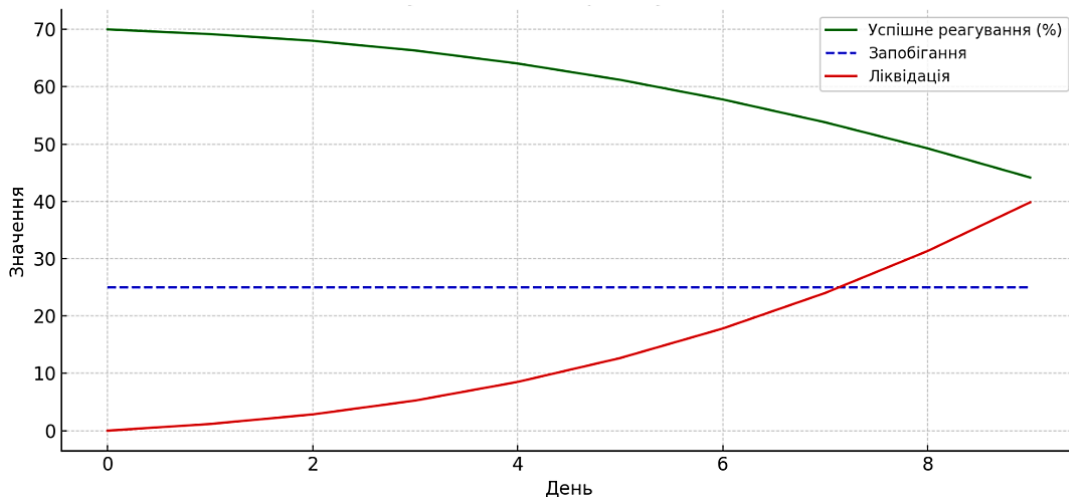


Рисунок 3 – Реагування та витрати у динаміці

Зниження ефективності реагування на надзвичайні ситуації відображає ускладнення умов для рятувальних заходів із часом: втрата ресурсу, втома персоналу, обмеження зв'язку

або логістики. Попри те, що витрати на профілактику залишаються постійними (25 умовних одиниць), витрати на ліквідацію зростають експоненційно, що підтверджує економічну доцільність інвестування в попередження ризиків на ранніх етапах.

Таким чином, хронологічна симуляція підтверджує ключовий висновок: ризики в судноплаванні мають накопичувальний характер, і затягування рейсу (як це проходить при повільному ході) повинне супроводжуватись пропорційним посиленням заходів контролю і відповідних дій, інакше зростають не лише небезпеки, а й економічні втрати.

Щоб кількісно оцінити зміну ризикових характеристик у часовому розрізі, проведено симуляцію 10-денного рейсу з фіксованими умовами експлуатації. У моделюванні враховано поступове зростання трьох основних компонентів ризику: людського, технічного та погодного. Крім того, моделюється ефективність реагування на надзвичайні ситуації та динаміку витрат, як на профілактику, так і на ліквідацію наслідків аварій. Всі обчислення виконувались згідно з алгоритмом побудованої математичної моделі, поданою раніше. У табл. 1 представлено результати динамічного моделювання.

Таблиця 1 – Результати динамічного моделювання ризику протягом 10-денного рейсу

День	Людський ризик	Технічний ризик	Погодні ризики	Загальний ризик	Успішне реагування (%)	Витрати на запобігання	Витрати на ліквідацію
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	70.00	25.0	0.000
1	0.0059	0.0019	0.0049	0.3144	69.18	25.0	1.166
2	0.0114	0.0108	0.0095	0.7924	68.02	25.0	2.832
3	0.0167	0.0297	0.0139	1.5473	66.32	25.0	5.251
4	0.0218	0.0598	0.0181	2.6750	64.05	25.0	8.503
5	0.0267	0.1011	0.0222	4.2906	61.20	25.0	12.665
6	0.0312	0.1543	0.0261	6.5265	57.78	25.0	17.814
7	0.0354	0.2200	0.0297	9.5367	53.79	25.0	24.021
8	0.0393	0.2985	0.0331	13.4979	49.24	25.0	31.346
9	0.0428	0.3904	0.0362	18.6104	44.16	25.0	39.839

З отриманих даних видно, що технічний ризик зростає найінтенсивніше, його значення на дев'ятий день у 20 разів перевищує початкове значення. Людський фактор зростає плавніше, але стабільно, тоді як погодні ризики підвищуються лінійно (за визначеними умовами моделювання). Сукупний ризик (сума всіх компонентів) демонструє експоненційне зростання, після 6-го дня система входить у фазу підвищеної аварійної небезпеки. Успішність реагування падає пропорційно зростанню загроз, а витрати на ліквідацію наслідків зростають більш ніж у 30 разів за весь період. Водночас витрати на запобігання залишаються сталими, що свідчить про потенційну економічну неефективність незмінної системи профілактики в умовах зростаючих ризиків.

Цей аналіз дозволяє робити висновки щодо необхідності адаптивного управління ризиками в динаміці, зокрема, пропорційного збільшення заходів реагування та обслуговування залежно від тривалості рейсу. Такий підхід критично важливий при впровадженні повільного ходу як стратегії сталого судноплавства.

Для оцінювання доцільності впровадження повільного ходу в різних умовах експлуатації проведено порівняльне моделювання інтегрального показника ефективності  $E_{net}$ , який враховує сумарну економію енергії, скорочення викидів CO<sub>2</sub>, а також ризики та очікувані витрати на ліквідацію аварій. На рис. 4 зображено залежність цього показника від швидкості для п'яти різних типів суден.

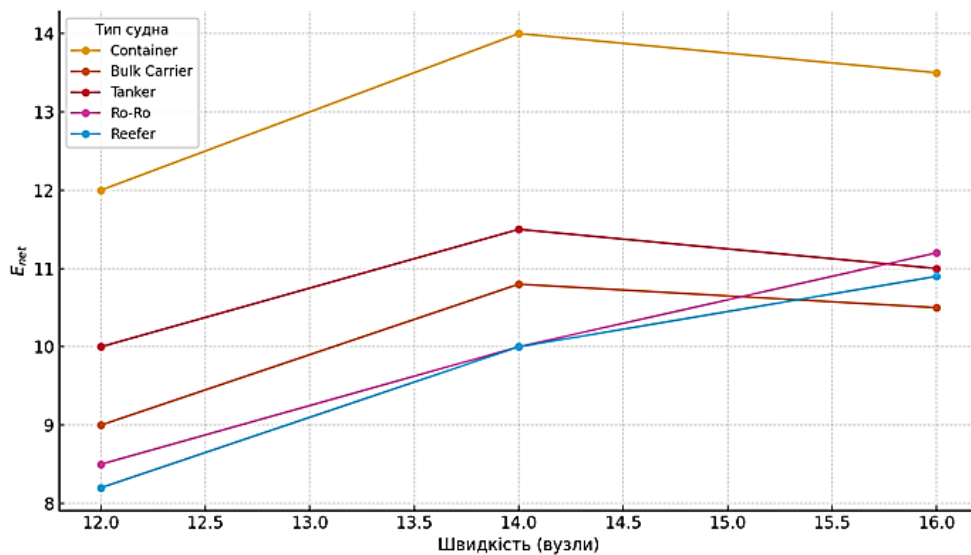


Рисунок 4 – Інтегральна ефективність  $E_{net}$  залежно від швидкості для різних типів суден

Аналіз отриманих даних свідчить про наявність характерного профілю ефективності для кожного типу судна.

Так, судна типу контейнеровоз [14] демонструють стабільно високі значення  $E_{net}$  у діапазоні 14–16 вузлів, що свідчить про їхню відносну нечутливість до варіацій швидкості в межах типового експлуатаційного режиму. Натомість для *Bulk Carrier* і *Tanker*, що зазвичай працюють на швидкостях 11–13 вузлів, збільшення швидкості хоч і підвищує  $E_{net}$ , але супроводжується зростанням ризику та витрат, що ставить під сумнів доцільність прискорення. Для цих суден збереження (або, навіть, зниження) швидкості є раціональною стратегією з позицій безпеки й економіки. У випадку з суднами типу *Ro-Ro* та *Reefer* спостерігається майже лінійне зростання ефективності зі швидкістю, що свідчить про їхню потенційну залежність від скорочення часу рейсу. Водночас ці типи суден можуть потребувати додаткових компенсаторних механізмів, щоб зробити *slow steaming* економічно виправданим.

Дискусійні результати отримані для суден *Ro-Ro* та *Reefer*: у цих випадках  $E_{net}$  зростає з підвищенням швидкості, що свідчить про потенційну неефективність повільного ходу для високочутливих або спеціалізованих типів флоту. Ймовірно, додаткові витрати через подовження рейсу переважають вигоди від економії пального, а ризики накопичуються значно швидше.

Отже, інтегральний показник  $E_{net}$  дозволяє об'єктивно враховувати складний компроміс між екологічною вигодою та безпекою, виявляючи оптимальні режими роботи суден не лише з погляду витрат, але й з урахуванням ризикової стійкості, а результати можуть бути використані як базис для розробки рекомендацій щодо використання швидкісного режиму для різних типів суден.

Отримані результати демонструють складну і багатовимірну природу впливу повільного ходу на експлуатаційну ефективність суден. З одного боку, зменшення швидкості призводить до помітної економії пального та зниження викидів  $\text{CO}_2$ , що відповідає глобальним екологічним цілям. З іншого боку, подовження рейсу супроводжується накопиченням ризиків, що суттєво змінює профіль безпеки операцій. Це підтверджується динамікою зростання загального ризику в симуляції 10-денного рейсу, де на тлі сталих витрат на запобігання спостерігається зростання витрат на ліквідацію наслідків. Інтегральний показник ефективності  $E_{net}$ , який поєднує екологічну вигоду та рівень ризику, продемонстрував, що оптимальна швидкість руху не завжди відповідає точці мінімального споживання пального. Для більшості типів суден найкращий баланс досягається в діапазоні 11–13 вузлів, тоді як для спеціалізованих суден (*Reefer*, *Ro-Ro*) ефективність повільного ходу є сумнівною. Це вказує на необхідність індивідуального підходу до впровадження стратегії

*slow steaming*, із врахуванням типу судна, маршруту, тривалості рейсу та ресурсної структури.

Ключовим висновком моделювання є те, що ризики [15] у судноплаванні мають кумулятивний характер, а їх ефективне стримування потребує адаптивної політики управління від масштабування технічного обслуговування до гнучкої моделі забезпечення екіпажу та інвестицій у якісний моніторинг судових операцій. Статична система заходів безпеки не може адекватно реагувати на зміну операційного середовища в умовах повільного ходу та збільшення тривалості переходів.

**Висновки.** Запровадження повільного ходу як стратегії підвищення енергоефективності судноплавства має як беззаперечні екологічні вигоди, так і супутні ризики, які потребують комплексної оцінки. Представлена модель оцінок дозволяє враховувати динамічну зміну ризику залежно від швидкості руху, тривалості рейсу та впливу трьох основних факторів: людського, технічного та погодного. Інтеграція моделі ризику в розрахунки дає змогу виявити оптимальні швидкості для кожного типу суден, з урахуванням не лише витрат пального, а й вартості потенційних наслідків аварій.

Результати моделювання, також доводять, що при недостатньому оновленні контрзаходів із часом ризик значно зростає, а витрати на ліквідацію наслідків перевищують своєчасно проведені профілактичні заходи та бюджет. Найбільш доцільною є стратегія адаптивного управління швидкісним режимом і ризиками, що базується на типі судна, маршруті, доступності портової інфраструктури та режимах експлуатації та може бути використаний як основа для розробки рекомендацій при оцінці рішень щодо оптимального режиму руху.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Li X., Sun B., Jin J., & Ding J. Ship speed optimization method combining Fisher optimal segmentation principle. *Applied Ocean Research*, 140, 103743. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103743>.
2. Xie X., Sun B., Li X., Zhao Y., & Chen Y. Joint optimization of ship speed and trim based on machine learning method under consideration of load. *Ocean Engineering*, 287, 115917. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115917>.
3. Hua R., Yin J., Wang S., Han Y., & Wang X. Speed optimization for maximizing the ship's economic benefits considering the Carbon Intensity Indicator (CII). *Ocean Engineering*, 293, 116712. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116712>.
4. Wang C., Huang L., Ma R., Wang K., Sheng J., Ruan Z., Hua Y., & Zhang R. A novel cooperative optimization method of course and speed for wing-diesel hybrid ship based on improved A\* algorithm. *Ocean Engineering*, 302, 117669. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117669>.
5. He P., Jin J. G. Pan W., & Chen J. Route, speed, and bunkering optimization for LNG-fueled tramp ship with alternative bunkering ports. *Ocean Engineering*, 305, 117957. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117957>.
6. Li X., Ding K., Xie X., Yao Y., Zhao X., Jin J. & Sun B. Bi-objective ship speed optimization based on machine learning method and discrete optimization idea. *Applied Ocean Research*, 148, 104012. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104012>.
7. Luo X., Yan R. & Wang S. Ship sailing speed optimization considering dynamic meteorological conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 167, 104827. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104827>.
8. Gu Y., Wang Y. & Iris Ç. Integrated green technology adoption, ship speed optimization and slot management for shipping alliance under emission limits and uncertain fuel prices. *Journal of Cleaner Production*, 494, 144939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144939>.

9. Gu Y., Wang Y., & Iris Ç. Integrated green technology adoption, ship speed optimization and slot management for shipping alliance under emission limits and uncertain fuel prices. *Journal of Cleaner Production*, 494, 144939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144939>.
10. Yan D., Chen C., Gan W., Sasa K., He G. & Yu H. Carbon intensity indicator (CII) compliance: Applications of ship speed optimization on each level using measurement data. *Marine Pollution Bulletin*, 212, 117593. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117593>.
11. Marashian A., Böling J. M., Razminia A., Hyvönen J., Vettor R., Gustafsson W., Pirttikangas M., & Björkqvist J. Combined engine configuration and speed optimization for fuel savings on cruise ships. *Ocean Engineering*, 322, 120387. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120387>.
12. Hu C., Wang Y., Han X., Liu H., Sun Q. & Zhou B. Research on speed optimization of fixed route ship with low data dependence. *Ocean Engineering*, 328, 121065. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121065>.
13. IMO GreenVoyage 2050, Energy-Efficiency Technologies Portal. <https://greenvoyage2050.imo.org/energy-efficiency-technologies-information-portal/>.
14. Container-xChange, “How Slow Steaming Impacts Shippers and Carriers”. <https://www.container-xchange.com/blog/slow-steaming/>.
15. Laine V., Valdez-Banda O. & Goerlandt F. Risk maturity model for the maritime authorities: a Delphi study to design the R-Mare matrix model. *WMU J Marit Affairs* 23, 137–163 (2024). <https://doi.org/10.1007/s13437-023-00328-z>.

## REFERENCES

1. Li, X., Sun, B., Jin, J. & Ding, J. (2023). Ship speed optimization method combining Fisher optimal segmentation principle. *Applied Ocean Research*, 140, 103743. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103743>.
2. Xie, X., Sun, B., Li, X., Zhao, Y. & Chen, Y. (2023). Joint optimization of ship speed and trim based on machine learning method under consideration of load. *Ocean Engineering*, 287, 115917. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115917>.
3. Hua, R., Yin, J., Wang, S., Han, Y. & Wang, X. (2024). Speed optimization for maximizing the ship’s economic benefits considering the Carbon Intensity Indicator (CII). *Ocean Engineering*, 293, 116712. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116712>.
4. Wang, C., Huang, L., Ma, R., Wang, K., Sheng, J., Ruan, Z., Hua, Y., & Zhang, R. (2024). A novel cooperative optimization method of course and speed for wing-diesel hybrid ship based on improved A\* algorithm. *Ocean Engineering*, 302, 117669. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117669>.
5. He, P., Jin, J. G., Pan, W., & Chen, J. (2024). Route, speed, and bunkering optimization for LNG-fueled tramp ship with alternative bunkering ports. *Ocean Engineering*, 305, 117957. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117957>.
6. Li, X., Ding, K., Xie, X., Yao, Y., Zhao, X., Jin, J. & Sun, B. (2024). Bi-objective ship speed optimization based on machine learning method and discrete optimization idea. *Applied Ocean Research*, 148, 104012. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104012>.
7. Luo, X., Yan, R. & Wang, S. (2024). Ship sailing speed optimization considering dynamic meteorological conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 167, 104827. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104827>.
8. Gu, Y., Wang, Y. & Iris, Ç. (2025). Integrated green technology adoption, ship speed optimization and slot management for shipping alliance under emission limits and uncertain fuel prices. *Journal of Cleaner Production*, 494, 144939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144939>.
9. Gu, Y., Wang, Y. & Iris, Ç. (2025). Integrated green technology adoption, ship speed optimization and slot management for shipping alliance under emission limits and uncertain fuel prices. *Journal of Cleaner Production*, 494, 144939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.144939>.

10. Yan, D., Chen, C., Gan, W., Sasa, K., He, G. & Yu, H. (2025). Carbon intensity indicator (CII) compliance: Applications of ship speed optimization on each level using measurement data. *Marine Pollution Bulletin*, 212, 117593. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2025.117593>.
11. Marashian, A., Böling, J. M., Razminia, A., Hyvönen, J., Vettor, R., Gustafsson, W., Pirttikangas, M. & Björkqvist, J. (2025). Combined engine configuration and speed optimization for fuel savings on cruise ships. *Ocean Engineering*, 322, 120387. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120387>.
12. Hu, C., Wang, Y., Han, X., Liu, H., Sun, Q. & Zhou, B. (2025). Research on speed optimization of fixed route ship with low data dependence. *Ocean Engineering*, 328, 121065. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121065>.
13. IMO GreenVoyage 2050, Energy-Efficiency Technologies Portal (2024). <https://greenvoyage2050.imo.org/energy-efficiency-technologies-information-portal/>.
14. Container-xChange, “How Slow Steaming Impacts Shippers and Carriers” (2019). <https://www.container-xchange.com/blog/slow-steaming/>.
15. Laine, V., Valdez-Banda, O. & Goerlandt, F. (2024). Risk maturity model for the maritime authorities: a Delphi study to design the R-Mare matrix model. *WMU J Marit Affairs* 23, 137–163. <https://doi.org/10.1007/s13437-023-00328-z>.

**Bulgakov M., Melnyk O., Aleksishyn A., Mazur O., Onishchenko O. INTEGRATION OF RISK ANALYSIS IN THE ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF SHIPS AT CHANGING SPEED REGIMES**

*The article presents a comprehensive mathematical model for risk assessment in slow steaming conditions, integrating energy efficiency, greenhouse gas emissions and operating costs. Simulations for different types of ships in several speed scenarios were carried out, which allowed the determination of the relationship between fuel economy and the accumulation of relevant risks associated with the human factor, technical malfunctions and adverse weather conditions. An integral performance indicator that considers both environmental benefits and potential costs of eliminating the consequences of accidents is proposed. The simulation results have revealed the existence of an optimal speed range for each type of ship, at which the best compromise between energy and environmental efficiency and operational safety is achieved. Dynamic risk modeling has shown that long voyages without the adaptation of control and prevention systems lead to a rapid increase in the cost of eliminating the consequences. The results obtained are of practical value for shipping companies to develop adaptive strategies for managing the speed of vessels that combine environmental goals with ensuring the safety and financial sustainability of maritime transportation.*

**Key words:** maritime transport; vessel traffic; speed mode; slow running; shipping; risk analysis; energy efficiency; CO<sub>2</sub> emissions; technical failures; human factor; weather risks; speed optimization; integrated efficiency; sustainable development; scenario modeling; cost optimization; accident prevention; environmental safety; risk management.

© Булгаков М. П., Мельник О. М., Алексішин А. В., Мазур О. М., Онищенко О. А.

Статтю прийнято до редакції 16.06.2025

## ФОРМУВАННЯ ПОЛЯ ТОЧНОСТІ ОБСЕРВАЦІЇ СУДНА ЗА ДЕКІЛЬКОМА ОРІЄНТИРАМИ

**Жуков Д. С.**, КДП, старший викладач кафедри «Управління судном», Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: dsz@onma.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7843-9131;

**Алексейчук Б. М.**, старший викладач кафедри «Управління судном», Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: navi.dane4ka@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1043-5174.

*У роботі відмічається, що наявність навігаційних перешкод у вигляді мілін обумовлюють підвищений рівень навігаційної аварійності при плаванні суден у стислих водах. Похибки навігаційних вимірювань та маневрування судна породжують ризики навігаційної аварійності. У стислих водах також відбувається інтенсивне судноплавство, що веде до виникнення ситуацій небезпечного зближення і ризиків зіткнення.*

*Дуже суттєвим чинником, що впливає на безпеку судноводіння, особливо в районах з ненадійним прийомом сигналу супутникових навігаційних систем, є характеристики точності визначення місця судна по навігаційним орієнтирам.*

*Для формування поля точності обсервації судна, яке створюється декількома орієнтирами необхідно застосувати скалярну міру точності кожної з точок прибережного району плавання судна. Найбільш відповідною характеристикою для такої міри точності є дисперсія модуля векторіальної похибки.*

*Приведено вираз показника точності для випадку вимірювань дистанції і пеленгу кожного орієнтиру, похибки ліній положення яких мають нормальний закон розподілу.*

*Для формування поля точності обсервації судна в районі його плавання проводилось імітаційне комп'ютерне моделювання.*

*Значення скалярного показника точності розраховувалося для двох, трьох та чотирьох орієнтирів, і за його значенням визначалася ступінь затіненості елементарної ділянки поля точності, причому зі зростанням показника затіненість збільшується. Також передбачено можливе оцифрування поля точності, яке відображається на електронній карті із нанесенням значень показника.*

*Ключові слова:* безаварійність судноводіння; навігаційна безпека; поле точності; імітаційне комп'ютерне моделювання.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.069-079**

**Вступ.** Проблема забезпечення безпечного судноплавства в умовах стислих вод є однією з ключових у сфері навігаційної безпеки. Високий рівень аварійності в таких районах обумовлюється низкою чинників, серед яких особливо виділяються наявність навігаційних перешкод, обмеженість маневрового простору, інтенсивне судноплавство, а також похибки навігаційних вимірювань. У результаті цього виникають ситуації небезпечного зближення суден і підвищується ризик зіткнень та посадки на міліну. З огляду на це, підвищення точності визначення координат судна та своєчасне виявлення зон підвищеного ризику стає актуальним завданням для сучасної навігаційної практики.

Особливо гостро питання точності постає в умовах ненадійного приймання сигналів GNSS, де основним джерелом інформації про положення судна стають навігаційні орієнтири. У таких ситуаціях ефективно судноводіння неможливе без урахування просторово змінної точності визначення місця судна, що пов'язана з конфігурацією орієнтирів, типом ліній положення (пеленг, дистанція), імовірнісними властивостями похибок.

**Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими або практичними завданнями.**

Дуже суттєвим чинником, що впливає на навігаційну безпеку, є саме точність обсервації положення судна у заданому районі. Традиційні навігаційні засоби – такі як ЕКНІС, АІС, ЗАРП – забезпечують комплексне відображення навігаційної ситуації, але не дають інформації про точність координат, що може ввести судноводія в оману в критичній ситуації. Саме тому існує потреба у вдосконаленні відображення навігаційної ситуації шляхом візуалізації поля точності обсервації судна на електронній карті.

Для формування такого поля необхідно використати скалярну міру точності, яка дозволяє кількісно оцінити дисперсію модуля векторної похибки в кожній точці району плавання. Це вимагає створення математичної моделі, що враховує коваріаційні характеристики вимірювань пеленгів і дистанцій, закон розподілу похибок та їх ефективність, а також просторову конфігурацію навігаційних орієнтирів.

Отже, постає необхідність у розробці методу формування поля точності навігаційної обсервації, який базується на поєднанні статистичних характеристик похибок і моделюванні їх впливу на координатну невизначеність. Такий підхід дозволить надати судноводієві інтуїтивно зрозумілу інформацію про надійність його місцеположення та адаптивно змінювати траєкторію з урахуванням зон мінімальних похибок, що сприятиме підвищенню рівня навігаційної безпеки в складних умовах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і виділення невирішених раніше частини загальної проблеми.**

Значна кількість робіт по тематиці безпеки мореплавання присвячена проблемі забезпечення безаварійності судноводіння, що має ряд складових, кожна з яких направлена на зниження впливу суттєвого чинника аварійності.

У роботах [1–7] відображені розробка і використання інформаційних систем імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями.

Інтелектуальну систему прогнозування руху судна, що імітує процес навчання автономного блоку управління, створеного за допомогою штучної нейронної мережі розглянуто в роботі [1]. Блок управління надає вхідні сигнали і вираховує значення необхідних маневрових параметрів судна в стислих водах.

Як відзначається в роботі [2], у комп'ютерних системах для безпечного плавання суден використовуються прогнозні інструменти руху суден, які успішно застосовуються протягом тривалого часу. Але спрощені наявні прогнози обмежують їх використання для негайного поточного відображення руху судна в разі зміни положення керма та обертів двигуна. Необхідна точність реалізації криволінійної траєкторії руху судна може бути забезпечена більш удосконаленими прогнозованими моделями руху судна.

Питанням ідентифікації судових моделей маневрування присвячена робота [3], яка призначена для дослідження маневреності судна, проєктування системи управління рухом суден та сприяють розвитку системи управління судовими тренажерами. У роботі створена нелінійна модель маневрування судна. Для оцінки параметрів моделі пропонується алгоритм, заснований на розширеній теорії фільтра Калмана.

У роботі [4] розглянуто розробку інформаційної системи імітаційного моделювання руху суден зі складними динамічними моделями, залежно від кута кладки керма й обертів двигуна, яка має забезпечити новий тип планування маневру судна і контроль реалізації завданого маневру. У процесі маневрування система повинна відображати завдані маневри одночасно з фактичним рухом судна та з індикацією прогнозованої траєкторії, яка визначається реальними даними від датчиків судна.

У роботах [5, 6] розглянуто питання врахування характеристик поворотності судна при розрахунку параметрів його повороту та забезпечення необхідної точності повороту судна способом переміщення його криволінійної траєкторії, які використовуються в запропонованій інформаційній системі управління судном.

У роботі [7] наведено математичні моделі зміни курсу судна при повороті без урахування часу переключення пера керма. Всього представлено три моделі різного ступеня адекватності реального процесу повороту і виявлено відповідність математичних моделей експериментальним натурним спостереженням конкретних суден.

Метод оцінки навігаційної безпеки при провідці судна стислим маршрутом запропоновано в роботах [8, 9], який дає можливість заздалегідь визначити вірогідність безаварійної провідки вибраним маршрутом, межі якого формалізуються за допомогою

електронної карти. При цьому, як показано в роботі [10], враховується закон розподілу похибки бокового відхилення від програмної траєкторії руху.

Одним із найбільш важливих чинників аварійності являється зіткнення суден, для попередження яких розроблено різні системи прийняття рішень, чому присвячено значне число робіт.

Монографія [11] присвячена особливостям розходження суден шляхом зміщенням на лінію паралельну шляху переміщення.

Теоретичне обґрунтування системи ухилення від зіткнення для автономних суден викладено у роботі [12], в якій представлено алгоритм вибору маневру розходження. Приведено вимоги до автономного судноводіння, які ураховують фактори, що впливають на процес розходження. Відмічається, що вирішення задач автоматизації управління судном проводяться у класичному чи комп'ютерному варіанті. Класичний варіант використовує математичні моделі, а при комп'ютерному варіанті залучені методи штучного інтелекту.

У роботі [13] було запропоновано графічні інструменти для полегшення вибору, оцінки та коригування дій запобігання зіткнення в ситуаціях з рухомими та нерухомими перешкодами, припускаючи, що такі ситуації не є екстремальними або звичайними для вітрильних суден і що цільові параметри руху є постійними або їх майбутня зміна відома. Розглядався вибір комбінованого Z-маневру ухилення (зміна курсу і швидкості в одній точці та повернення до вихідних значень цих параметрів в іншій точці) і однієї комбінованої дії (зміна курсу і швидкості у вибраній точці). Розроблені графічні засоби містять діаграми, що відображають вісім зон дій, і спеціальні позначки цілей у момент їх максимального наближення до власного судна. З огляду на COLREG і хорошу морську практику, ці зони були розташовані в порядку пріоритету застосування. Для побудови діаграм використано результати перерахування репрезентативної дискретної множини можливих варіантів маневру.

Основним методам автоматичного визначення маневру розходження суден присвячені статті [14, 15], в яких також приведено результати проведеного аналізу.

У роботі [16] представлено спосіб послідовного розходження судна з двома небезпечними цілями з графічним відображенням вибраного маневру розходження, а в роботі [17] запропоновано розробку судової інформаційної системи запобігання зіткнень з урахуванням навігаційних перешкод, для чого використовуються електронні карти.

Посадка на міліну та зіткнення все ще становлять найвищий відсоток морських аварій, незважаючи на поточну увагу до морської освіти та навчання та покращення можливостей датчиків зазначається в статті [18]. Зіткнення відбувається через людську помилку з наслідками від помірних до серйозних, зі значним впливом як на навколишнє середовище, так і на життя на морі. У цьому документі короткі статистичні дані щодо людського фактора, як першопричини морських інцидентів, разом із неправильним розумінням правил зіткнень представлені як базовий розділ. Крім того, у цій роботі обговорюється архітектура системи підтримки прийняття рішень, щоб запропонувати відповідні дії, коли виявлено ризик потенційного зіткнення. Запропонована система архітектури базується на різних модулях, інтегрованих із відповідними вхідними даними датчиків щодо навколишньої зони навігації. Як наслідок, інструмент може підтримувати вахтових офіцерів у процесі прийняття рішень, надаючи завчасні пропозиції відповідно до положень про зіткнення. Запропонована система призначена для використання на борту незалежно від ступеня автоматизації судна, і вона базується на АІС, яка є обов'язковою, що робить її широко застосовною. Правильне використання системи може значно зменшити кількість зіткнень, як продемонстрували отримані результати.

**Метою дослідження** є розробка методу формування поля точності обсервації судна за декількома орієнтирами й апробація математичної моделі формування та відображення на електронній карті поля точності обсервації судна, що враховує кількість, тип та розташування навігаційних орієнтирів, а також імовірнісну природу похибок навігаційних вимірювань.

Для досягнення мети дослідження, слід виконати ряд наступних завдань:

1. Розробити математичну модель формування поля точності обсервації судна, що враховує коваріаційні характеристики похибок пеленгів і дистанцій до орієнтирів, з урахуванням різних законів розподілу навігаційних похибок.

2. Обґрунтувати вибір скалярного показника точності як критерію оцінки модуля векторної похибки положення судна та забезпечити його обчислення для довільної конфігурації орієнтирів.

3. Розробити алгоритм і програмну реалізацію імітаційного моделювання поля точності в районі плавання судна для різної кількості орієнтирів, з урахуванням змішаного розподілу похибок.

4. Реалізувати візуалізацію результатів моделювання шляхом накладання оцифрованого поля точності на електронну навігаційну карту та провести аналіз впливу кількості та розташування орієнтирів на рівень позиційної точності.

**Виклад матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів.** З розвитком інформаційних комп'ютерних технологій синтез навігаційної ситуації дедалі більше покладався на технічні засоби. Поява ЕКНІС, супутникової навігації, АІС та використання ЗАРП забезпечили синтез та відображення навігаційної ситуації комплексно, причому базовим елементом стала електронна карта, на яку наноситься поточна позиція судна, позиції та параметри руху навколишніх цілей як від ЗАРП, так і від АІС. Таке відображення навігаційної ситуації суттєво полегшує судноводію прийняття ефективних рішень щодо забезпечення безаварійного судноводіння.

Однак описане відображення навігаційної ситуації є неповним. Дуже суттєвим чинником, що впливає на безпеку судноводіння, особливо в районах з ненадійним прийманням сигналу супутникових навігаційних систем, є характеристики точності визначення місця судна по навігаційним орієнтирам.

Тому модель відображення навігаційної ситуації потрібно доповнити візуальним відображенням точності обсервації судна в районі його плавання, з тим, щоб можна було оперативно провести коректуру програмної траєкторії руху для підвищення точності контролю місця та вибору найбільш сприятливих умов, що мінімізують позиційні похибки обсервацій судна. Слід зазначити, що для кожної елементарної площини, порівнянної з габаритами судна, у районі його плавання слід розрахувати точності характеристики векторної похибки щодо центру елементарної площини, вибираючи різні поєднання орієнтирів і проводячи індикацію оцінки точності координат і групу орієнтирів, при якій вона досягається.

Візуалізація такого поля точностей у районі руху судна можлива шляхом використання колірного представлення значень критерію точності та накладання такого поля у прозорому режимі на електронну карту. У такому випадку до моделі навігаційної ситуації додається наочна інформація про точність контролю місця судна.

Таким чином, для формування поля точностей обсервації судна необхідно вибрати чисельний (скалярний) показник, що характеризує величину векторіальної похибки в довільній позиції поля.

Точність обсервації місця судна характеризується коваріаційною матрицею векторної похибки  $K(\Delta X, \Delta Y)$ , де  $\Delta X$  і  $\Delta Y$  – складові векторної похибки. Тому скалярний показник точності повинен визначатись коваріаційною матрицею векторної похибки  $K(\Delta X, \Delta Y)$ .

Розрахунок координат судна при надмірних вимірах методом максимальної правдоподібності забезпечує їх ефективні оцінки. У цьому випадку другі центральні моменти (дисперсії) і змішані моменти коваріаційної матриці мають мінімальні значення, тому матриця векторної похибки, отримана зазначеним методом, позначена  $K(\Delta X, \Delta Y)_{\min}$ . У роботах [19, 20] показано, що коваріаційна матриця у разі, коли точність ліній положення різна, має такий вигляд:

$$K(\Delta X, \Delta Y)_{\min} = \frac{1}{\Delta_r} \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin^2 \alpha_i & -\sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i \\ -\sum_{i=1}^n s_i^{-1} \sin \alpha_i \cos \alpha_i & \sum_{i=1}^n s_i^{-1} \cos^2 \alpha_i \end{vmatrix},$$

де  $n$  – число ліній положення;

$\alpha_i$  – напрямок градієнта  $i$ -ї лінії положення;

$$\Delta_r = \left[ \left( \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \right) \left( \sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \right) - \left( \sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \right)^2 \right]; \quad s_i = \int_{R_1} \frac{\left[ \frac{\partial}{\partial \xi_i} f(\xi_i) \right]^2}{f(\xi_i)} d\xi_i.$$

В останньому виразі  $f(\xi_i)$  – щільність розподілу похибки  $i$ -ї лінії положення. Діагональні елементи коваріаційної матриці є дисперсіями  $D_x$  і  $D_y$  та складових  $\Delta X$  та  $\Delta Y$  векторіальної похибки. Їх сума дисперсією модуля вектора позиційної векторної похибки  $D_{md}$ , тобто  $D_{md} = D_x + D_y$ .

Кожен із орієнтирів забезпечує можливість отримання двох ліній положення (вимірюванням пеленгу та дистанції). Оскільки кожна пара містить різні лінії положення, то їх похибки  $\xi_1$  і  $\xi_2$  є незалежними та різноточними. У цьому випадку вирази для дисперсій  $D_x$  і  $D_y$  коваріаційної матриці мають такий вигляд [21]:

$$D_x = \frac{1}{\tilde{\Delta}_r} \sum_{i=1}^N [s_{Di} \sin^2 \alpha_{bi} + s_{Pi} \cos^2 \alpha_{bi}];$$

$$D_y = \frac{1}{\tilde{\Delta}_r} \sum_{i=1}^N [s_{Di} \cos^2 \alpha_{bi} + s_{Pi} \sin^2 \alpha_{bi}];$$

де

$$\tilde{\Delta}_r = \left[ \left( \sum_{i=1}^N s_{Di} \cos^2 \alpha_{bi} + \sum_{i=1}^N s_{Pi} \sin^2 \alpha_{bi} \right) \left( \sum_{i=1}^N s_{Di} \sin^2 \alpha_{bi} + \sum_{i=1}^N s_{Pi} \cos^2 \alpha_{bi} \right) - \left[ \sum_{i=1}^N (s_{Di} + s_{Pi}) \sin \alpha_{bi} \cos \alpha_{bi} \right]^2 \right]$$

$$s_{Di} = \int_{R_1} \frac{\left[ \frac{\partial}{\partial \xi_i} f_{Di}(\xi_i) \right]^2}{f_{Di}(\xi_i)} d\xi_i, \quad s_{Pi} = \int_{R_1} \frac{\left[ \frac{\partial}{\partial \xi_i} f_{Pi}(\xi_i) \right]^2}{f_{Pi}(\xi_i)} d\xi_i,$$

причому  $f_{Di}(\xi_i)$  і  $f_{Pi}(\xi_i)$  – щільність розподілу ймовірностей похибок ліній положення відповідно по дистанції та пеленгу.

У разі нормального розподілу похибок ліній положення невластні інтеграли  $s_{Di}$  і  $s_{Pi}$  мають вигляд [22]:

$$s_{Di} = \frac{1}{\sigma_{Dj}^2} \quad \text{і} \quad s_{Pi} = \frac{1}{\sigma_{Pj}^2},$$

де  $\sigma_{Dj}^2$  і  $\sigma_{Pj}^2$  – дисперсії похибок ліній положення дистанції і пеленга.

Для формування поля точності обсервації судна, яке створюється декількома орієнтирами, як раніше зазначалося, необхідно застосувати скалярну міру точності кожної з точок прибережного району плавання судна. Найбільш відповідною характеристикою для такої міри точності є дисперсія модуля векторіальної похибки  $D_{md}$ .

У роботі [21] приведений вираз для показника точності  $D_{md}$  для випадку вимірювань дистанції і пеленгу кожного орієнтиру і розподілу похибок ліній положення за нормальним законом:

$$D_{md} = \frac{\sum_{j=1}^N \left( \frac{1}{\sigma_{Dj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pj}^2} \right)}{\frac{1}{2} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left[ \left( \frac{1}{\sigma_{Di}^2 \sigma_{Dj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2 \sigma_{Pj}^2} \right) \sin^2 \beta_{ij} + \left( \frac{1}{\sigma_{Di}^2 \sigma_{Pj}^2} + \frac{1}{\sigma_{Pi}^2 \sigma_{Dj}^2} \right) \cos^2 \beta_{ij} \right] \right\}} \quad (1)$$

де  $N$  – число орієнтирів;

$\beta_{ij}$  – горизонтальний кут між  $i$ -м і  $j$ -м орієнтирами.

У роботі [22] зазначається, що похибки навігаційних вимірювань  $\xi$  у вибірці підпорядковуються змішаному закону розподілу, щільність якого має такий вигляд:

$$f(\xi) = \frac{A_m}{(\xi^2 / 2 + \lambda)^{m+1}},$$

де  $A_m$  – нормуючий множник, причому  $A_m = \frac{2^{2m} (m!)^2}{\sqrt{2\pi} (2m)!} \lambda^{m+1/2}$ ;

$m$  – суттєвий параметр, який набуває цілих чисел;

$\lambda$  – масштабний параметр.

У роботі [22] показано, що при розрахунку обсервованих координат методом найменших квадратів у випадку, коли випадкові похибки навігаційних вимірювань розподілені за змішаним законом, відбувається втрата їх точності, а ефективність оцінки  $e$  оцінки менше одиниці, а її значення залежно від істотного параметра  $m$  розраховуються за формулою:

$$e = 1 - \frac{3}{2m^2 + 3m + 1}. \quad (2)$$

Значення ефективності  $e$ , розраховані за допомогою виразу (2), наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Ефективність змішаного розподілу першого типу

$m$	1	2	3	4	5	6
$e$	0,5	0,8	0,893	0,934	0,955	0,968

Тому в цьому випадку величину скалярного показника точності  $D_{md}$ , розрахованого за формулою (1), необхідно розділити на значення ефективності  $e$ .

Для формування поля точності обсервації судна в районі його плавання проводилось імітаційне комп'ютерне моделювання.

Значення скалярного показника точності розраховувалося за допомогою виразу (1) для двох, трьох та чотирьох орієнтирів, і за його значенням визначалася ступінь затіненості елементарної ділянки поля точності, причому зі зростанням  $D_{md}$  затіненість збільшується.

Також можливе оцифрування поля точності, яке відображається на електронній карті із нанесенням значень  $D_{md}$  у квадратних метрах. Для розрахунку величини  $D_{md}$  приймалися значення  $\sigma_D = 20$  м і  $\sigma_P = 0,5^\circ D$ . На рис. 1 показана електронна карта району плавання судна.

Поле точності обсервацій судна при застосуванні двох орієнтирів показано на рис. 2.

Аналіз поля точності, що породжується двома вибраними орієнтирами, показує, що мінімальна дисперсія модуля траєкторної похибки в районі входу в порт становить  $25 \text{ м}^2$ , а на відстані до 8 миль дисперсія не гірша за  $50 \text{ м}^2$ .

Чисельний розподіл значень показника точності в межах електронної картки для використання трьох орієнтирів наведено на рис. 3.

Проводячи аналіз точності поля, яке створюють три орієнтири, відзначаємо, що мінімальна дисперсія модуля векторіальної похибки дорівнює 17–18 м<sup>2</sup> у районі входу в порт, і вона не гірша за 50 м<sup>2</sup> на відстані до 10 миль.

На рис. 4 наведено графічний та чисельний розподіл поля точності чотирьох орієнтирів у заданому районі.

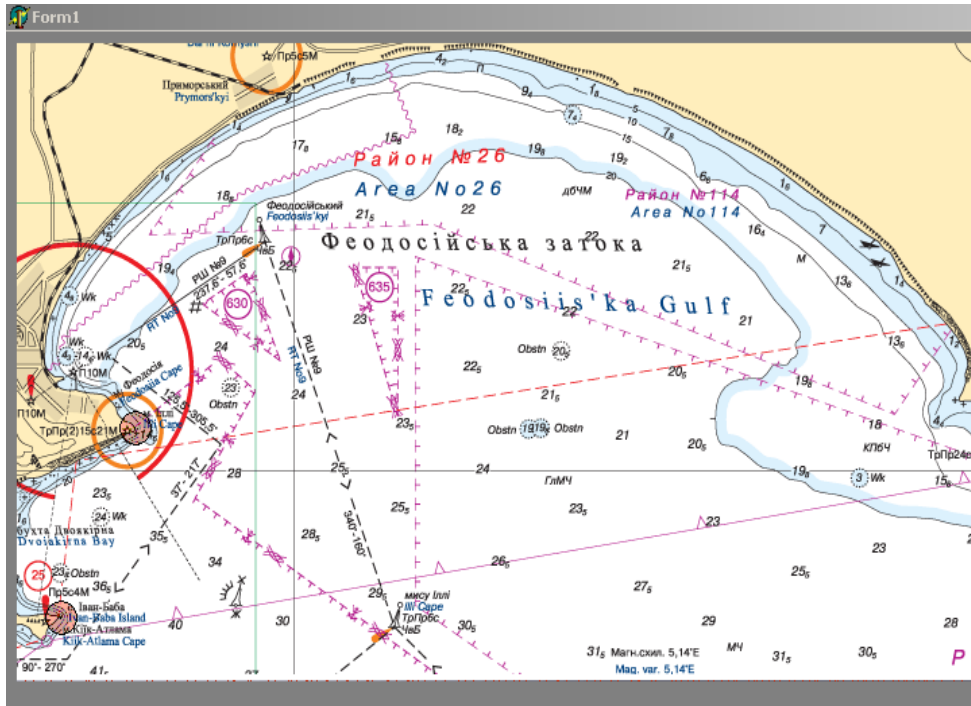


Рисунок 1 – Електронна карта району плавання судна

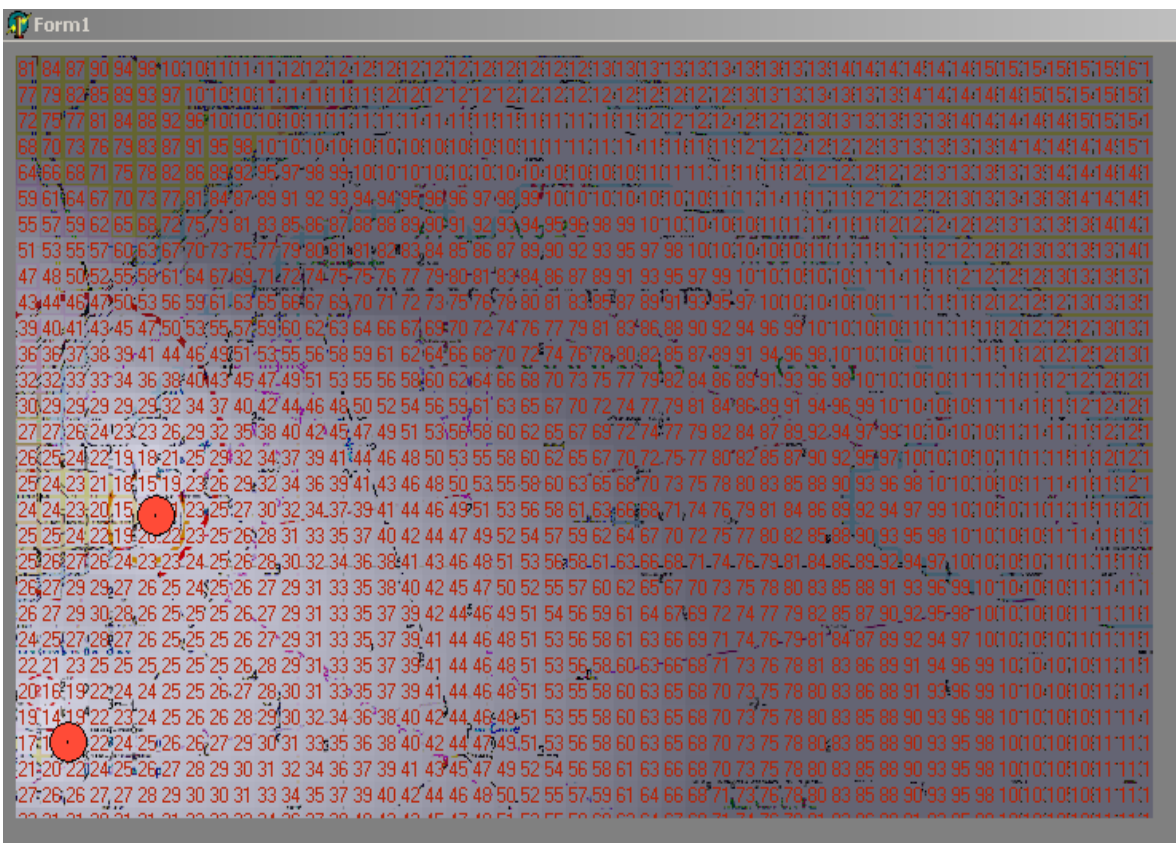


Рисунок 2 – Оцифрування поля точності для двох орієнтирів

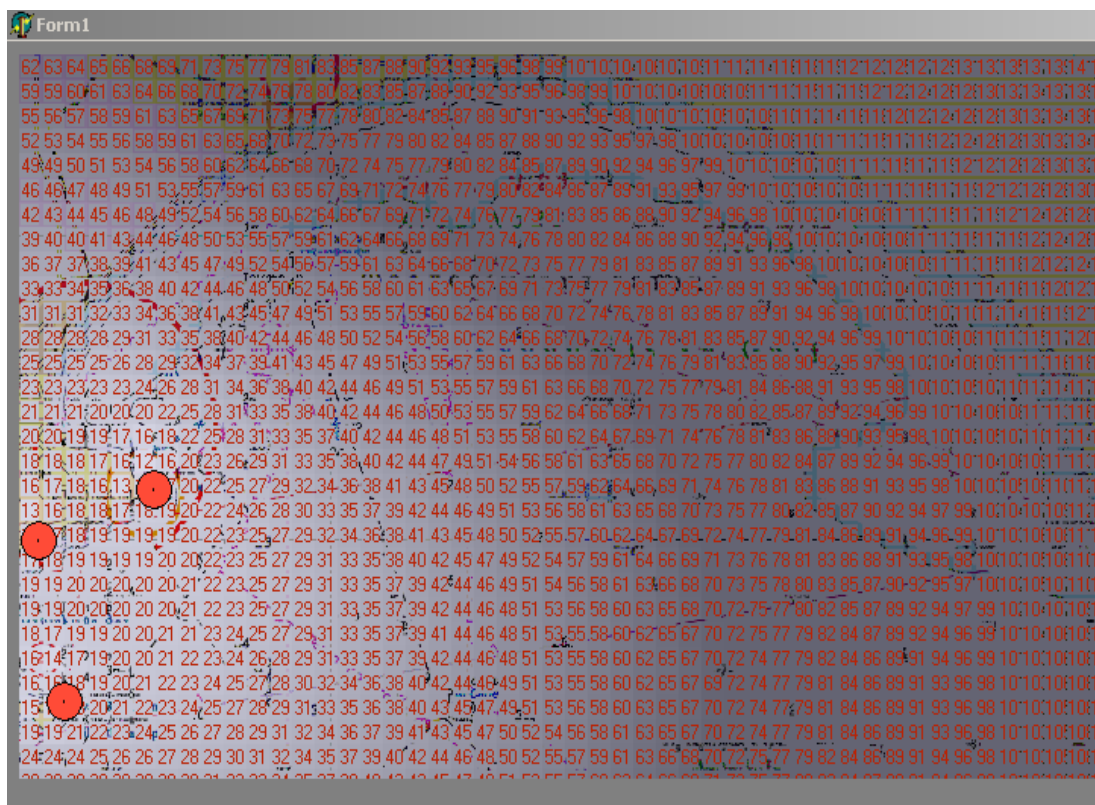


Рисунок 3 – Поле точності трьох орієнтирів

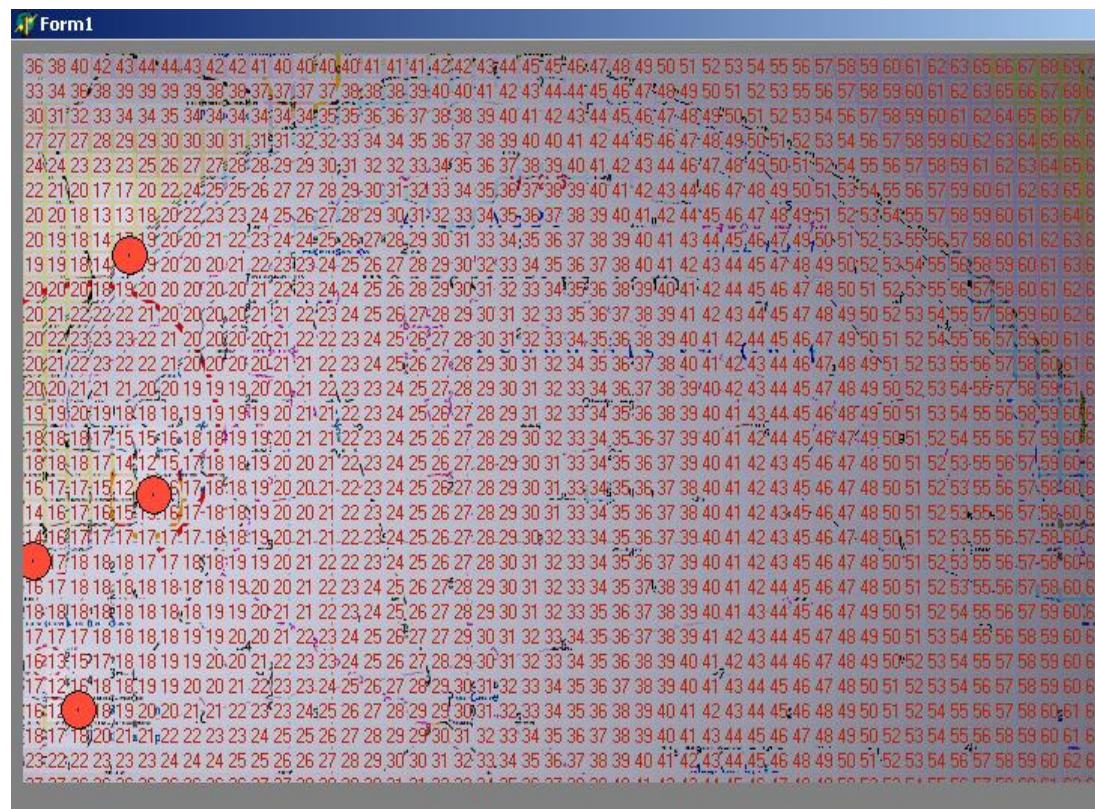


Рисунок 4 – Відображення поля точності для чотирьох орієнтирів

Графічне відображення розподілу точностей у разі використання чотирьох орієнтирів показує зростання точності для точок всього району. Чисельне значення розподілу показує, що по всій електронній карті максимальне значення показника точності (дисперсії модуля векторної похибки) вибирається у 70 м<sup>2</sup>, що відповідає граничній похибці 25 м.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження удосконалено метод формування поля точності обсервації судна по декількох орієнтирам з використанням електронної карти. Запропоновано застосування скалярного показника поля точності обсервації судна за двома, трьома та чотирма орієнтирами. Проведене імітаційне комп'ютерне моделювання поля точності обсервації судна по двох, трьох і чотирьох орієнтирах підтвердило доцільність практичного застосування розробленого способу формування поля точності.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ljacki M. Intelligent Prediction of Ship Maneuvering, *International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 10, nn. 3, <https://doi.org/10.12716/1001.10.03.17>, pp. 511–516, 2016.
2. Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S., Baldauf M. Maneuvering Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 25–30, 2009.
3. Shi C. J., Zhao D., Peng J., Shen C. Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 105–110, 2009.
4. Benedict K., Kirchhoff M., Gluch M., Fischer S., Schaub M., Baldauf M., Klaes S. Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 8, nn. 1, <https://doi.org/10.12716/1001.08.01.15>, pp. 131–141, 2014.
5. Калініченко Є. В. Облік характеристик поворотності при розрахунку параметрів повороту судна, *Водний транспорт*. №2 (20), с. 63–67, 2014.
6. Калініченко Є. В. Забезпечення необхідної точності повороту судна способом переміщення його криволінійної траєкторії, *Автоматизація судових технічних засобів*, № 20, с. 52–58, 2014.
8. Ворохобін І. І., Козак Ю. В., Северин В. В. Оцінка навігаційної безпеки під час плавання суден у стиснених водах. Saarbrucken, Deutschland: – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.
9. Северин В. В. Оцінка ймовірності безпечного проведення судна стиснутим маршрутом, *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V(16), Issue: 148, с. 94–98, 2017.
10. Ворохобін І. І. Вплив закону розподілу похибки бічного відхилення на ймовірність безпечного проходження судном стисненого маршруту, *East European Scientific Journal*, №5 (33), с. 30–37, 2018.
11. Вагущенко Л. Л. Розбіжність із суднами зміщенням на паралельну лінію колії, Одеса: Фенікс, 2013.
12. Thomas Statheros, Gareth Howells, Klaus McDonald-Maier, Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques, *J. Navig.*, v. 61, nn. 1, pp. 129–142, 2008.
13. Vagushchenko L., Vagushchenko A. Graphical Tools to Facilitate the Selection of Manoeuvres to Avoid Collision, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 3, <https://doi.org/10.12716/1001.17.03.14>, pp. 625–633, 2023.
14. Huang Y., Chen L., Chen P., Negenborn R. R. & P. H. van Gelder, Ship collision avoidance methods: State-of-the-art, *Safety Science*, nn. 121, pp. 451–473, 2020.
15. Lazarowska A. Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing, *Remote Sens*, nn.13, pp. 32–65, 2021.
16. П'ятаков В. Е., Петриченко О. А., Калюжний В. В. Спосіб послідовного розходження судна з двома небезпечними цілями, *Автоматизація судових технічних засобів*, № 24. с. 81–87, 2018.

17. Петриченко Є. А., Петриченко О. А. Розробка суднової інформаційної системи попередження зіткнень, Судноводство, Вип. 28, с. 120–130, 2018.
18. Martelli M., Žuškin S., Zaccone R., Rudan I. A COLREGs-Compliant Decision Support Tool to Prevent Collisions at Sea, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 2, <https://doi.org/10.12716/1001.17.02.11>, pp. 347–353, 2023.
19. Мудров В. М., Кушко В. Л., Методи обробки вимірювань, М: Радянське радіо, 1976.
20. Степаненко В. В. Ефективність оцінки параметрів ситуації небезпечного зближення судів, Судноводство, Вип. 2, с. 201–209, 2000.
21. Бузовський Д. А. Залежність точності критерію радіолокаційної системи зверненого типу від її структури / Бузовський Д. А. // Судноводство. 2006. № 11. С. 14–19.
22. Астайкін Д. В., Сікірін В. Є., Ворохобін І. І. та Олексійчук Б. М. Оцінка точності координат судна за надмірних вимірів. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017.

## REFERENCES

1. Ljacki, M. (2016). Intelligent Prediction of Ship Maneuvering, *International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 10, nn. 3, <https://doi.org/10.12716/1001.10.03.17>, pp. 511–516.
2. Benedict, K., Kirchhoff, M., Gluch, M., Fischer, S., Baldauf, M. (2009). Maneuvering Simulation on the Bridge for Predicting Motion of Real Ships and as Training Tool in Ship Handling Simulators, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 25–30.
3. Shi, C. J., Zhao, D., Peng, J., Shen, C. (2009). Identification of Ship Maneuvering Model Using Extended Kalman Filters, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 3, nn. 1, pp. 105–110.
4. Benedict, K., Kirchhoff, M., Gluch, M., Fischer, S., Schaub, M., Baldauf, M., Klaes, S. (2014). Simulation Augmented Manoeuvring Design and Monitoring – a New Method for Advanced Ship Handling, *TransNav, International magazine on marine navigation and safety of marine transport*, Vol. 8, nn. 1, <https://doi.org/10.12716/1001.08.01.15>, pp. 131–141.
5. Kalinichenko, Y. V. (2014). Accounting for turning characteristics when calculating vessel turning parameters, *Vodniy transport*. №2 (20), pp. 63–67.
6. Kalinichenko, Y. V. (2014). Ensuring the required accuracy of vessel turning by moving its curved trajectory, *Avtomatizatsiya sudovyh tehnikeskih sredstv*, № 20, pp. 52–58, 2014.
7. Kalinichenko, Y., Burmaka, I. (2016). Analysis of mathematical models of changing the vessel's course when turning, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/9(84), <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85839>, pp. 20–31.
8. Vorokhobin, I. I., Kazak, Y. V., Severin, V. V. (2018). *Assessment of navigation safety when vessels are sailing in confined waters*. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing.
9. Severin, V. V. (2017). Assessment of the probability of safe vessel navigation along a confined route, *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*, V(16), Issue: 148, pp. 94–98.
10. Vorokhobin, I. I. (2018). The influence of the law of distribution of lateral deviation error on the probability of safe passage of a vessel along a confined route, *East European Scientific Journal*, №5 (33), pp. 30–37.
11. Vagushchenko, L. L. (2013). *Divergence with vessels by shifting to a parallel track line*, Odesa: Feniks, 2013.
12. Thomas Statheros, Gareth Howells, Klaus McDonald-Maier (2008). Autonomous ship collision avoidance navigation concepts, technologies and techniques, *J. Navig.*, v. 61, nn. 1, pp. 129–142.

13. Vagushchenko, L., Vagushchenko, A. (2023). Graphical Tools to Facilitate the Selection of Manoeuvres to Avoid Collision, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 3, <https://doi.org/10.12716/1001.17.03.14>, pp. 625–633.
14. Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R. & P. H. van Gelder (2020). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art, *Safety Science*, nn. 121, pp. 451–473.
15. Lazarowska, A. (2021). Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships Utilizing Radar Remote Sensing, *Remote Sens*, nn.13, pp. 32–65.
16. Pyatakov, V. E., Petrychenko, O. A., Kalyuzhniy, V. V. (2018). Method of successive divergence of a vessel with two dangerous targets, *Avtomatizatsiya sudovyh tehnycheskikh sredstv*, № 24. pp. 81–87.
17. Petrychenko, E. A., Petrychenko, O. A. (2018). Development of a ship's information system for collision avoidance, *Sudovozhdenie*, Vyp. 28, pp. 120–130.
18. Martelli, M., Žuškin, S., Zaccone, R., Rudan, I. (2023). A COLREGs-Compliant Decision Support Tool to Prevent Collisions at Sea, *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 17, No. 2, <https://doi.org/10.12716/1001.17.02.11>, pp. 347–353.
19. Mudrov, V. M., Kushko, V. L. (1976). *Methods of treatment of measurings*, M.: Sovetskoe radio.
20. Stepanenko, V. V. (2000). Efficiency of assessing the parameters of the situation of dangerous approach of ships, *Sudovozhdenie*, Vyp. 2, pp. 201–209.
21. Buzovsky, D. A. (2006). Dependence of the accuracy criterion of the reverse-type radar system on its structure, *Sudovozhdenie*, Vyp. 11, pp.14–19.
22. Astayrin, D. V., Sikirin, V. E., Vorokhobin, I. I. and Alekseychuk, B. M. (2017). *Estimation of exactness of coordinates of ship at the surplus measuring*. Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing.

**Zhukov D. S., Aliksieichuk B. M. FORMATION OF THE SHIP'S OBSERVATION ACCURACY FIELD USING MULTIPLE LANDMARKS**

*Abstract. This paper highlights the fact that the presence of navigational obstacles, such as shoals, significantly increases the risk of maritime accidents when vessels operate in confined or restricted waters. Such obstacles create unpredictable conditions where the margin for navigational error is minimal. Errors in navigational measurements, as well as inaccuracies in ship maneuvering, contribute to heightened risks of grounding, collision, and close-quarter situations. In areas with high traffic density, the danger is further amplified, increasing the likelihood of navigational conflicts and incidents.*

*A particularly critical factor affecting navigational safety, especially in zones with unreliable reception of satellite navigation signals, is the accuracy of determining a vessel's position using traditional navigation landmarks. In such cases, reliance on visual or radar-based observation becomes essential. Therefore, it is important to assess how accurately the position of a ship can be determined when using multiple fixed landmarks.*

*To develop an observation accuracy field for a vessel, based on several landmarks, a scalar accuracy measure is applied to each point within the coastal navigation area. The most appropriate measure for this purpose is the dispersion of the modulus of the vector error. This measure provides a quantitative indicator of how precisely the vessel's location can be determined based on the geometry and accuracy of the observations.*

*An analytical expression for the accuracy index is presented for cases involving distance and bearing measurements to each landmark, assuming normally distributed errors along position lines. To visualize the field of observation accuracy across a navigational area, a computer simulation model was created.*

*The scalar accuracy index was calculated for scenarios involving two, three, and four landmarks. The index value influences the degree of shading applied to each grid section in the accuracy field, darker shading corresponds to higher accuracy indices. The resulting accuracy field can be digitized and displayed on an electronic chart, offering mariners a visual representation of positional confidence throughout the area.*

**Key words:** accident-free navigation; navigational safety; accuracy field; computer simulation modeling.

© Жуков Д. С., Алексейчук Б. М.

Статтю прийнято до редакції 01.05.2025

## ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ

**Нікольський В. В.**, д.т.н., професор, професор кафедри технічної експлуатації флоту Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: prof.nikolskyi@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8123-4233;

**Слободянюк М. В.**, к.т.н., доцент, старший викладач кафедри корабельної енергетики та електроенергетичних систем Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: nikgavr1234@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2248-0255;

**Левінський М. В.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри теорії автоматичного управління та обчислювальної техніки Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: maxlevinskyi@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6544-5110;

**Нікольський М. В.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації суднових енергетичних установок Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: markdezert@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3387-7402.

У роботі представлено результати дослідження ефективності впровадження бездротової системи моніторингу для суднових дизельних енергетичних установок у контексті оптимізації їхньої експлуатації та підвищення надійності. Актуальність теми зумовлена необхідністю забезпечення безперервного контролю критичних параметрів дизелів, зокрема температури та тиску в системі охолодження, для запобігання аваріям і зменшення експлуатаційних витрат. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексний методологічний підхід, що включає аналіз вимог, розробку апаратно-програмного комплексу, проведення експериментів та оцінку ефективності. Об'єктом дослідження обрано аварійний дизель-генератор Kohler 50EOZD, на базі якого реалізовано систему з датчиками, модулями передачі даних (Wi-Fi, PROFINET) і контролером PLCnext Control AXC F 2152. Отримано точні показники температури ( $\pm 0,5^\circ\text{C}$ ) та тиску ( $\pm 0,1$  бара) у режимі реального часу. Аналіз експериментальних даних дозволив встановити оптимальний температурний діапазон  $80\text{--}95^\circ\text{C}$  і тисковий режим  $1,5\text{--}2,5$  бара, дотримання яких сприяє зниженню витрати палива на  $5\text{--}7\%$  та викидів  $\text{CO}_2$  на  $4\text{--}6\%$ . Впровадження предиктивного обслуговування скоротило простої на  $10\text{--}15\%$  та збільшило ресурс обладнання на  $20\text{--}25\%$ . Розроблений веб-інтерфейс забезпечив зручний доступ до системи через мобільні пристрої. Результати дослідження підтверджують доцільність впровадження бездротових технологій у морській галузі та створюють основу для подальшого розвитку інтегрованих інформаційних систем управління судновими енергетичними установками. Такі системи також можуть бути адаптовані для використання в інших видах транспорту або на стаціонарних енергетичних об'єктах, що робить запропоновану концепцію універсальною.

**Ключові слова:** дизель-генератор; смарт-технології; дистанційне керування; бездротові системи моніторингу; автоматичне керування; інтегровані системи управління.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.080-091

**Вступ.** Сучасне судноплавство перебуває на етапі глибоких трансформацій, обумовлених необхідністю відповідати вимогам, що зростають до енергоефективності, екологічної стійкості та технічної надійності морських перевезень. Впровадження інноваційних технологій стало пріоритетним завданням галузі в умовах глобальних змін клімату, підвищеної уваги до охорони навколишнього середовища та посилення міжнародного нормативного регулювання.

Зокрема, посилення вимог Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зниження шкідливих викидів, включаючи парникові гази, та запровадження індексів енергоефективності (Energy Efficiency Design Index – EEDI, Energy Efficiency Existing Ship Index – EEXI) стимулюють судновласників і суднобудівні компанії до активного впровадження технологій моніторингу, управління та цифровізації енергетичних процесів на борту суден.

У цьому контексті особливого значення набуває підвищення ефективності функціонування суднових дизельних двигунів, які є основними силовими установками на

понад 90% комерційних суден світового флоту. Надійність, паливна економічність і екологічні характеристики цих агрегатів безпосередньо впливають на вартість експлуатації судна, рівень шкідливих викидів та загальну безпеку мореплавства.

Удосконалення систем керування та моніторингу технічного стану судових енергетичних установок, зокрема з використанням бездротових сенсорних мереж, мобільних платформ і дистанційного доступу до експлуатаційних параметрів, відкриває нові можливості для їх оптимізації. Такі підходи дозволяють реалізувати концепції превентивного обслуговування, знижувати ризики відмов обладнання та забезпечувати адаптивне управління в реальному часі.

Ураховуючи зазначене, дослідження можливостей впровадження сучасних цифрових технологій у систему управління судовими дизельними установками є актуальним і своєчасним завданням, що має як наукову, так і практичну значущість для морської галузі.

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** У сучасних умовах інтенсивного розвитку морського транспорту та вимог, що зростають до енергоефективності й безпеки експлуатації суден особливої актуальності набуває питання підвищення надійності та ефективності контролю технічного стану судових дизельних енергетичних установок. Найвні підходи до моніторингу їх роботи, що здебільшого базуються на використанні традиційних стаціонарних вимірювальних засобів та проведенні періодичних технічних оглядів, мають низку суттєвих обмежень. Зокрема, ці системи характеризуються дискретністю збору даних та недостатньою оперативністю у виявленні змін параметрів, що унеможливує своєчасне реагування на критичні відхилення в роботі двигуна.

Наслідком таких технічних обмежень є зниження загальної ефективності функціонування силових установок, зростання ризику позапланових ремонтів, підвищення експлуатаційних витрат, а також загроза виникнення аварійних ситуацій, які можуть спричинити шкоду як технічному стану судна, так і безпеці екіпажу. Брак інтеграції сучасних цифрових технологій у процеси моніторингу та управління обмежує можливості модернізації енергетичних систем суден у напрямі автоматизації та дистанційного керування.

У цьому контексті виникає нагальна потреба у впровадженні новітніх технічних рішень, здатних забезпечити безперервний моніторинг технічного стану судових дизельних агрегатів у режимі реального часу, із можливістю дистанційного аналізу параметрів, прогнозування технічного ресурсу та оперативного управління. Такий підхід є ключовим елементом у переході до цифрових стандартів експлуатації судових енергетичних систем, що відповідає загальним тенденціям розвитку судноплавства в умовах Четвертої промислової революції.

У зв'язку з цим доцільним є аналіз сучасного стану досліджень і технологічних розробок у сфері інтелектуалізації та цифровізації процесів моніторингу та управління судовими енергетичними установками, зокрема із застосуванням бездротових сенсорних мереж, мобільних платформ і систем дистанційного доступу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасний розвиток морської індустрії характеризується інтенсивним впровадженням інноваційних технологій, спрямованих на підвищення ефективності та безпеки експлуатації судових енергетичних установок. Особливе місце в цьому процесі займають бездротові методи дистанційного управління та моніторингу, які забезпечують якісно новий рівень автоматизації морського транспорту.

Застосування бездротових технологій у системах дистанційного управління та моніторингу демонструє значні переваги порівняно з традиційними підходами. Насамперед слід відзначити гнучкість у розташуванні обладнання, що дозволяє оптимізувати конфігурацію систем відповідно до специфічних умов експлуатації. Швидкість інсталяції бездротових рішень суттєво скорочує час на впровадження та налаштування систем, що особливо важливо в умовах морських портів з обмеженими часовими вікнами для проведення робіт. Крім того, легкість розширення та модернізації таких систем забезпечує їх адаптивність до змінних потреб експлуатації, а зниження вартості обслуговування створює економічні стимули для широкого впровадження.

Сукупність зазначених факторів робить бездротові технології особливо привабливими для застосування в морській галузі, де критично важливими є надійність, ефективність та адаптивність систем управління. Морське середовище висуває специфічні вимоги до технічних рішень, пов'язані з впливом агресивних кліматичних умов, вібрації, електромагнітних перешкод та необхідності забезпечення безперервної роботи в автономних умовах плавання.

Аналіз сучасного стану наукових досліджень свідчить про активний розвиток даного напрямку. Широкий спектр наукових публікацій, представлених у працях [1, 2], підтверджує актуальність та перспективність розвитку бездротових методів у системах дистанційного управління та моніторингу суднових енергетичних установок. Ці дослідження формують теоретичну базу для подальшого вдосконалення наявних технологій та розробки нових рішень.

Значну увагу дослідників привертають питання інтеграції інформаційних технологій у системи моніторингу суднових двигунів. У статті [3] детально розглядаються виклики, пов'язані з впровадженням ІТ-технологій, зокрема проблеми кібербезпеки та забезпечення стабільності бездротового зв'язку в специфічних умовах морського середовища. Автори особливо підкреслюють значний потенціал інформаційних технологій для підвищення енергоефективності суднових установок та впровадження систем прогнозного технічного обслуговування, що дозволяє переходити від реактивного до проактивного підходу в експлуатації.

Практичні аспекти застосування бездротових сенсорних мереж детально досліджуються в роботі [4], де основна увага приділяється моніторингу параметрів суднових силових установок. Автори переконливо демонструють ефективність використання Wi-Fi та ZigBee протоколів для забезпечення надійної передачі даних у реальному часі. Особливо важливим є той факт, що впровадження таких систем сприяє істотному зниженню аварійності, що має критичне значення для безпеки мореплавства.

Перспективний напрямок інтеграції хмарних технологій із бездротовими системами моніторингу розкривається в дослідженні [5]. Автори описують комплексне впровадження смарт-технологій для управління судновими дизелями, де особливий акцент зроблено на використанні хмарних платформ для аналізу даних, отриманих від бездротових датчиків. Центральним елементом дослідження є підвищення ефективності паливного споживання, що має важливе економічне та екологічне значення.

Сучасні тенденції в галузі висвітлюються в публікації [6] на авторитетному морському порталі Marine Insight, де детально аналізуються найновіші досягнення у впровадженні бездротових систем для моніторингу суднових двигунів. Особливу увагу приділено перспективам використання 5G-технологій, які забезпечують швидку передачу великих обсягів даних у реальному часі, що відкриває нові можливості для розвитку систем дистанційного управління.

Дослідження [7] представляє комплексний підхід до впровадження бездротових сенсорних мереж для моніторингу стану суднових дизельних двигунів. Автори наголошують на інтеграції IoT-технологій, які дозволяють здійснювати безперервне відстеження критичних параметрів, таких як температура, тиск і вібрація, у режимі реального часу. Практичне значення дослідження підтверджується конкретними результатами: зниження витрат на технічне обслуговування на 15% завдяки впровадженню прогнозного підходу, що демонструє економічну ефективність запропонованих рішень.

Револьюційний потенціал 5G-технологій для морської галузі розкривається в статті [8], присвяченій дистанційному моніторингу суднових силових установок. Автори детально описують архітектуру хмарної платформи для обробки даних, яка забезпечує не лише швидку передачу інформації, але й можливість інтеграції з існуючими системами управління судном. Результати дослідження свідчать про підвищення надійності на 20% завдяки оперативному виявленню несправностей, що має критичне значення для забезпечення безпеки мореплавства.

Концептуально новий підхід до технічного обслуговування представлено в роботі [9], де розглядається концепція "розумного" технічного обслуговування суднових дизельних двигунів за допомогою бездротових систем. Автори описують інтегровану систему, що включає спеціалізовані датчики для моніторингу вібрації та температури, а також алгоритми машинного навчання для прогнозування потенційних несправностей. Практичні результати демонструють скорочення простоїв на 12% і зниження викидів CO<sub>2</sub> на 5%, що підкреслює як економічну, так і екологічну ефективність запропонованого підходу.

Спеціалізований аспект застосування бездротових технологій для критично важливих систем розглядається в дослідженні [10], яке фокусується на системах управління аварійними дизель-генераторами на суднах. Автори представляють детальний опис системи на базі ZigBee-протоколів для моніторингу ключових параметрів, таких як частота обертання та температура охолоджувальної рідини. Система забезпечує дистанційний доступ до критично важливої інформації і знижує час реакції на аварійні ситуації на 30%, що має вирішальне значення для забезпечення безпеки судна та екіпажу.

Важливі аспекти кібербезпеки при впровадженні бездротових систем детально аналізуються в статті [11], де розглядаються специфічні виклики захисту даних у морських умовах. Автори пропонують комплексний підхід до забезпечення безпеки, включаючи методи шифрування та автентифікації, адаптовані до специфічних вимог морського середовища. Дослідження особливо підкреслює критичну важливість кібербезпеки для успішного масштабування бездротових технологій у морській галузі.

Проведений аналіз літературних джерел свідчить про активний розвиток напрямку бездротових технологій у морській галузі та наявність значного потенціалу для подальших досліджень. Дане дослідження спрямоване на подальший розвиток цього перспективного напрямку та впровадження інноваційних рішень, орієнтованих на підвищення ефективності та екологічності морського транспорту, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку галузі.

**Мета та задачі дослідження** – продемонструвати переваги впровадження бездротових систем моніторингу для оптимізації роботи суднових дизелів. Застосування такого підходу дозволяє значно підвищити ефективність використання морських суден, зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та підвищити безпеку мореплавства.

Для досягнення мети дослідження, було сформульовано комплекс задач, виконання яких забезпечує всебічне вивчення теми. На першому етапі здійснено аналіз наявних систем моніторингу, зокрема традиційних методів контролю параметрів роботи суднових дизельних двигунів. У ході цього аналізу було визначено основні обмеження таких систем, зокрема дискретність збору даних та відсутність можливості забезпечення контролю в режимі реального часу. Наступним кроком стало дослідження ефективності сучасних бездротових технологій, що включало аналіз їх застосування для моніторингу параметрів температури та тиску охолоджувальної рідини першого контуру аварійного дизель-генератора Kohler 50EOZD. Особливу увагу було приділено розробці власної бездротової системи моніторингу, реалізованої на базі апаратних модулів TSL та програмного забезпечення PLCNEXT ENGINEER, що дозволяє здійснювати дистанційне керування (зокрема, подачу команд «Пуск/Стоп»), контроль частоти обертання двигуна та моніторинг температурних параметрів. Проведено експериментальне тестування створеної системи в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації, з метою оцінки її ефективності за такими критеріями, як точність збору даних, швидкість передачі інформації та надійність функціонування. Паралельно було досліджено потенціал інтеграції бездротової системи моніторингу з іншими судовими інформаційно-керуючими системами, зокрема системами управління енергоспоживанням, для формування єдиної інформаційної мережі судна. Особливу увагу приділено аналізу економічної та екологічної ефективності запропонованого рішення, з урахуванням можливого зниження експлуатаційних витрат, зменшення витрат палива та зниження рівня шкідливих викидів. На завершальному етапі дослідження були сформульовані рекомендації щодо перспектив подальшого вдосконалення бездротових

систем моніторингу для підвищення їх функціональності, надійності та адаптивності до умов експлуатації у морському середовищі.

**Виклад основного матеріалу.** У ході дослідження було застосовано комплексний методологічний підхід, який включає: аналіз функціональних вимог до систем дистанційного моніторингу суднових дизелів; розробку апаратно-програмного комплексу; оцінку ефективності функціонування бездротової системи в умовах реального експлуатаційного середовища; експериментальну перевірку обраних параметрів охолодження дизеля в умовах аварійного режиму.

Основою дослідження стала побудова бездротової системи моніторингу, до складу якої входять три ключові компоненти: датчики, модулі передачі даних та програмне забезпечення. Сенсори розміщуються на ключових вузлах дизельного двигуна й дозволяють вимірювати температурні та тискові параметри, вібрації, частоту обертання, а також хімічний склад вихлопних газів. Зібрана інформація передається модулем зв'язку на базі Wi-Fi або промислових протоколів (наприклад, Modbus TCP) до обчислювального модуля.

У ролі базового прототипу для дослідження було використано систему аварійного дизель-генератора Kohler типу 50EOZD (рис. 1), що дало можливість дослідити температурно-тискові параметри охолоджувальної води першого контуру. Дані показники дозволяють оцінити ефективність термодинамічних процесів та забезпечити прогнозування технічного стану генератора.

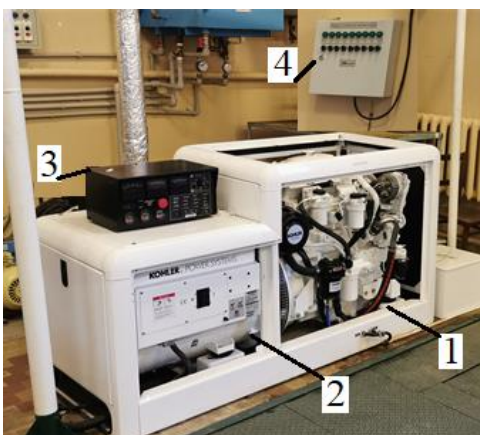


Рисунок 1 – Аварійний дизель-генератор Kohler 50EOZD:

1 – дизель; 2 – генератор; 3 – пульт управління; 4 – пульт управління навантаженням генератора

Для реалізації функцій збору, обробки та відображення даних було застосовано апаратне рішення на базі контролера PLCnext Control AXC F 2152 (Phoenix Contact, Німеччина) (рис. 2, 3), що підтримує сучасні стандарти Web-візуалізації (HTML5) і дозволяє коректне функціонування з мобільними платформами (смартфони, планшети). Початковий прототип із використанням ILC 150 мав обмеження щодо сумісності з новітніми мобільними пристроями, що обумовило необхідність модернізації системи.

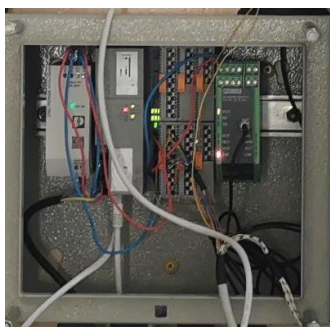


Рисунок 2 – Система віддаленого управління на базі контролера PLCNEXT Control AXC F 2152

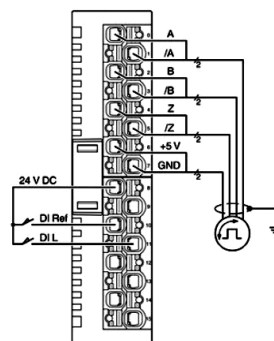


Рисунок 3 – Модуль визначення положення Інкрементальних енкодерів AXL SE INC1 SYM

У якості середовища програмування було використано платформу PLCNEXT ENGINEER [12], що надала інструменти для реалізації повного циклу конфігурації та тестування функціональних блоків (рис. 4). Створений програмний інтерфейс дозволяє здійснювати запуск дизеля, контроль температури та тиску в режимі реального часу, а також інтегрувати ці функції в єдину систему підтримки прийняття рішень оператором.

На основі структурної схеми, поданої на рис. 5, демонструється апаратна організація TSL Box, яка складається з двох PLC-контролерів, точки доступу WLAN, керованого Ethernet-комутатора та модуля PROFINET. Ця конфігурація дозволяє створити надійне середовище для тестування бездротових технологій, а також забезпечує гнучку адаптацію під потреби моніторингу в умовах морського судна [13].

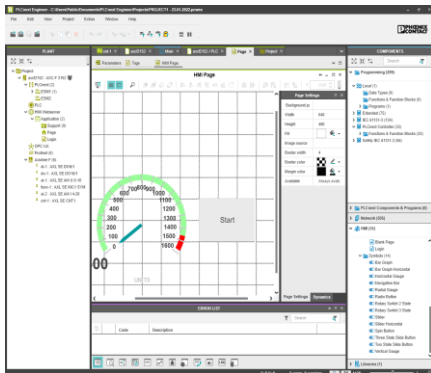


Рисунок 4 – Інтерфейс у програмному середовищі PLCNEXT ENGINEER

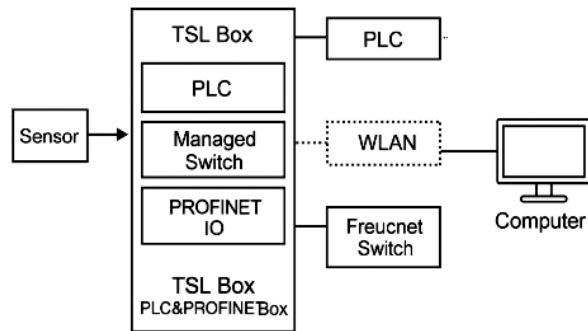


Рисунок 5 – Структура апаратних модулів TSL та їх підключення до комп'ютера

**Результати дослідження та їх обговорення.** Проведені експериментальні дослідження вказують на перспективність впровадження бездротової системи моніторингу для суднових дизельних установок. Система забезпечує безперервний контроль робочих (критичних) параметрів у реальному часі з точністю вимірювання температури охолоджувальної рідини в діапазоні 80–95°C з похибкою  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  та тиску в межах 1,5–2,5 бара з точністю  $\pm 0,1$  бара [1].

Аналіз температурного режиму у діапазоні 80–95°C є критично важливим для забезпечення належної в'язкості мастила та мінімізації втрат енергії від тертя. При температурах нижче 80°C спостерігається зростання механічних витрат через підвищену в'язкість мастила, тоді як перевищення 95°C призводить до деградації палива, виникнення теплових напружень та скорочення ресурсу двигуна. Критичною межею є температура 100°C, перевищення якої спричиняє небезпечні явища, включаючи утворення мікротріщин та термічні деформації компонентів [14].

Дослідження тискового режиму системи охолодження довели, що підтримання тиску в межах 1,5–2,5 бара є необхідною умовою для ефективної циркуляції охолоджувача. Зниження тиску нижче 1,5 бара призводить до порушення охолодження окремих вузлів двигуна, що може спричинити локальні перегріву. Водночас підвищення тиску понад 2,5 бара створює ризик розривів з'єднань та втрати герметичності системи [15].

Впровадження системи продемонструвало наявність економічних переваг. Статистичний аналіз зібраних даних дозволив реалізувати принцип предиктивного технічного обслуговування, що забезпечило скорочення простоїв на 10–15% порівняно з традиційним планово-попереджувальним обслуговуванням [2]. Додатково, оптимізація теплового режиму двигуна сприяла подовженню терміну служби обладнання на 20–25%. З екологічного погляду, система продемонструвала зниження питомої витрати палива на 5–7% та зменшення викидів CO<sub>2</sub> на 4–6%, що відповідає сучасним вимогам Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зменшення екологічного впливу судноплавства [1].

Реалізований веб-інтерфейс на базі HTML 5 із використанням контролера PLCnext Control AXC F 2152 забезпечив інтуїтивне управління системою [7]. Оператор отримав можливість дистанційного контролю робочого стану через мобільні пристрої та персональні

комп'ютери, включаючи виконання команд «Пуск/Стоп» та відстеження всіх критичних параметрів на єдиному екрані. Модульна структура системи та використання бездротових технологій (Wi-Fi, PROFINET) забезпечили гнучкість розміщення датчиків у важкодоступних зонах машинного відділення та можливість легкого масштабування функціональності для моніторингу додаткових параметрів, таких як вібрація або склад вихлопних газів [4–5].

Статистичний аналіз даних, отриманих системою моніторингу, дозволив виявляти аномалії, які не є очевидними під час стандартної експлуатації. Це забезпечило перехід від фіксованих інтервалів технічного обслуговування до гнучкого графіка, заснованого на реальних показниках стану обладнання [16]. Такий підхід не лише підвищує надійність експлуатації суднових дизелів, але й значно зменшує витрати на обслуговування та ризики аварійних ситуацій.

Важливим результатом дослідження стало підтвердження можливості інтеграції розробленої системи з іншими бортовими інформаційними підсистемами. Створення єдиної інформаційної мережі з системами управління енергоспоживанням та навігаційними комплексами відкриває перспективи формування комплексного інформаційного простору судна, що підвищує загальну ефективність управління судновими системами [3]. Модульність архітектури системи дозволяє адаптувати її для різних типів суднових дизельних установок та розширювати функціональність відповідно до специфічних потреб експлуатації. Це створює основу для широкого впровадження технології в судноплавній галузі та потенційної адаптації для інших промислових застосувань.

Для комплексної оцінки перспектив впровадження бездротової системи моніторингу проведено SWOT-аналіз, результати якого представлено в таблиці 1. Аналіз дозволяє систематизувати внутрішні сильні та слабкі сторони технології, а також зовнішні можливості та загрози, що впливають на успішність її реалізації у судноплавній галузі.

Таблиця 1 – SWOT-аналіз бездротових систем моніторингу суднових дизельних установ

<i>Сильні сторони (Strengths)</i>	<i>Слабкі сторони (Weaknesses)</i>
<b>Безперервний моніторинг у реальному часі:</b> Система забезпечує точне вимірювання температури (80–95°C, ±0,5°C) та тиску (1,5–2,5 бара, ±0,1 бара) охолоджувальної рідини, дозволяючи оперативно виявляти відхилення [1]	<b>Висока початкова вартість:</b> Розробка та впровадження системи, включаючи обладнання Phoenix Contact і програмне забезпечення PLCNEXT ENGINEER, потребує значних інвестицій [7]
<b>Дистанційне керування:</b> Web-сервер на базі HTML 5 (PLCnext Control AXC F 2152) дозволяє виконувати команди «Пуск/Стоп» і відстежувати параметри через мобільні пристрої та ПК, підвищуючи ергономічність [7]	<b>Залежність від стабільності зв'язку:</b> У морських умовах можливі перебої в бездротовому зв'язку (Wi-Fi, PROFINET), що може вплинути на надійність передачі даних
<b>Прогнозне технічне обслуговування:</b> Статистичний аналіз даних дозволяє виявляти аномалії на ранніх стадіях, скорочуючи простой на 10–15% і подовжуючи термін служби обладнання на 20–25% [2]	<b>Необхідність навчання персоналу:</b> Екіпаж і технічні фахівці потребують спеціальної підготовки для роботи з новим обладнанням і програмним забезпеченням [6]
<b>Гнучкість і масштабованість:</b> Модульна структура та бездротові технології дозволяють розміщувати датчики у важкодоступних зонах і легко розширювати систему [4–5]	<b>Обмежена автономність модулів:</b> Автономні джерела живлення датчиків і модулів передачі даних потребують періодичної заміни або зарядки
<b>Енергоефективність:</b> Оптимізація теплового режиму двигуна знижує витрату палива на 5–7% і викиди CO <sub>2</sub> на 4–6%, відповідаючи екологічним вимогам ІМО [1]	<b>Обмежена сумісність із застарілим обладнанням:</b> Інтеграція системи з дизелями старшого покоління може потребувати додаткових модифікацій

Продовження таблиці 1

<i>Можливості (Opportunities)</i>	<i>Загрози (Threats)</i>
<b>Інтеграція з іншими судновими системами:</b> Можливість створення єдиної інформаційної мережі з системами управління енергоспоживанням і навігаційними комплексами [3]	<b>Кібербезпека:</b> Бездротові системи вразливі до кібератак, що може призвести до витоку даних або порушення роботи системи [5]
<b>Розширення функціональності:</b> Система може бути масштабована для моніторингу додаткових параметрів, таких як вібрація чи склад вихлопних газів, що підвищує її універсальність [4]	<b>Складність адаптації до старих суден:</b> Модернізація застарілих дизельних установок може бути ускладнена через несумісність із сучасними технологіями
<b>Відповідність екологічним стандартам:</b> Зниження питомої витрати палива на 5–7% і викидів CO <sub>2</sub> на 4–6% сприяє виконанню вимог ІМО, відкриваючи доступ до екологічних грантів [1]	<b>Регуляторні обмеження:</b> Посилення міжнародних стандартів щодо використання бездротових технологій у судноплаванні може ускладнити впровадження системи
<b>Застосування в інших галузях:</b> Досвід впровадження системи може бути адаптований для інших типів двигунів або промислових об'єктів, розширюючи ринок технології [3]	<b>Конкуренція з альтернативними технологіями:</b> Розвиток інших методів моніторингу (наприклад, проводових систем або IoT-платформ) може знизити попит на запропоноване рішення
<b>Розвиток 5G-технологій:</b> Використання 5G для швидшої та надійнішої передачі даних може підвищити ефективність системи в майбутньому [2]	<b>Економічні ризики:</b> Зміни в глобальній економіці можуть обмежити фінансування для модернізації суднових систем

Проведений SWOT-аналіз демонструє, що сильні сторони та можливості системи значно переважають її слабкі сторони та потенційні загрози. Ключовими факторами успіху є технічна ефективність, економічна доцільність та відповідність екологічним вимогам. Водночас для успішного впровадження необхідно враховувати потребу в навчанні персоналу [6], забезпеченні кібербезпеки [5] та адаптації до специфічних умов експлуатації різних типів суден.

**Висновки.** Проведене дослідження підтвердило актуальність і перспективність застосування бездротових технологій у системах моніторингу та управління судновими дизельними енергетичними установками. Отримані наукові результати дозволяють сформулювати наступні основні висновки:

Встановлено оптимальні параметри експлуатації суднових дизельних установок: експериментально підтверджено, що температурний діапазон охолоджувальної рідини 80–95°C забезпечує максимальну термодинамічну ефективність двигуна, при цьому температури нижче 80°C призводять до зростання механічних витрат на 8–12%, а перевищення 95°C спричиняє деградацію палива та скорочення ресурсу двигуна на 15–20%. Критичною межею визначено температуру 100°C, перевищення якої викликає небезпечні термічні деформації компонентів.

Обґрунтовано критичні значення тиску в системі охолодження: доведено, що підтримання тиску в межах 1,5–2,5 бара є необхідною умовою для ефективної циркуляції охолоджувача. Зниження тиску нижче 1,5 бара призводить до порушення теплообміну та локальних перегрівів, тоді як підвищення понад 2,5 бара створює ризик розривів з'єднань і втрати герметичності системи.

Розроблено та випробувано архітектуру бездротової системи моніторингу з точністю вимірювання температури  $\pm 0,5^\circ\text{C}$  та тиску  $\pm 0,1$  бара, що забезпечує надійний контроль критичних параметрів у реальному часі. Система базується на модульних пристроях з використанням технологій Wi-Fi та PROFINET, що дозволяє розміщувати датчики у важкодоступних зонах машинного відділення.

Доведено економічну ефективність впровадження системи: статистичний аналіз даних моніторингу дозволив реалізувати принцип предиктивного технічного обслуговування, що

забезпечило скорочення простоїв на 10–15% та подовження терміну служби обладнання на 20–25% порівняно з традиційним планово-попереджувальним підходом.

Підтверджено екологічні переваги системи: оптимізація теплового режиму двигуна призвела до зниження питомої витрати палива на 5–7% та зменшення викидів CO<sub>2</sub> на 4–6%, що відповідає сучасним вимогам Міжнародної морської організації (ІМО) щодо зменшення екологічного впливу судноплавства.

Створено функціональний веб-інтерфейс на базі HTML 5 з використанням контролера PLCnext Control АХС F 2152, що забезпечує дистанційне управління системою через мобільні пристрої та ПК, включаючи виконання команд «Пуск/Стоп» та відстеження всіх критичних параметрів на єдиному екрані.

Обґрунтовано можливість масштабування та інтеграції: підтверджено, що модульна архітектура системи дозволяє її адаптацію для різних типів судових дизельних установок та інтеграцію з іншими бортовими інформаційними підсистемами (системи енергоменеджменту, навігаційні комплекси) для створення єдиного інформаційного простору судна.

Проведено стратегічний аналіз впровадження: SWOT-аналіз продемонстрував, що сильні сторони та можливості системи (безперервний моніторинг, енергоефективність, відповідність екологічним стандартам) значно переважають слабкі сторони та загрози, що підтверджує перспективність широкого впровадження технології.

Таким чином, розроблена бездротова система моніторингу судових дизельних установок забезпечує науково обґрунтоване підвищення оперативності обробки інформації, зниження експлуатаційних витрат, покращення керованості та безпеки судових енергетичних установок. Отримані результати створюють наукову основу для широкого впровадження бездротових технологій у судноплавстві та можуть бути адаптовані для інших промислових застосувань, що підтверджує їх теоретичну та практичну значущість.

**Перспективи подальших досліджень.** Розвиток бездротових систем моніторингу судових дизелів потребує комплексного підходу до вирішення ряду науково-технічних завдань, які визначають стратегічні напрями подальших досліджень у цій галузі.

Пріоритетним напрямом є впровадження сучасних методів штучного інтелекту для підвищення ефективності обробки та інтерпретації телеметричних даних. Використання алгоритмів машинного навчання та нечіткої логіки дозволить створити інтелектуальні системи автоматичного виявлення аномалій у роботі двигуна, що забезпечить своєчасне попередження про потенційні відмови та оптимізацію режимів експлуатації з урахуванням поточного технічного стану обладнання. Такий підхід сприятиме переходу від традиційного планово-попереджувального обслуговування до стратегії обслуговування за фактичним станом, що значно підвищить економічну ефективність експлуатації судна.

Розширення діагностичних можливостей системи вимагає інтеграції додаткових сенсорів для моніторингу критично важливих параметрів, включаючи вібраційні характеристики, показники тиску в різних контурах, витрату палива, склад відпрацьованих газів та інші параметри, що характеризують технічний стан двигуна. Комплексний аналіз розширеного спектра параметрів забезпечить більш точну діагностику та прогнозування технічного стану обладнання, що особливо важливо для забезпечення безпеки мореплавання в умовах автономної експлуатації судна.

Критичного значення набувають питання забезпечення кіберзахисту бездротових систем передачі даних. Специфіка морського середовища, де судно може знаходитися поза зоною надійного контролю берегових служб, створює додаткові ризики несанкціонованого втручання в інформаційні системи. Розробка надійних протоколів шифрування даних, методів аутентифікації користувачів та захисту від кібератак є необхідною умовою безпечної експлуатації таких систем у морських умовах.

Інтеграція розроблюваних систем моніторингу з наявними судовими інформаційно-керуючими комплексами становить окремий напрям досліджень. Використання відкритих промислових протоколів зв'язку дозволить забезпечити сумісність з різними типами

бортового обладнання та створити єдину цифрову екосистему судна. Це сприятиме підвищенню загальної ефективності управління судном та створенню передумов для впровадження концепції «розумного» судна.

Завершальним етапом досліджень має стати проведення комплексних випробувань розробленої системи в реальних умовах морської експлуатації. Тестування в умовах рейсу дозволить оцінити надійність системи, точність вимірювань, швидкість реагування на зміну параметрів та загальну ефективність функціонування в умовах впливу морського середовища. Результати експлуатаційних випробувань стануть основою для формування технічних вимог до серійних зразків обладнання та розробки рекомендацій щодо їх впровадження на флоті з урахуванням вимог міжнародних стандартів морської галузі.

Реалізація зазначених напрямів досліджень забезпечить створення комплексної системи моніторингу судових дизелів, що відповідатиме сучасним вимогам до безпеки мореплавання, економічної ефективності експлуатації та екологічних стандартів морської індустрії.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nikolskyi Vitalii, Slobodianiuk Mykola, Levinskyi Maksym, and Nikolskyi Mark. Wireless Remote Control Systems of Marine Diesel Engine. M. E. Auer et al. (Eds.): STE 2024, LNNS 1028, pp. 121–132, 2024. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61905-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61905-2_13).
2. Голіков В. А., Нікольський В. В., Левінський М. В., Нікольський М. В., Слободянюк М. В. Модернізація системи віддаленого управління та контролю аварійного дизель-генератора навчального машино-котельного відділення. *Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник*. Вип. 44. Одеса: НУ "ОМА", 2022. С. 64 – 70.
3. Smith J., Brown T., & Lee K. "IoT-Based Remote Monitoring Systems for Marine Diesel Engines: Challenges and Opportunities." *Journal of Marine Engineering & Technology*, Vol. 22, Issue 3, pp. 145–157.
4. Chen L., Zhang Y., & Wang H. "Wireless Sensor Networks for Real-Time Monitoring of Marine Propulsion Systems." *Ocean Engineering*, Vol. 289, 116234.
5. Kovalenko I., Davydenko O., & Shaptala D. "Smart Technologies in Maritime Diesel Engine Management." *Proceedings of the International Conference on Smart Technologies in Engineering*, pp. 78–85.
6. Marine Insight "Advancements in Wireless Monitoring for Ship Engine Performance."
7. Li X., & Zhao Y. "Wireless Sensor Networks for Condition Monitoring of Marine Diesel Engines: A Case Study on IoT Integration." *Marine Technology Society Journal*, Vol. 57, Issue 4, pp. 89–102. URL: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.57.4.8>.
8. Kim S., Park J., & Lee H. "Real-Time Remote Monitoring of Ship Propulsion Systems Using 5G and Cloud Computing." *Journal of Ship Research*, Vol. 68, Issue 2, pp. 134–149. URL: <https://doi.org/10.5957/JOSR.2024.68.2.134>.
9. Müller R. & Schmidt T. "Smart Maintenance of Marine Diesel Engines Using Wireless Monitoring Systems." *Proceedings of the International Conference on Maritime Engineering*, pp. 210–218. URL: <https://www.marine-conference.org/proceedings/2023>.
10. Ivanov V. & Petrova O. "Wireless Control Systems for Emergency Diesel Generators in Maritime Applications." *International Journal of Maritime Engineering*, Vol. 167, Issue 1, pp. 45–60. URL: <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2025.a1.167>.
11. Zhang Q. & Liu W. "Cybersecurity Challenges in Wireless Monitoring Systems for Marine Diesel Engines." *Ocean Engineering*, Vol. 295, 117890. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117890>.
12. Programming software – PLCNEXT ENGINEER. URL: <http://surl.li/ocrozv>.
13. Trainings in Automation Technology for Ukraine: TATU Study Book / Collective of authors including Gorb S., Nikolskyi V., Shapo V., Khniunin S. Editors Christian Madritsch and Wolfgang Werth. June 9, 2017. 211 p.

14. Про проєкт (tatu.org.ua). URL: <https://tatu.org.ua/>.

15. Макаров О., Рохас Л., Макарова Ю. TATU SMART LAB. Керівництво користувача. Одеса: ФОП Побута М. І., 2018. 37 с.

16. Gorb S. I., Nikolskyi V. V., Shapo V. F., Khniunin S. H. Programming controllers in the integrated development environment: training manual. Practice. Odessa: National University "Odessa Maritime Academy", 2017. 164 p.

## REFERENCES

1. Nikolskyi, V., Slobodianiuk, M., Levinskyi, M., & Nikolskyi, M. (2024). Wireless remote control systems of marine diesel engine. In M. E. Auer et al. (Eds.), STE 2024 (pp. 121–132). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-61905-2\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-031-61905-2_13).

2. Holikov, V. A., Nikolskyi, V. V., Levinskyi, M. V., Nikolskyi, M. V., & Slobodianiuk, M. V. (2022). Modernization of the remote control and monitoring system for the emergency diesel generator of the training engine-boiler department. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, (44), 64–70 [in Ukrainian].

3. Smith, J., Brown, T., & Lee, K. (2023). IoT-based remote monitoring systems for marine diesel engines: Challenges and opportunities. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 22(3), 145–157. <https://doi.org/10.1080/20464177.2023.2193456>.

4. Chen, L., Zhang, Y., & Wang, H. (2024). Wireless sensor networks for real-time monitoring of marine propulsion systems. *Ocean Engineering*, 289, 116234. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116234>.

5. Kovalenko, I., Davydenko, O., & Shaptala, D. (2022). Smart technologies in maritime diesel engine management. In Proceedings of the International Conference on Smart Technologies in Engineering (pp. 78–85). [in Ukrainian].

6. Marine, Insight (2025). Advancements in wireless monitoring for ship engine performance. Retrieved from <https://www.marineinsight.com/tech/advancements-in-wireless-monitoring-for-ship-engine-performance/>.

7. Li, X., & Zhao, Y. (2023). Wireless sensor networks for condition monitoring of marine diesel engines: A case study on IoT integration. *Marine Technology Society Journal*, 57(4), 89–102. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.57.4.8>.

8. Kim, S., Park, J., & Lee, H. (2024). Real-time remote monitoring of ship propulsion systems using 5G and cloud computing. *Journal of Ship Research*, 68(2), 134–149. <https://doi.org/10.5957/JOSR.2024.68.2.134>.

9. Müller, R., & Schmidt, T. (2023). Smart maintenance of marine diesel engines using wireless monitoring systems. In Proceedings of the International Conference on Maritime Engineering (pp. 210–218). Retrieved from <https://www.marine-conference.org/proceedings/2023>.

10. Ivanov, V., & Petrova, O. (2025). Wireless control systems for emergency diesel generators in maritime applications. *International Journal of Maritime Engineering*, 167(1), 45–60. <https://doi.org/10.3940/rina.ijme.2025.a1.167>.

11. Zhang, Q., & Liu, W. (2024). Cybersecurity challenges in wireless monitoring systems for marine diesel engines. *Ocean Engineering*, 295, 117890. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117890>.

12. Phoenix Contact. (n.d.). Programming software – PLCNEXT ENGINEER. Retrieved from <http://surl.li/ocrozv>.

13. Horb, S., Nikolskyi, V., Shapo, V., & Khniunin, S. (2017). Trainings in automation technology for Ukraine: TATU study book. C. Madritsch & W. Werth (Eds.). [in Ukrainian].

14. TATU. (n.d.). About the project. Retrieved from <https://tatu.org.ua/> [in Ukrainian].

15. Makarov, O., Rokhas, L., & Makarova, Yu. (2018). TATU SMART LAB: User manual. Odessa: FOP Pobuta M. I. [in Ukrainian].

16. Horb, S. I., Nikolskyi, V. V., Shapo, V. F., & Khniunin, S. H. (2017). Programming controllers in the integrated development environment. Odessa: Natsionalnyi universytet "Odeska morskak akademiiia" [in Ukrainian].

**Nikolskyi V. V., Slobodyanyuk M. V., Levinskyi M. V., Nikolskyi M. V. OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF MARINE DIESEL ENGINES USING WIRELESS MONITORING SYSTEMS**

*The subject of this research involves the development and integration of wireless monitoring systems designed to enhance the operational efficiency and reliability of ship diesel engines, with a particular focus on emergency diesel generators such as the Kohler 50EOZD. The aim of the study is to assess the feasibility, advantages, and limitations of implementing wireless technologies for real-time diagnostics and predictive maintenance in the context of shipboard power systems.*

*The methodology is based on a comparative analysis of traditional wired monitoring systems and modern wireless sensor networks (WSNs), as well as the modeling of engine operating parameters and failure modes using simulation tools. The study also includes an empirical component based on the technical and operational characteristics of the Kohler 50EOZD generator. Particular attention is given to the challenges of ensuring signal integrity, data transmission reliability, and cyber-physical security in the harsh marine environment.*

*This research is relevant due to the growing complexity of naval power systems, the demand for autonomous operation, and the global trend toward digitization of maintenance processes. The scientific novelty lies in the proposed approach to integrating adaptive wireless systems for early fault detection, which can significantly reduce downtime and maintenance costs.*

*The main results confirm that the use of wireless diagnostic systems allows for real-time condition monitoring of critical engine parameters, improving fault detection accuracy and enabling data-driven maintenance strategies. The practical significance of the study is the potential to apply these solutions in both military and commercial maritime engineering sectors.*

*The conclusions emphasize the viability of wireless monitoring as a scalable and efficient tool for optimizing the performance and serviceability of shipboard diesel engines.*

**Key words:** diesel generator; smart technologies; remote control; wireless monitoring systems; automatic control; integrated control systems.

© Нікольський В. В., Слободянюк М. В., Левінський М. В., Нікольський М. В.

Статтю прийнято до редакції 04.06.2025

## МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ІМІТАЦІЇ ВІДБИТТЯ ЛУНА-СИГНАЛУ РАДАРА ВІРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА

**Петровський А. В.**, к.т.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: andreyanobody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3337-9577.

*Дистанційне навчання у закладах вищої освіти у сучасних умовах не надає достатньо практичних навичок майбутнім судноводіям. Наявність локально встановлених тренажерів вимагає присутності курсанта в аудиторії, що в деяких регіонах є небезпечним. Також внаслідок складності тренажерів, одночасне використання екранів ECDIS, RADAR, Conning display досить суттєво обмежує можливості закладу вищої освіти у придбанні хмарних комплексних тренажерів внаслідок високих цін і обмеженої пропозиції. Побудова комплексних тренажерів без фізичної локалізації надасть безпечні і комфортні умови для набуття навичок роботи на навігаційному містку. Стаття присвячена побудові математичних моделей, призначенням яких є графічна імітація відбиття луна-сигналу радара на рухомих і нерухомих надводних об'єктах. Запропоновано метод динамічних кутових тінювих інтервалів. Побудова синусоїдального луна-сигналу на «видимих» сегментах (2D-фасетах) ламаної (контур Land Danger) дозволяє візуалізувати луна-сигнал радара з урахуванням геометрії надводних об'єктів. При цьому здійснюється об'єднання синусоїдальних профілів у загальний радарний відгук у полярному радіусі. Надано модель унікальної метрики «видимості» 2D-фасета в полярному секторі, яка оброблюється аналітично, а не побудована бітовою маскою. Логіка динамічного «накопичення тіні» — розширення кутових тінювих інтервалів у часі — є новою реалізацією концепції «динамічного перекриття» у полярній області від рухомого судна-спостерігача.*

*Ключові слова:* ECDIS; RADAR; імітація луна-сигналу; 2D-фасет.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.092-101**

**Вступ.** У поточних умовах дистанційного навчання велику увагу потрібно приділяти саме набуттю курсантами практичних навичок роботи з ECDIS, радаром. Оскільки дані програмні модулі реалізовані у тренажерних комплексах, які фізично локалізовані без можливості використання хмарних технологій для надання вправ і їх реалізації курсантами на власних ПК, здійснити контроль практичних знань дуже важко. На даний час є деякі розробки програмних продуктів, які частково доповнюють можливості ECDIS Navi Sailor 4000 [1], а також надають перспективи побудови не локалізованого тренажера з можливістю працювати на віртуальному радарі [2–4]. Однак графічна реалізація імітації опромінювання луна-сигналом радара використовує методи обробки динамічних сцен комп'ютерного моделювання. При цьому формуються умови до математичних моделей: швидкість обробки, точність і коректність відображення опромінювання на видимих, відносно рухомого судна-спостерігача, сторонах інших надводних об'єктів.

**Постановка проблеми.** При побудові віртуального тренажера імітації судового радара слід визначити вимоги до математичних моделей, які будуть використовуватися у програмному забезпеченні. Для плаского екрана радара достатньо площини, що буде сприяти аналітично обчислювати видимість сегментів лінії Land Danger (2D-фасет) із меншими витратами. Необхідністю є уникнення складних структур даних, натомість використання полярної координатної системи й кутових інтервалів, що дозволяє динамічно оновлювати видимість простими обчисленнями. Також кути напряму променів при трасировці для визначення видимих 2D-фасет повинні аналітично оновлюватися при русі судна-спостерігача, без перебудови структур даних. Додатково модель повинна аналітично враховувати не лише факт перетину, але й ступінь «видимості» 2D-фасета в полярній області огляду, що дає змогу формувати точніші луна-сигнали. Розроблений підхід не повинен залежати від апаратної гібридності, специфічності та мати можливість бути реалізованим на будь-якій платформі, зберігаючи точність моделювання через геометричну параметризацію. Модель повинна бути здатною працювати з довільною ламаною або дугою (наприклад,

видима частина судна-цілі у вигляді дуги), що описує ціль (наприклад, як коло від цілі ARPA при відображенні на SENC карті ECDIS).

**Аналіз досліджень і публікацій.** При дослідженні структури ENC карт [5] було встановлено, що всі полігони об'єктів типу Land Danger графічно побудовані у вигляді 2D-сплайнів, що у більшості досліджень, присвячених оптимізації графічного відображення складної інформації, визначається як 2D-фасети. Аналіз останніх публікацій, пов'язаних із відображенням видимих частин геометричних об'єктів відносно об'єкта-дослідника, трасировкою променів, швидкістю прорисовки об'єктів показав неоднозначність вибору того чи іншого методу графічної реалізації. У роботі [6] досліджено GPU-трасування у динамічних сценах, що близько до задачі визначення видимості 2D-фасетів від рухомого судна-спостерігача і, також, розглядається потреба швидкого оновлення «сцени», але реалізовано це в 3D-контексті. У наявності: падіння продуктивності при великій кількості об'єктів і їх перекриттях. У статті [7] запропоновано оптимізацію базових обчислень перетину променя з трикутником, що є фундаментальною операцією при трасуванні. Цей принцип може бути частково застосовний до перевірки перетину променя з відрізками у 2D, але він не враховує часткову видимість і не підтримується робота в динамічних сценах. У [8] розглядається метод прискорення трасування із передбачуваним оцінюванням видимості. Це стосується визначення видимих сегментів об'єктів Land Danger, але алгоритм не враховує динамічну зміну сцени або розрахунок часткової видимості. Стаття [9] пропонує трасувальний алгоритм на основі гібридної структури з частковим оновленням. Для повністю динамічного середовища – час обробки зростає при зміні геометрії. Запропонована адаптивна структура для трасування в екранному просторі [10] добре працює в задачах рендерингу, але не придатна для реального моделювання траєкторій або розрахунку радарного профілю, оскільки не враховує реальної геометрії сцени в координатному просторі, лише її проекцію. У [11] описується ітеративний підхід до виявлення колізій на GPU. Це частково схоже на перевірку видимості 2D-фасет, але реалізовано через обхід. Ітеративність вимагає додаткових ресурсів і пам'яті при великій кількості об'єктів. Описується підхід до трасування сцен з деформованими об'єктами шляхом оновлення BVH-структури (Bounding Volume Hierarchies) у [12]. Це може стосуватися задачі врахування динаміки положення спостерігача, наприклад, судна, однак реалізовано через складні просторові структури, тому оновлення BVH потребує значних обчислювальних ресурсів і не завжди ефективно при постійній зміні геометрії. Геометрія Land Danger, відносно судна, може досить швидко змінюватись внаслідок будь-якої зміни курсу/швидкості судна. У [13] висвітлено ефективну побудову BVH для трасування у реальному часі. Хоча цей підхід прискорює роботу з великими сценами, він все одно залишається громіздким: високе навантаження на ресурси при частому оновленні ієрархій. Зміст [14] відображає розроблену гібридну CPU-GPU архітектуру, що дозволяє трасувати сцени з анімацією в реальному часі. Якщо модель застосувати для імітації радара, то це може бути використано для зміни положення судна-спостерігача, але технічно модель реалізовано через складну апаратну взаємодію: необхідна синхронізація обчислень на CPU і GPU, що ускладнює реалізацію у компактних тренажерах. У [15] розглядається трасування SAR-відгуку (Synthetic Aperture Radar) на базі RTX-архітектури: імітація сигналу радара, але реалізація виконується в 3D-сценах і потребує специфічного апаратного забезпечення, тобто відсутність універсальності реалізації. Метод SBR (Shooting and Bouncing Rays) [16] моделює багаторазове відбиття в електромагнітному середовищі. Це є загальним підходом до симуляції, але він непридатний до задач швидкого формування одновідбитого радарного сигналу і не адаптований до 2D-сцен. Дослідження [17] надають підхід до навчання розсіювання SAR-сигналів на основі диференційованого трасування. Метод складний, але цікавий для задач глибокого моделювання. На жаль, у наявності високі вимоги до ресурсів та навчального датасету та не підходить для реального часу. Автори [18] застосовують трасування для моделювання SAR-відгуку в геометрії дальність-азимут. Цей підхід працює в обмежених умовах і не пристосований до довільних складних форм – підходить лише для

простих об'єктів. У роботі [19] досліджено трасування з урахуванням точності геометрії. Сильна сторона – висока точність. Втім, цей метод створений для 3D-графіки, тоді як імітація радару планується 2D. Обмеженням результатів досліджень є обчислювальна складність і відсутність адаптації до полярної координатної системи, що притаманна радару.

Аналіз досліджень показав, що більшість розроблених алгоритмів працює з 3D фасетами, у той час, коли потрібна модель для 2D-фасета, що дає змогу спростити розрахунки; методи не адаптовані під полярні координати; окрім перевірки перетинів променів для визначення видимості 2D-фасет потрібне моделювання імітації луна-сигналу на видимих фасетах під відповідним кутом, чого теж немає у сучасних розробках.

**Метою статті** є розробка математичних моделей графічного уявлення імітації відбиття опромінювання судном-спостерігачем надводних рухомих/нерухомих об'єктів.

**Об'єктом дослідження** є графічне уявлення імітованого сигналу опромінювання від видимих частин надводних рухомих/нерухомих об'єктів відносно судна-джерела опромінювання.

**Задачі дослідження:** розробка методики визначення видимих контурів поверхонь типу Land Danger та методу динамічних кутових тінювих інтервалів для імітації відбиття опромінювання рухомих/нерухомих надводних об'єктів при русі судна-спостерігача.

**Методи дослідження:**

- метод перевірки перетину променя з об'єктами сцени, що застосовано для визначення видимості кожного 2D-фасета ламаної;
- метод розрахунку видимих і екранованих кутових інтервалів між спостерігачем і об'єктами (є основою для побудови маски тіней та видимості в полярних координатах);
- параметричне задання відрізка (використовується для створення уздовж кожного 2D-фасета відповідної траєкторії);
- синусоїдальна модуляція на геометричних об'єктах (використовується як імітація радарного луна-сигналу у вигляді синусоїди, накладеної на видимі 2D-фасети ламаної лінії або дуги;
- обчислення нормалі в 2D для побудови напрямку відбиття сигналу та візуалізації амплітуди синусоїд у перпендикулярному до ребра напрямку;
- метод визначення часткової видимості через співвідношення кутів – для визначення ступеня видимості 2D-фасета на основі співвідношення перетину тінювого інтервалу з інтервалом 2D-фасета;
- візуалізація у полярній системі координат;
- метод перевірки включення одного інтервалу в інший у кутовому просторі для визначення перекриття;
- динамічне оновлення зони «тіней» (для побудови масиву тінювих інтервалів у часі при русі судна-спостерігача;
- метод Ray–Edge Intersection in 2D Geometry використовувався як основа для обчислення променевих перетинів із ламаною.

**Основна частина.** Пропонується алгоритм визначення видимих контурів поверхонь типу Land Danger для імітації відбиття опромінювання рухомих/нерухомих надводних об'єктів при русі судна-спостерігача.

1. Трасировка променів.

Від кожної вершини  $P_i$  ламаної  $L = [P_0, P_1, \dots, P_m]$  проводиться промінь  $R_i = \overline{OP_i}$  (де т.О є позицією судна-спостерігача).

Для кожного ребра (2D-фасет)  $E_i = [Q, B]$  здійснюється перевірка: чи можна «побачити» вершини Q та B із точки спостереження (судно), тобто чи немає перетинань променів з іншими 2D-фасетами? Якщо обидві вершини ребра є екранованими, цей 2D-фасет не можна «побачити», тому, надалі, на такий 2D-фасет не потрібно надавати синусоїди для імітації відбиття луна-сигналу радару.

## 2. Операція нормалізації.

Для кожного ребра  $E_i$  розраховується нормаль  $\vec{n}_i$ . Кут між  $\vec{n}_i$  та вектором  $\vec{OP}_i$ :

$$\cos(\theta_i) = \frac{\vec{n}_i * \vec{OP}_i}{\|\vec{n}_i\| * \|\vec{OP}_i\|} . \quad (1)$$

При цьому, якщо  $\cos(\theta_i) < 0$ , то даний 2D-фасет ламаної «невидимий».

## 3. Накладання тіньової маски у полярних координатах.

Простір кутів  $[0; 2\pi]$  розподіляється на дискретні сектори. Для кожного сектора визначається найближчий 2D-фасет, перетнутий променем. 2D-фасети за першим перетином вважаються «невидимими».

## 4. Накладання синусоїди на «видимі» 2D-фасети ламаної.

Для імітації відбиття луна-сигналу радару вдовж кожного ребра  $E_i = [P_i, P_{i+1}]$  ламаної  $L$  будується синусоїдальний профіль, вершини (амплітуди) якого орієнтовані до судна-спостерігача. Величина амплітуди залежить від геометричної «видимості» 2D-фасета.

Нехай  $S \in [0; 1]$  – параметр, вдовж 2D-фасета  $E_i$ .

Тоді  $E_i(S) = (1 - S)P_i + S * P_{i+1}$  – параметризація 2D-фасета.

І нормаль до 2D-фасета:

$$\vec{n}_i = \frac{(P_{i+1} - P_i)^\perp}{\|P_{i+1} - P_i\|} . \quad (2)$$

Далі потрібно надати синусоїдальну криву вдовж відрізка ( $s \in [0; 1]$ ):

$$S_i(s) = E_i(s) + A_i \sin(2\pi ks) * \vec{n}_i , \quad (3)$$

де  $A_i$  – амплітуда відбитка луна-сигналу радару (імітація величини «шуму» луна-сигналу радару);

$k$  – кількість коливань синусоїди вдовж 2D-фасета.

Для фізичного відображення синусоїди:  $A_i = \alpha V_i$  ( $\alpha$  – максимальна амплітуда;  $V_i$  – розрахунковий коефіцієнт «видимості»).

Тоді може бути декілька варіантів:

- якщо  $V_i = 1$  (2D-фасет повністю «видимий»);
- якщо  $V_i = 0$  (2D-фасет повністю «невидимий»);
- якщо  $V_i \in (0; 1)$  (2D-фасет частково «видимий»).

Загальний луна-сигнал для всіх ділянок ламаної:

$$R(s) = \bigcup_i S_i(s) \quad s \in [0,1] . \quad (4)$$

5. Якщо повинна бути присутня помітка судна-цілі, будується математична модель синусоїдального луна-сигналу на «видимій» частині кола (помітка судна-цілі) – дузі.

Припустимо, що судно-ціль на радарі буде імітуватися колом із радіусом  $R$  із центром кола  $C(x, y)$ , а судно з радаром (спостерігач) у точці  $O(x_o, y_o)$ . Тоді, для імітації відбиття луна-сигналу радару судна-спостерігача потрібно побудувати кутовий сектор кола, який є «видимим» з т.О та побудувати вдовж «видимої» частини дуги кола синусоїду таким чином, щоб максимальні значення її (амплітуди) були направлені саме на т.О.

Для цього визначають геометрію видимості частини дуги кола: із зовнішньої т.О до кола можна провести дві дотичні і тоді кути між вектором  $\vec{CO}$  і дотичними визначають межі «видимості» дуги кола. Кут напрямку на центр:  $\varphi_0 = \arctg(y_c - y_o, x_c - x_o)$  і кутове зміщення дотичних:

$$\delta = \arcsin\left(\frac{R}{\|C - O\|}\right) . \quad (5)$$

«Видимий» сектор:  $\theta \in [\varphi_o - \delta, \varphi_o + \delta]$ . Позначимо  $\theta_1 = \varphi_o - \delta$  і  $\theta_2 = \varphi_o + \delta$ .  
Тоді при проведенні параметризації «видимої» дуги  $\theta \in [\theta_1, \theta_2]$ :

$$\gamma(\theta) = C + R * (\cos\theta, \sin\theta). \quad (6)$$

Далі будується синусоїда на «видимій» частині дуги, амплітуда якої направлена до судна-спостерігача, а період – вдовж дуги. Визначають тангенційне зміщення дуги.

Нехай параметр дуги  $s \in [0,1]$ :

$$\begin{aligned} \theta(s) &= \theta_1 + s * (\theta_2 - \theta_1); \\ P(s) &= C + R * (\cos\theta(s), \sin\theta(s)). \end{aligned}$$

Нормаль до кола у місці P(s):

$$\vec{n}(s) = \frac{(P(s)-C)}{\|P(s)-C\|}.$$

Зміщення по синусоїді:

$$S(s) = P(s) + A \sin(2\pi ks) * \vec{n}. \quad (7)$$

Після підставлення:

$$S(s) = C + R * (\cos\theta(s), \sin\theta(s)) + A \sin(2\pi ks) * (\cos\theta(s), \sin\theta(s)).$$

Тоді:

$$S(s) = C + (R + A \sin(2\pi ks)) * (\cos\theta(s), \sin\theta(s)). \quad (8)$$

**Інша модель базується на методі динамічних кутових тіньових інтервалів** (позначення надані у попередній моделі).

Нехай траєкторія судна-спостерігача:

$$O(t) = (x(t), y(t)),$$

де t – час.

Тоді в будь-який час відстань до надводного об'єкта буде розраховуватись:

$$r_i^{(t)} = \|P_i - O(t)\| = \sqrt{(x_i - x(t))^2 + (y_i - y(t))^2}. \quad (9)$$

У полярних координатах кут:  $\theta_i^{(t)} = \arctg(y_i - y(t), x_i - x(t))$   $\theta_i^{(t)} \in [-\pi; \pi]$ .

Також, кожний 2D-фасет  $E_i$  ламаної  $L$  може бути надана у полярних координатах:

$$\begin{aligned} A_i^{(t)} &= [\min(\theta_i^{(t)}, \theta_{i+1}^{(t)}), \max(\theta_i^{(t)}, \theta_{i+1}^{(t)})]; \\ R_i^{(t)} &= \min(r_i^{(t)}, r_{i+1}^{(t)}). \end{aligned} \quad (10)$$

Далі проводять сортування всіх ланок  $E_i$  за критерієм збільшення радіусу-відстанці  $R_i^{(t)}$ . Цей процес необхідний для визначення ланок, що закривають інші. Таким чином формуються «тіньові» зони (не плутати з реальними тіньовими зонами радара на судні, які формуються завдяки перешкодам радіосигналу палубними елементами судна):

$$S_{\delta(0)}^{(t)}, S_{\delta(1)}^{(t)}, \dots, S_{\delta(m-1)}^{(t)}.$$

Визначають множину зайнятих кутових інтервалів  $S^{(t)}$ , де кожен елемент – це інтервал  $[\alpha; \beta] \subset [0; 2\pi]$  і який відповідає вже закритому 2D-фасету ламаної.

Первісно,  $S^{(t)} = 0$  і при проходженні по кожному відсортованому 2D-фасету  $S_{\delta(k)}^{(t)}$ :

– якщо виконуються умови  $S_{\delta(k)}^{(t)} \cap S = \emptyset$  при  $\forall S \in S^{(t)}$ , то 2D-фасет «видимий» і тоді  $A_{\delta(k)}^{(t)}$  додають до  $S^{(t)}$ ;

– інакше 2D-фасет є частково або повністю скритим.

Останній крок – побудова динаміки.

Оскільки система функціонує дискретно (отримуються дані у режимі імітації не безперервно, а у визначенні моменти часу, наприклад, через кілька секунд, що можна інтерпретувати, як пройдено коло луна-сигналом на радарі з 0 до  $2\pi$ ), нехай:

$$t_z = t_0 + z\Delta t,$$

де  $z = 0, 1, 2, 3 \dots$  (часові кроки).

Тоді на кожному такому кроці потрібно оновлювати позицію  $O(t_z)$ , для всіх  $i$  розраховувати  $\theta_i^{(t_z)}$ ,  $r_i^{(t_z)}$ ,  $A_i^{(t_z)}$ ,  $R_i^{(t_z)}$ , потім сортувати ланки за вищевказаним критерієм значень  $R_i^{(t_z)}$ , оновлювати  $S_i^{(t_z)}$ , і вже тоді визначати «видимі» ланки.

У результаті отримуємо множину «видимих» 2D-фасет:  $V^{(t)} \subset \{s_0, s_1, \dots, s_{m-1}\}$

Також, окремо для кожного 2D-фасета функція «видимості»:  $v_i(t) \in [0, 1]$ .

Додатково можна провести згладжування використанням ваги:

$$v_i(t) = 1 - \frac{\mu(A_i^{(t)} \cap S^t)}{\mu(A_i^{(t)})}, \quad (11)$$

де  $\mu$  – різниця кутів кінцівок інтервалу;

$\mu(A_i^{(t)} \cap S^t)$  – сумарна довжина перекриття з тіннями.

Накладання синусоїди, як імітації луна-сигналу:

Для кожного кута  $\theta \in [\theta_i, \theta_{i+1}]$ :

$$r(\theta) = r_0 + A \sin^2(k(\theta - \theta_c)), \quad (12)$$

де  $r_0$  – середня відстань до ланки від судна-спостерігача  $r_0 = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}$ ;

$\theta_c$  – центральний кут 2D-фасети  $\theta_c = \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}$ .

При русі судна-спостерігача, змінюється дистанція:

$$r(\theta) = r_0(t) + A \sin^2(k(\theta - \theta_c(t))). \quad (13)$$

**Основні результати та їх обговорення.** Проведені дослідження і подальша програмна реалізація моделей мовою програмування Python 3.12 у середовищі Spyder 6.0 (рис. 1) показали особливості моделей:

- радіолокаційний ефект – внаслідок синусоїди;
- врахування орієнтації 2D-фасета через використання центрального кута;
- часткова «видимість» синусоїди відповідно до «видимості» 2D-фасета;
- динамічна зміна положення судна-спостерігача.

Переваги розробленого методу динамічних кутових тіньових інтервалів:

- низька розрахункова складність на кожному кроці шляхом сортування;
- метод працює з замкнутими інтервалами (які на карті можуть імітувати острови, або точкові небезпеки) та розімкнутими (імітація контуру узбережжя);
- адаптований під рух судна-спостерігача.

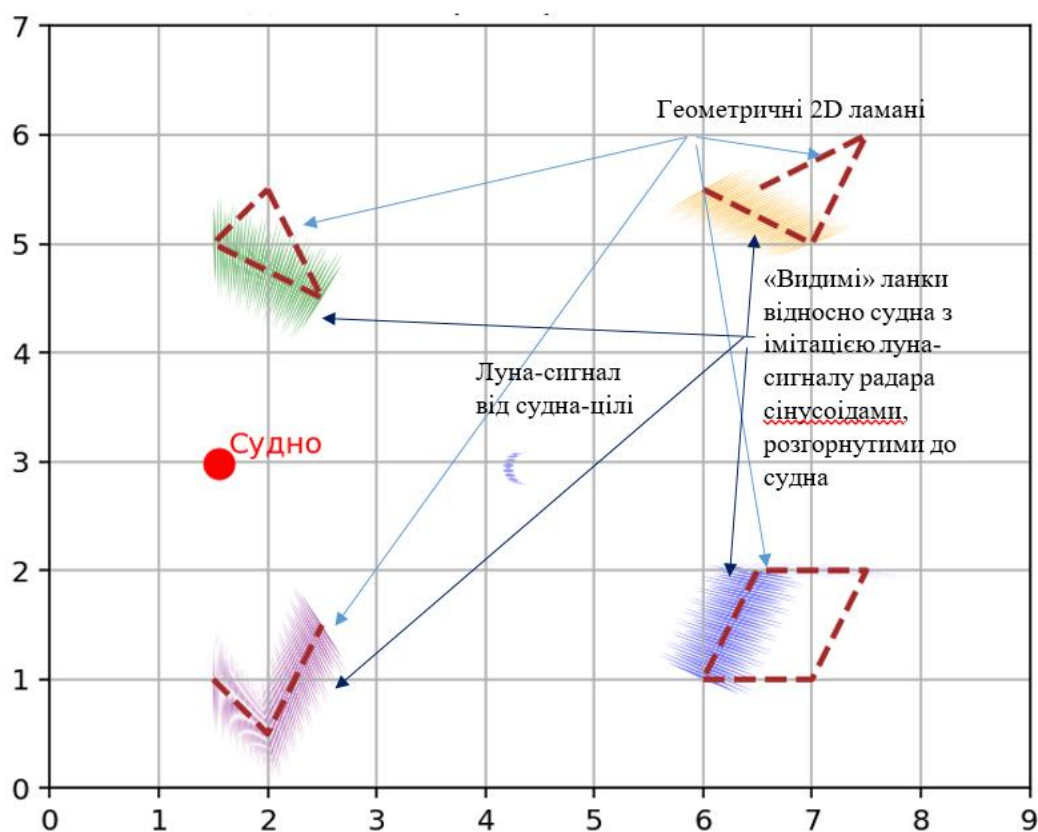


Рисунок 1 – Приклад реалізації метода динамічних кутових тінювих інтервалів на умовній карті ENC (Меркаторська проекція), що імітує оверлей радара на екран ECDIS

**Висновки.** Розроблено алгоритм графічного відображення імітації відбиття луна-сигналу радара на надводних рухомих/нерухомих об'єктах відносно рухомого судна-спостерігача. Аналітичне визначення видимих 2D-фасетів і подальше їх сортування прискорює час відображення імітованого сигналу радара. Також запропоновано метод динамічних кутових тінювих інтервалів [3]:

- побудова синусоїдального луна-сигналу на «видимих» 2D-фасетах ламаної дозволяє візуалізувати луна-сигнал радара з урахуванням геометрії надводних об'єктів. При цьому здійснюється об'єднання синусоїдальних профілів у загальний радарний відгук (стосується саме синтезованого луна-сигналу в полярному радіусі). Побудову синусоїдального профілю здійснено в кутовому секторі.

- будується унікальна метрика «видимості» 2D-фасета в полярному секторі, яка рахується аналітично, а не будується бітовою маскою.

- логіка динамічного «накопичення тіні» – розширення кутових тінювих інтервалів у часі є новою реалізацією концепції «динамічного перекриття» у полярній області від рухомого судна-спостерігача.

**Перспективи подальших досліджень.** При розширенні досліджень можливе розширення шляхом використання сферичних координат (тоді можлива ще й імітація «взяття» луна-сигналу відповідно до висоти місцевості узбережжя, що надасть ще більшої реалістичності при імітації відбиття луна-сигналу). Розроблені моделі можуть бути реалізовані у віртуальному радарі при побудові віртуального тренажера для судноводіїв.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Петровський А. В. Свідоцтво реєстрації авторського права на твір Комп'ютерна програма «S57ViewerVisualCatzocPointEnc» №133972, 03.03.2025.
2. Петровський А. В. Свідоцтво реєстрації авторського права на твір Комп'ютерна програма «SimulationBridgeMasterE» №135550, 29.04.2025.

3. Петровський А. В. Свідोцтво реєстрації авторського права на твір «Математичні моделі імітації луна-сигналу радара» №136680, 04.06.2025.
4. Петровський А. В., Сокурєнко Я. О., Зяблов Д. О. Розробка імітаційного програмного модулю радара bridge master e для умов дистанційного навчання. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» 28–30 травня 2025 року м. Одеса, с. 87–89.
5. Петровський А. В., Литовченко В. І. Дослідження структури сучасних ENC карт формату S57. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» 28–30 травня 2025 року м. Одеса, с. 90–93.
6. Reichl M., Dünger R., Schiewe A., Klemmer T., Hartleb M., Lux C. & Fröhlich B. GPU-based ray tracing of dynamic scenes. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*.
7. Havel J. & Herout A. Yet faster ray-triangle intersection (using SSE4). *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(3), 434–438. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.85>.
8. Sobota B., Korečko Š., Szabó C. & Hrozek F. Acceleration of ray tracing method using predictive evaluation and GPGPU technology. *Central European Journal of Computer Science*, 4(2), 118–126. <https://doi.org/10.2478/s13537-014-0203-2>.
9. Li J., Wang X. & Zhang Y. A fast ray tracing algorithm based on a hybrid structure. *Multimedia Tools and Applications*, 75(5), 1883–1898. <https://doi.org/10.1007/s11042-014-2380-9>.
10. Kautz J., Widmer S., Pajak D. & Schulz A. An adaptive acceleration structure for screen-space ray tracing. *Proceedings of High-Performance Graphics*.
11. Vitek O. & Mrazek P. Iterative ray-traced collision detection algorithm for GPU architectures. *Academia.edu*.
12. Wald I., Boulos S. & Shirley P. Ray tracing deformable scenes using dynamic bounding volume hierarchies. *ACM Transactions on Graphics*, 26(1), 6. <https://doi.org/10.1145/1186640.1186647>.
13. Liu X., et al. Real-time ray tracing with massively parallel bounding volume hierarchy construction. *ACM Transactions on Graphics*, 29(6), 1–10. <https://doi.org/10.1145/1882261.1866206>.
14. Cho S., Park J., Kim J. & Lee S. HART: A hybrid architecture for ray tracing animated scenes. *Proceedings of the 2014 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*. <https://doi.org/10.1109/RT.2014.6893655>.
15. Willis A. R., Hossain M. S., & Godwin J. Hardware-accelerated SAR simulation with NVIDIA RTX technology. *arXiv preprint arXiv:2005.09736*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.09736>.
16. Geng H. & Wang S. Shooting and bouncing rays (SBR) method for electromagnetic simulation. In *Electromagnetic Scattering Handbook* (pp. 121–142). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-47373-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47373-8_5).
17. Wei J., Lu Y., Zhang X. & Xu F. Learning surface scattering parameters from SAR images using differentiable ray tracing. *arXiv preprint arXiv:2402.06547*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.06547>.
18. Liang D., Zhang Z. & Huang J. Ray-tracing-assisted SAR image simulation under range Doppler imaging geometry. *Electronics*, 12(3), 589. <https://doi.org/10.3390/electronics12030589>.
19. Chan K. C. et al. GRay: A geometrically-based ray tracing engine. *Computer Graphics Forum*, 32(6), 123–134. <https://doi.org/10.1111/cgf.12237>.

## REFERENCES

1. Petrovskiy, A. V. (2025). Certificate of state registration of copyright for the computer program “S57ViewerVisualCatzocPointEnc” No. 133972.
2. Petrovskiy, A. V. (2025). Certificate of state registration of copyright for the computer program “SimulationBridgeMasterE” No. 135550.
3. Petrovskiy, A. V. (2025). Certificate of state registration of copyright for “Mathematical Models of Radar Echo Simulation” No. 136680.
4. Petrovskiy, A. V., Sokurenko, Ya. O., & Ziablov, D. O. (2025). Development of a radar simulation software module “Bridge Master E” for distance learning conditions. In Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference “Modern Information and Innovative Technologies in Transport” (Odesa, Ukraine, May 28–30, 2025) (pp. 87–89).
5. Reichl, M., Dünger, R., Schiewe, A., Klemmer, T., Hartleb, M., Lux, C., & Fröhlich, B. (2010). GPU-based ray tracing of dynamic scenes. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*.
6. Petrovskiy, A. V., & Lytovchenko, V. I. (2025). Study of the structure of modern ENC charts in S57 format. In Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference “Modern Information and Innovative Technologies in Transport” (Odesa, Ukraine, May 28–30, 2025) (pp. 90–93).
7. Havel, J., & Herout, A. (2010). Yet faster ray–triangle intersection (using SSE4). *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(3), 434–438. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.85>.
8. Sobota, B., Korečko, Š., Szabó, C., & Hrozek, F. (2014). Acceleration of ray tracing method using predictive evaluation and GPGPU technology. *Central European Journal of Computer Science*, 4(2), 118–126. <https://doi.org/10.2478/s13537-014-0203-2>.
9. Li, J., Wang, X., & Zhang, Y. (2016). A fast ray tracing algorithm based on a hybrid structure. *Multimedia Tools and Applications*, 75(5), 1883–1898. <https://doi.org/10.1007/s11042-014-2380-9>.
10. Kautz, J., Widmer, S., Pajak, D., & Schulz, A. (2015). An adaptive acceleration structure for screen-space ray tracing. *Proceedings of High-Performance Graphics*.
11. Vitek, O., & Mrazek, P. (2019). Iterative ray-traced collision detection algorithm for GPU architectures. *Academia.edu*.
12. Wald, I., Boulos, S., & Shirley, P. (2011). Ray tracing deformable scenes using dynamic bounding volume hierarchies. *ACM Transactions on Graphics*, 26(1), 6. <https://doi.org/10.1145/1186640.1186647>.
13. Liu, X., et al. (2010). Real-time ray tracing with massively parallel bounding volume hierarchy construction. *ACM Transactions on Graphics*, 29(6), 1–10. <https://doi.org/10.1145/1882261.1866206>.
14. Cho, S., Park, J., Kim, J., & Lee, S. (2014). HART: A hybrid architecture for ray tracing animated scenes. *Proceedings of the 2014 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing*. <https://doi.org/10.1109/RT.2014.6893655>.
15. Willis, A. R., Hossain, M. S., & Godwin, J. (2020). Hardware-accelerated SAR simulation with NVIDIA RTX technology. *arXiv preprint arXiv:2005.09736*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.09736>.
16. Geng, H., & Wang, S. (2023). Shooting and bouncing rays (SBR) method for electromagnetic simulation. In *Electromagnetic Scattering Handbook* (pp. 121–142). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-47373-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-47373-8_5).
17. Wei, J., Lu, Y., Zhang, X., & Xu, F. (2024). Learning surface scattering parameters from SAR images using differentiable ray tracing. *arXiv preprint arXiv:2402.06547*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.06547>.
18. Liang, D., Zhang, Z., & Huang, J. (2023). Ray-tracing-assisted SAR image simulation under range Doppler imaging geometry. *Electronics*, 12(3), 589. <https://doi.org/10.3390/electronics12030589>.

19. Chan, K. C., et al. (2013). GRay: A geometrically-based ray tracing engine. *Computer Graphics Forum*, 32(6), 123–134. <https://doi.org/10.1111/cgf.12237>.

**Petrovskyi A. MATHEMATICAL MODELS FOR SIMULATING RADAR ECHO SIGNALS IN A VIRTUAL TRAINING SYSTEM**

*In the current context of educational process transformation, ensuring the effective acquisition of practical skills by cadets in maritime academies has become increasingly important. Restrictions related to physical attendance in classrooms, along with the high cost of commercial cloud-based simulators, significantly limit the possibilities for interactive training of navigators. Simulator systems based on hardware-software integration are often difficult to scale in line with modern educational demands. Against this background, the development of mathematical models enabling real-time radar echo simulation without dependence on physical hardware is a promising direction of research. This article presents mathematical models designed to graphically simulate radar echo reflections from moving and stationary surface objects. A method of dynamic angular shadow intervals is proposed. The construction of sinusoidal radar echoes along “visible” segments (2D facets) of a polyline (Land Danger contour) enables realistic visualization of radar signals while considering the geometry of surface targets. These sinusoidal profiles are then combined into a unified radar response within the polar radius. The article introduces a model of a unique visibility metric for 2D facets in a polar sector, calculated analytically rather than constructed via bit masking. The logic of dynamic “shadow accumulation”—expanding angular shadow intervals over time—represents a novel implementation of the “dynamic occlusion” concept in a polar observation space relative to a moving vessel. The provided echo signal simulation model corresponds to the real one without taking into account the physical shadow zones of the ship's radar, which are formed due to the arrangement of high deck structures on the vessel that obstruct the circular propagation of the radar signal.*

**Key words:** ECDIS; RADAR; radar echo simulation; 2D-facet.

© Петровський А. В.

Статтю прийнято до редакції 14.06.2025

## ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ СУДНОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

**Тимофєєв К. В.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики», Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: kvtimofeev2013@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8668-6159;

**Вороненко С. В.**, к.т.н., доцент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» Херсонської державної морської академії, e-mail: vr.sergey@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3880-9556;

**Лебеденко Ю. О.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри «Інформаційні та комп'ютерні технології» Київського національного університету технологій та дизайну, e-mail: lebedenko.yo@knutd.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1352-9240.

*Стаття присвячена питанням розвитку методів діагностування високовольтних електричних машин та їх практичному застосуванню на морському транспорті. Дослідження основних підходів до розробки методів і засобів діагностування електричних машин показало доцільність застосування принципів функціонального діагностування. Аналіз діагностичних параметрів дозволив сформулювати ефективну сукупність параметрів вібрації, температури, споживаного і смісного струму, а також електророзрядної активності та запропонувати комплексну функціональну систему діагностування. Розроблено алгоритм функціонального діагностування суднових високовольтних електричних машин. Запропоновано структуру системи діагностування технічного стану, що дозволяє реалізувати розроблений алгоритм діагностування, який відрізняється конструктивною простотою і надійністю. Діагностування високовольтної електричної машини може бути формалізовано за допомогою моделей класифікації технічного стану і пошуку несправностей за результатами класифікації. Розроблено нечітку модель класифікації технічного стану у вигляді предикатних правил, що дозволяє за результатами вимірювання параметрів електророзрядної активності і середньоквадратичного значення віброшвидкості визначити технічний стан об'єкта. Визначено п'ять класів технічного стану об'єкта: «Норма», «Норма з відхиленнями», «Норма зі значними відхиленнями», «Погіршення» або «Передаварійне». Розроблена модель пошуку несправностей застосовує апарат нечіткої логіки. Модель дозволяє виявити несправності об'єкта по вимірним значенням амплітуд струму і вібрації на характерних частотах, а також температури в контрольних точках. Алгоритм оцінки технічного стану дозволяє за результатами вимірювання параметрів електророзрядної активності і середньоквадратичного значення віброшвидкості визначити поточний технічний стан об'єкта за допомогою апарату нечіткої логіки.*

**Ключові слова:** діагностика; електрична машина; дефект; технічний стан; вимірювання; електророзрядна активність; вібрація; спектр; нечітка логіка; модель.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.102-116**

**Вступ.** На сучасному етапі розвитку світового суднобудування єдині електроенергетичні системи (ЄЕЕС) з системами електроприводу (СЕП) судна знаходять все більш широке застосування на морському та річковому транспорті.

Класична побудова єдиних електроенергетичних установок (ЄЕЕУ) з рівнем напруги ЄЕЕС і СЕП до 1000 В знаходить широке застосування у вітчизняному та закордонному суднобудуванні. Це дозволяє використовувати пропульсивну установку сумарною потужністю орієнтовно 16 МВт. У міру досягнення верхньої межі потужності, істотно зростають струми збірних шин головних розподільних щитів (ГРЩ), що обумовлює необхідність застосування системи подвійних шин і комутаційних апаратів з високою комутаційною здатністю. У конструктивному плані система подвійних шин характеризується дворазовим збільшенням кількості секцій ГРЩ і погіршенням масогабаритних показників.

Рациональним рішенням стає застосування високовольтних суднових електроенергетичних систем (СЕЕС) з використанням комутаційної апаратури напругою 6,6 кВ або 11 кВ. Шляхом збільшення напруги головних генераторів відбувається суттєве зниження струму на збірних шинах. Це дозволяє відмовитися від системи подвійних шин і виконати компоновку головного розподільного пристрою (ГРП) за спрощеною схемою.

Зниження величини струму тягне за собою зменшення перетину збірних шин, а також кабелів. Необхідність введення понижуючих трансформаторів призводить до незначного зниження масогабаритних показників СЕЕС, що компенсується зменшенням ваги ГРП і кабельних трас [1, 2].

**Постановка проблеми.** Надійність роботи суден з високовольтною СЕЕС значною мірою залежить від стану електроустаткування, що забезпечує безперебійну роботу енергетичних систем, позапланова зупинка яких може призвести до серйозних аварій, що тягне за собою тривалі простої і суттєві фінансові втрати, а, можливо, і людські життя.

Для обслуговування технічного обладнання судна, необхідна велика кількість спеціалістів різного напрямку. У процесі підготовки таких фахівців морські навчальні заклади нашої держави використовують міжнародні конвенції, кодекси, рекомендації ІМО і SOLAS [3, 4]. Міжнародною морською організацією, для кожного напрямку, розроблені свої ІМО курси підготовки [3]. Тому, навчання та стажування майбутніх морських фахівців відбувається згідно цих курсів та міжнародної конвенції з підготовки та дипломування моряків і несення вахти.

Отже, виникає необхідність підвищення експлуатаційної надійності і безперебійності роботи силового електрообладнання. Як правило, таке обладнання є конструктивним об'єднанням високовольтного електроустаткування, механічних або гідравлічних елементів з елементами контролю та інтелектуальною системою управління, що дозволяє здійснювати їх плавний пуск, виведення на заданий режим роботи, необхідне управління параметрами і відключення, що, відповідно до загальноприйнятої класифікації, дозволяє віднести їх до електромеханічних модулів. Одним з перспективних напрямів підвищення ефективності функціонування таких модулів є управління режимами роботи обладнання по їх фактичному стану. Такий підхід неможливий без засобів, що дозволяють здійснювати комплексну діагностику технічного стану та управління режимами роботи об'єкта. Дане дослідження спрямоване на вирішення задач повного циклу діагностування: отримання даних, обробка результатів, вироблення сигналів керування, переналаштування режимів роботи об'єкта, отримання зворотного зв'язку для корекції уставок системи контролю, оцінки технічного стану та виявлення несправностей. Система функціонального контролю та діагностування дозволить підвищити ресурс, зменшити аварійність, витрати на ремонт, підвищити ефективність застосування високовольтних електричних машин, що підкреслює актуальність даного дослідження.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проведений аналіз публікацій різних авторів та інтернаціональних стандартів за тематикою дослідження [5–13] показав велику кількість різних методів діагностики електричних машин, які можна об'єднати у чотири основні групи.

*Контроль вібраційних параметрів.* Методи засновані на виміру вібрацій окремих елементів агрегату, що дозволяє зробити висновок про стан електродвигуна. До недоліків методів вібродіагностики відносяться: 1) необхідність безпосереднього доступу до діагностуючого агрегату, що не завжди можливо; 2) методи пристосовані до діагностики механічних пошкоджень як двигуна, так і пов'язаного з ним механізму, тому електричні пошкодження не завжди можуть бути своєчасно виявлені по зміні вібраційних параметрів, що призводить до помилкового висновку залежно від порогових значень прийнятих у діагностичній моделі.

*Контроль магнітних та електромагнітних потоків.* Методи, засновані на вимірюванні й аналізі магнітного потоку в зазорі двигуна та на аналізі вторинних електромагнітних полів машини. Вони, як правило, застосовуються для високовольтних електродвигунів (від 6 кВ і вище). До їх недоліків відносяться: 1) установка датчиків магнітного поля вимагає безпосереднього доступу до об'єкта діагностування і можлива тільки при виготовленні електродвигуна або при його капітальному ремонті; 2) датчики вторинних електромагнітних полів дуже чутливі до дії зовнішніх електромагнітних випромінювань.

*Діагностування стану ізоляції.* Методи широко застосовуються при діагностиці електрообладнання. Як правило, їх використання можливе тільки при знятій напрузі, що виключає діагностування працюючих машин у реальному часі в нормальному режимі їх роботи. Проте існує метод діагностування стану ізоляції працюючого електрообладнання, який ґрунтується на реєстрації часткових розрядів, але на сьогодні він розроблений лише для високовольтного обладнання. Крім того, діагностування ізоляції не дає інформації про стан інших елементів конструкції електродвигуна.

*Аналіз електричних параметрів асинхронних електродвигунів.* Найбільш розповсюдженими методами є такі, що ґрунтуються на аналізі таких електричних параметрів працюючого обладнання, як струм, напруга і споживана потужність. В якості діагностичних параметрів використовуються: гармонійні складові спектра струму статора, гармонійні складові спектра споживаної потужності, спектральні складові амплітуди і фази вектора Парку. Недоліками даних методів є необхідність врахування впливу на електричні параметри характеристик мережі живлення, характеру навантаження, впливу зовнішніх електромагнітних полів, перехідних процесів у приводі тощо. Крім того, у регульованому електроприводі на основі силових напівпровідникових перетворювачів у спектрах струмів виникають частоти, обумовлені комутацією вентилів, що також необхідно враховувати.

**Мета та задачі дослідження.** Метою є підвищення ефективності функціонування високовольтних електромеханічних пристроїв, вдосконалення засобів діагностування та управління режимами роботи за результатами діагностики технічного стану.

Вирішуються задачі: вибору методів і засобів комплексної функціональної діагностики технічного стану електричних машин із застосуванням апарату нечіткої логіки; моделювання та розроблення алгоритмів діагностування технічного стану; розробки структури системи.

**Виклад основного матеріалу.** При діагностуванні складних об'єктів, яким є високовольтне електрообладнання, недоцільно застосовувати тестове діагностування, оскільки воно вимагає складної дорогої апаратури, великих витрат часу, має не високу надійність, і створює тривалий простій устаткування. Також тестове діагностування не дає можливість повною мірою оцінити стан об'єкта діагностування, з огляду на те, що перевірка проводиться без робочого навантаження і велика ймовірність не виявлення дефекту. Всі вищенаведені недоліки позбавлені системи функціонального діагностування, при яких перевірки здійснюються в робочому режимі та не призводять до простою об'єкта. Діагностування ведеться при робочому навантаженні, отже, знижується ймовірність не виявлення дефектів. Тому для здійснення технічного діагностування високовольтного електрообладнання доцільно застосовувати методи та засоби функціонального комплексного діагностування.

У результаті аналізу основних методів діагностування визначена ефективна сукупність діагностичних параметрів, що включає аналіз електророзрядної активності (ЕРА), вібраційний, струмовий і тепловізорний види контролю. Блок-схема діагностики двигунів з повним набором засобів дана на рисунку 1. Система дозволяє визначити та локалізувати електророзрядні явища, теплові процеси, механічні (вібраційні) явища.

Отримана схема містить велику кількість як контактних, так і безконтактних датчиків і осцилографів. Наявність дефекту визначається по діагностичним параметрам, які можуть бути представлені у вигляді деякого числового значення, укладені в структурі та формі сигналу, а також у наявності певних частот у спектрі сигналу. Все це істотно ускладнює процес діагностування і вимагає залучення досвідченого фахівця. Вирішити дану проблему дозволить розробка вбудованої інтелектуальної комплексної системи діагностування технічного стану високовольтного електроустаткування, яка дозволить автоматично визначати поточний стан об'єкта.

Завдання технічного діагностування включає контроль і оцінку поточного стану об'єкта і, у разі виявлення, пошук несправностей. Обрані методи повною мірою допомагають виконати ці завдання, причому вимірювання параметрів електророзрядної активності (ЕРА) і

середньоквадратичного значення (СКЗ) віброшвидкості дозволяють контролювати та оцінювати поточний стан електричних і механічних елементів обладнання, а контроль температури та спектральний аналіз струму і вібрації дозволяють знайти несправності, що виникли.

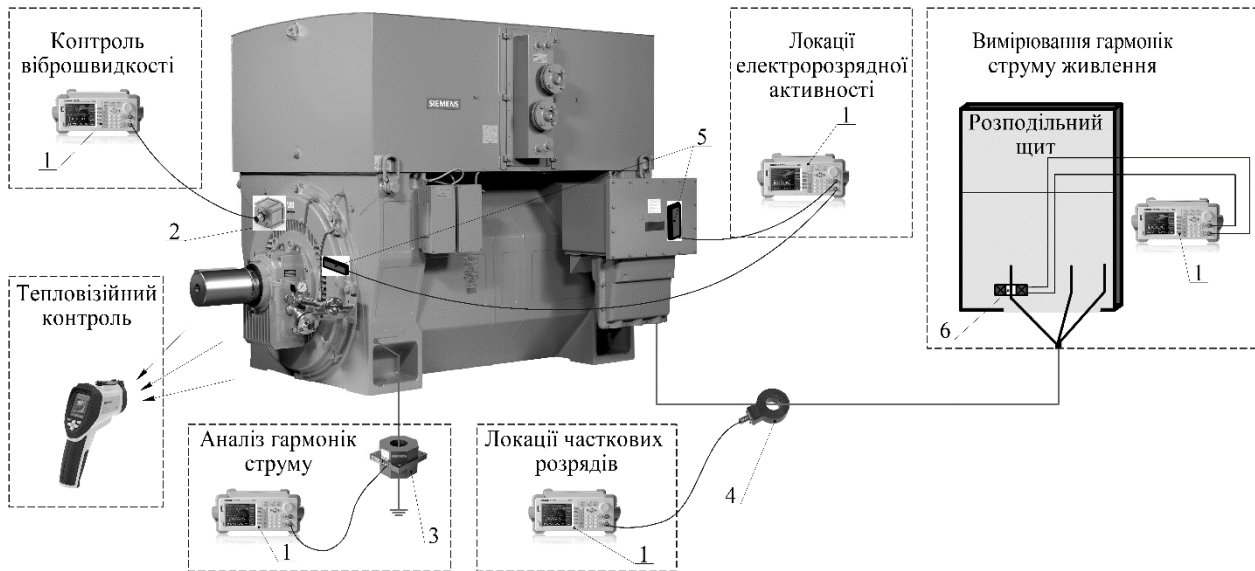


Рисунок 1 – Система багатопараметричної діагностики високовольтних двигунів:

- 1 – осцилограф; 2 – вібродатчик магнітного типу; 3 – вимірювальний трансформатор струму;
- 4 – датчик локації часткового розряду кабельної лінії, високочастотний трансформатор струму;
- 5 – датчики контролю електророзрядної активності;
- 6 – вимірювальний трансформатор струму

Контроль ЕРА і СКЗ віброшвидкості дозволяє здійснити комплексну оцінку поточного стану, віднісши його до одного з п'яти класів: «Норма», «Норма з відхиленнями (НЗВ)», «Норма зі значними відхиленнями (НЗЗВ)», «Погіршення», «Граничне». При виявленні перших двох станів, об'єкт повністю працездатний і його можна експлуатувати в штатному режимі. Якщо стан об'єкта «НЗЗВ» або «Погіршення», то необхідний контроль додаткових параметрів, пошук несправностей і вибір полегшеного режиму експлуатації. У разі граничного стану виконується пошук несправностей і відключення об'єкта. Таким чином, процес діагностування технічного стану суднових високовольтних електричних машин включає класифікацію технічного стану та пошук несправностей.

Структурна схема системи технічного діагностування має вид, представлена на рис. 2.



Рисунок 2 – Структурна схема системи технічного діагностування

Модель діагностування технічного стану є комплексною і включає рішення задач класифікації технічного стану і пошуку несправностей. Розробка пов'язана з великим обсягом даних, що важко формалізуються, тому доцільно застосування апарату нечіткої логіки. Аналіз методів діагностування високовольтних електричних машин показав, що, для вирішення задачі класифікації технічного стану, найбільш застосовні методи електророзрядної активності та вібродіагностика, що проводяться при робочій напрузі електродвигуна. Метод електророзрядної активності (ЕРА) дозволяє виявити електричні

дефекти в наступних вузлах: у колах живлення електродвигуна; обмотці статора; пакетах активної частини; колах живлення ротора; щітково-контактному апараті; контактних з'єднань у клемній коробці [14]. Вібродіагностика – дефекти механічного характеру електродвигуна [15]. Спільне застосування двох цих методів дозволить здійснити комплексну оцінку технічного стану двигуна і віднести його до одного з класів станів.

Проведення діагностики високовольтних електричних машин на робочій напрузі пов'язане з труднощами які виникають від великої різноманітності конструктивних виконань, фірм виробників і способів підключення до мережі. Це тягне за собою необхідність використовувати різні варіанти знімання сигналів і типи датчиків, стосовно кожного конкретного випадку. Різні підходи до кожного модулю відповідно ускладнюють аналіз їх технічного стану, тому що не працює один з основних методів аналізу – порівняння з однотипним обладнанням. Це ускладнює накопичення даних, не дозволяє узагальнювати результати, отримувати граничні критерії.

Величина ЕРА в ізоляції модуля так само залежить від режиму робіт, найбільша активність в ізоляції статора буває при його пуску, оскільки в цьому випадку обмотка піддається найбільшим електродинамічним впливам. З огляду на велику гаму застосовуваних модулів (заводів виробників, тип ізоляції і т.д.) неможливо дати конкретні критичні величини ЕРА.

У таблиці 1 визначено якісний підхід до оцінки технічного стану електричної машини. Видно, що всі несправності проходять однакові стадії розвитку: поява ознак, стійка фіксація, динамічний розвиток, граничний стан, отже, ця інформація має бути використана при формалізації нечіткої моделі класифікації за параметрами ЕРА.

Найбільш зручний спосіб ідентифікації технічного стану механічних частин високовольтної електричної машини – середньоквадратичне значення віброшвидкості [16]. Згідно з цим параметром, стани модулів поділені на чотири зони.

Зона А. У цю зону потрапляють, як правило, нові машини, які щойно введені в експлуатацію.

Зона В. Машини, які потрапляють до цієї зони, зазвичай вважають придатними для подальшої експлуатації без обмеження термінів.

Зона С. Машини, що потрапляють до цієї зони, зазвичай розглядають як непридатні для тривалої безперервної експлуатації. Зазвичай дані машини можуть функціонувати обмежений період часу, доки з'явиться потрібна можливість проведення ремонтних робіт.

Зона D. Рівні вібрації в цій зоні зазвичай розглядають як досить серйозні, щоб спричинити пошкодження машини.

Таблиця 1 – Класифікація технічного стану суднових електричних машин

	<i>Технічний стан</i>	<i>Норма (Н)</i>	<i>Норма з відхиленнями (НЗВ)</i>	<i>Норма зі значимими відхиленнями (НЗЗВ)</i>	<i>Погіршення (П)</i>
Види дефектів	Коронна активність в обмотці статора	Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку	Перехід у граничний стан
	Часткові розряди в корпусній ізоляції, розряди в кабельній лінії	Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку	Перехід у граничний стан
	Іскріння в контактах у районі клемної коробки	Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку	Перехід у граничний стан
	Пазовий розряд в обмотці статора		Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку
	Розряди в обмотці ротора		Поява ознак явища	Явище фіксується стійко	Є динаміка розвитку
	Іскрові розряди в активній сталі			Поява ознак явища	Явище фіксується стійко

Вібрація конкретної машини залежить від її розмірів, динамічних характеристик віброуючих деталей, способу монтажу і призначення. При виборі зон допустимої вібрації машини необхідно враховувати також умови, що впливають на її вібраційний стан.

Незалежно від типу підшипників середньоквадратичне значення віброшвидкості статорних елементів (наприклад, опор підшипників) машин більшості типів, як правило, адекватно характеризує умови роботи роторів, їх вплив на опорні елементи і сусідні механізми, а також стан самих машин у широкому діапазоні робочих швидкостей.

Згідно ДСТУ ISO 10816-1:2007 всі електричні машини поділяються на наведені нижче чотири класи [16].

Клас 1 – Окремі частини двигунів і машин, з'єднані з агрегатом і працюють у звичайному для них режимі (серійні електричні мотори потужністю до 15 кВт є типовими машинами цієї категорії).

Клас 2 – Машини середньої величини (типові електромотори потужністю від 15 до 875 кВт) без спеціальних фундаментів, жорстко встановлені двигуни або машини (до 300 кВт) на спеціальних фундаментах.

Клас 3 – Потужні первинні двигуни та інші потужні машини з обертовими масами, встановлені на масивних фундаментах, щодо жорстких у напрямку вимірювання вібрації.

Клас 4 – Потужні первинні двигуни та інші потужні машини з обертовими масами, встановлені на фундаменти, щодо податливості в напрямку вимірювання вібрації (наприклад, турбогенератори і газові турбіни з вихідною потужністю понад 10 МВт).

Зразкові межі зон СКЗ віброшвидкості машин різних класів наведені в таблиці 2 [16].

Таблиця 2 – Приблизні межі зон для машин різних класів [16]

$v_{rms}, \text{MM/c}$	Клас 1	Клас 2	Клас 3	Клас 4
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1				
11,2	D	D	D	D
18				
28				
45				

Дані таблиць 1 і 2 є вихідними даними для формалізації нечіткої моделі класифікації технічного стану високовольтних електричних машин [17, 18].

Завданням діагностики є визначення технічного стану об'єкта по спостережуваним проявам дефектів, отже, вхідними даними моделі є види дефектів, а виходами – шуканий стан об'єкта.

Згідно з таблицею 1, за результатами вимірювання параметра ЕРА можна виявити шість несправностей:  $Y_1$  – «Коронна активність в обмотці статора»;  $Y_2$  – «Часткові розряди в корпусній ізоляції розряди в кабельної лінії»;  $Y_3$  – «Іскріння в контактах у районі клемної коробки»;  $Y_4$  – «Пазовий розряд в обмотці статора»;  $Y_5$  – «Розряди в обмотці ротора»;  $Y_6$  – «Іскрові розряди в активній сталі». Розвиток кожного дефекту двигуна проходить наступні стадії: поява ознак явища; явище фіксується стійко; є динаміка розвитку; перехід у граничний стан, отже, в якості перших шести входів нечіткої моделі класифікації технічного стану, задаються несправності, які виявляються по ЕРА з чотирма функціями належності, котрі характеризують стадії розвитку дефекту (рисунки 3).

Перші дві стадії розвитку дефекту дозволяють подальшу експлуатацію об'єкта без обмежень, дві інші вимагають пильної уваги і, можливо, зупинки для ремонту, отже, як інтервалу визначення функції приналежності входів, приймаємо  $[-1; 1]$ . Функції приналежності «Поява» і «Фіксація» задаються на інтервалі  $[-1; 0)$ , який показує, що об'єкт не потребує негайної зупинки. Функції приналежності «Динаміка» і «Границя» задаються на інтервалі  $[0; 1]$ , що показує необхідність зупинки об'єкта.

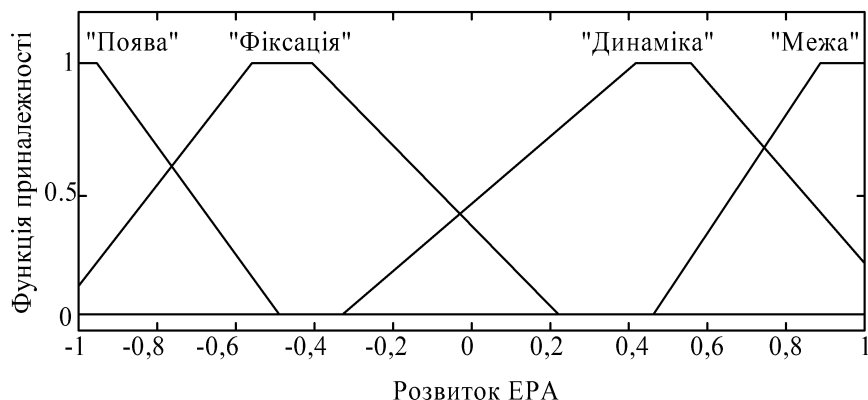


Рисунок 3 – Входи нечіткої моделі класифікації по параметру електророзрядної активності

Згідно з таблицею 2 машина, що належить одному з чотирьох класів може перебувати в зоні А, В, С або D (1). Приклад входу нечіткої моделі класифікації для модуля третього класу представлений на рисунку 4.

$$\begin{aligned}
 A &= (0, 2.8)_0 \cup (0.28, 1.8)_1; \\
 B &= (1.8, 4.5)_0 \cup (2.8, 4.5)_1; \\
 C &= (4.5, 18)_0 \cup (7.1, 11.2)_1; \\
 D &= (11.2, 45)_0 \cup (18, 45)_1.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

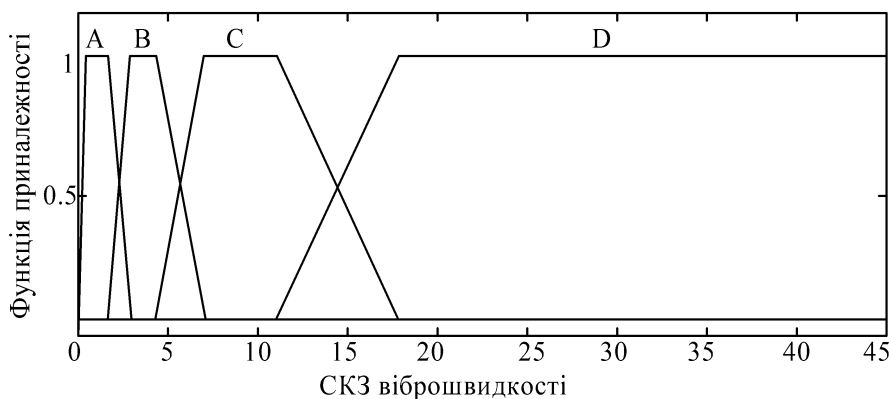


Рисунок 4 – Вхід нечіткої моделі класифікації по СКЗ віброшвидкості

Таким чином, на вхід нечіткої логічної системи подається множина несправностей об'єкта  $\tilde{Y} = \{Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7\}$ , де  $Y_1$  – «Коронна активність в обмотці статора»;  $Y_2$  – «Часткові розряди в корпусній ізоляції розряди в кабельній лінії»;  $Y_3$  – «Іскріння в контактах у районі клемної коробки»;  $Y_4$  – «Пазовий розряд в обмотці статора»;  $Y_5$  – «Іскрові розряди в активній сталі»;  $Y_6$  – «Розряди в обмотці ротора»;  $Y_7$  – «СКЗ віброшвидкості електродвигуна».

Дефекти електродвигуна мають таку класифікацію: «Норма» – відсутність явного дефекту; «Норма з відхиленнями (НЗВ)» – малозначний дефект; «Норма зі значними відхиленнями (НЗЗВ)» – значний дефект; «Погіршення» – критичний дефект; «Передаварійний» – граничний стан. Для завдання виходу  $X$  – «Стан» нечіткої моделі класифікації задаються зазначені п'ять видів стану дефектів.

Підсумковий діагноз за результатами комплексного обстеження визначається відповідно до наступного: якщо ряд застосовуваних методів показує наявність початкової стадії розвитку дефекту (оцінка «НЗВ»), то підсумкова оцінка технічного стану встановлюється за шкалою оцінок на щабель вище (оцінка «НЗЗВ») і т.д. Якщо всі використовувані методи дають оцінку «НЗЗВ», то підсумкова оцінка стану «Погіршення».

Виходячи з цих вимог, нечітка база знань матиме такий вигляд:



діагностування, що дозволяють знайти несправності, що виникли. До таких методів належать: методи спектрального аналізу вібрації [19], споживаного струму двигуна та тепловізорний контроль. Отже, актуальна розробка математичної моделі пошуку несправностей суднових високовольтних електричних машин на основі спільного використання цих методів. Входами моделі є характерні частоти спектрів струму і вібрації, абсолютні і відносні показники температури, виходами – характерні несправності електричної машини.

Спектральний аналіз частотних характеристик струму живлення і вібрації виконується наступним чином. Протягом заданого інтервалу часу роблять запис сигналу значень струмів, які споживаються модулем і вібрації, за допомогою швидких перетворень Фур'є, здійснюють перетворення сигналу в частотний спектр і виділяють частоти, інформативні для пошуку несправностей. Отримані амплітуди характерних частот порівнюють з еталонними, отриманими при дослідженні нового, справного, двигуна в аналогічних умовах. Таким чином, для пошуку несправностей електричної машини за параметрами струму і вібрації необхідно знати перелік несправностей і характерні діагностичні частоти.

Для формалізації нечіткої моделі пошуку несправностей задається вхідний вектор  $\tilde{A} = \{A_i\}$ ,  $i \in [1, n]$  – множина діагностичних параметрів.

Оцінка стану двигуна по амплітудним параметрам здійснюється порівнянням з аналогічними еталонними характеристиками, отже, необхідно провести нормування вхідних параметрів моделей. Відхилення поточних значень параметрів обчислюється за (6):

$$A_i = \frac{a_i - a_{0i}}{a_{0i}}, \quad (6)$$

де  $a_i$  – поточне значення амплітуди,  $a_{0i}$  – відповідний параметр еталонного модуля.

Якщо поточні та еталонні значення збігаються, то  $A_i = 0$ . Якщо  $a_i < a_{0i}$ , то  $A_i < 0$ , отже, відхилення відсутнє і на вхід моделі подається  $A_i = 0$ . У випадку  $a_i > a_{0i}$  значення  $A_i$  покаже перевищення поточного значення параметра щодо еталона. Для параметрів амплітуди спектра струму і вібрації дане значення не повинно перевищувати  $\sqrt{2}$ . Перевищення даного порогу, свідчить про відмову об'єкта.

Вимірювання параметрів вібрації здійснюється в трьох взаємно перпендикулярних напрямках, тому кожна характерна частота, вимірювана в цих напрямках повинна мати окремий вхід. Частоти струму також мають самостійні входи.

Тепловізорний контроль стану електричної машини здійснюється як за результатами абсолютного значення температури в контрольних точках, так і за абсолютним відхиленням параметра. Знімаються термограми статора двигуна з лівого і правого боку, а також із боку виходу повітрообдуву. При справному стані об'єкта картина розподілу ділянок із підвищеною температурою симетрична і регулярна. Локальний перегрів корпусу, свідчить про наявність несправностей.

Абсолютне відхилення температури визначається за формулою (7):

$$\Delta t = a_i - a_{0i}, \quad (7)$$

де  $a_i$  – поточне значення амплітуди,  $a_{0i}$  – відповідний параметр еталонного модуля.

Електрична машина має  $m$  несправностей, які виявляються виміром  $n$  діагностичних параметрів,  $n-5$  з яких виявляються виміром амплітуд струму і вібрації, чотири – абсолютним відхиленням температури в контрольних точках (температура корпусу з боку підшипників; температури води і повітря теплообмінника; щітково-колекторного апарату; статора; клемної коробки), і один – за абсолютними значеннями температури корпусу з боку підшипників.

В якості вхідних параметрів амплітуд спектрів струму і вібрації системи нечіткої логіки використовується множина:  $T_i = \{\text{«Добре»}, \text{«Припустимо»}, \text{«Погано»}\}$ . При цьому кожен із термів буде оцінюватися від 0 до 2.

Вхідні параметри абсолютного значення температури корпусу оцінюються в межах від 0 до 110°C, використовуючи терми {«Добре», «80», «100»}, що характеризують температури прояви несправностей підшипників.

За результатами вимірювань основних визначальних параметрів може виявитися справний, працездатний або непрацездатний стан об'єкта. Перші два стани дозволяють подальшу експлуатацію об'єкта, останній вимагає його зупинки, тому, на вихідній множині  $\tilde{B} = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}$  несправностей модуля на інтервалі  $[-1, 1]$  задаються значення функції приналежності таким чином, що при  $F(A_i) \in [0, 1]$  об'єкт допускається до експлуатації,  $F(A_i) \in [-1, 0)$  об'єкт не допускається до експлуатації. Взаємозв'язок між введеними множинами описується наступними нечіткими правилами.

Загальний вигляд таких правил має наступний вигляд:

$R_1$ : якщо  $A_1 \in \langle \text{Добре} \rangle$  і ...  $A_n \in \langle \text{Добре} \rangle$ , то  $B_j = f_1$ ;

$R_2$ : якщо  $A_1 \in \langle \text{Припустимо} \rangle$  і ...  $A_n \in \langle \text{Припустимо} \rangle$ , то  $B_j = f_1$ ;

$R_3$ : якщо  $A_1 \in \langle \text{Погано} \rangle$  і ...  $A_n \in \langle \text{Погано} \rangle$ , то  $B_j = f_2$ ,

де  $A_i, i \in [1, n]$  – діагностичні параметри;  $B_j, j \in [1, m]$  – несправності об'єкта діагностування;  $f_1$  – висновок «об'єкт допускається до експлуатації»;  $f_2$  – висновок «об'єкт не допускається до експлуатації».

Для перетворення чітких вхідних значень у чіткі вихідні використовується  $n$ -вхідний алгоритм нечіткого логічного висновку Takagi-Sugeno, який має наступний вигляд [18]:

1. Передбачається, що вхідні змінні прийняли деякі конкретні (чіткі) значення  $A_1^0 \dots A_n^0$  і знаходяться рівні «відсікання» для передумов кожного з правил (8):

$$\alpha_j = \max[B(A_j^0)], \quad j \in [1, m]. \quad (8)$$

2. Для кожного правила обчислюються індивідуальні виходи (9):

$$B_j^* = f_1, \quad B_j^* = f_2. \quad (9)$$

3. Для кожного виходу моделі обчислюється агрегатний вихід нечіткої логічної системи (10):

$$b_j^* = \frac{\alpha_1 \cdot B_1^* + \dots + \alpha_m \cdot B_m^*}{\alpha_1 + \dots + \alpha_m}. \quad (10)$$

Розроблена модель дозволяє за результатами аналізу спектрів струму живлення і вібрації електричної машини, а також температурі корпусу знайти несправності об'єкта й оцінити ступінь їх розвитку. Структура визначення технічного стану високовольтної електричної машини на основі описаного методу діагностування наведена на рисунку 5.

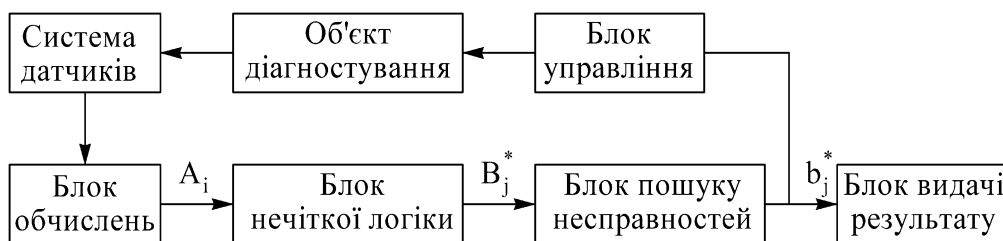


Рисунок 5 – Структурна схема реалізації нечіткого методу пошуку несправностей високовольтних електричних машин

З об'єкта діагностування за допомогою системи датчиків знімаються поточні значення параметрів діагностування, які передаються у блок обчислень та перераховуються у відносні одиниці ( $A_i, i \in [1, n]$ ). Ці значення передаються у блок нечіткої логіки, де відбувається визначення коефіцієнтів розвитку несправностей  $B_j^*, j \in [1, m]$ . Отримані коефіцієнти подаються на вхід блоку пошуку несправностей, де вибираються значення. Виявлені несправності подаються на блок видачі результату. У блок управління подається сигнал на

відключення модуля. Якщо коефіцієнти розвитку всіх несправностей більше або дорівнюють нулю, то результатом є повідомлення про працездатність об'єкта.

**Алгоритм оцінки технічного стану.** Першочерговим завданням технічної діагностики є контроль параметрів, що дозволяє визначити поточний стан об'єкта і віднести його до одного з заздалегідь визначених класів: «Норма», «Норма з відхиленнями», «Норма зі значними відхиленнями», «Погіршення» або «Передаварійне». Для цього необхідно скласти алгоритм оцінки технічного стану, на основі раніше розробленої моделі класифікації технічного стану. Схема даного алгоритму приведена на рисунку 6.

В якості діагностичних параметрів для оцінки технічного стану обрано параметри ЕРА і СКЗ віброшвидкості. Розроблена математична модель має сім входів ( $Y_l, l \in [1,7]$ ), перші шість ( $Y_1 \dots Y_6$ ), які призначені для несправностей, виявлених за ЕРА, сьомий ( $Y_7$ ) – для СКЗ віброшвидкості. Параметр ЕРА проходить наступні стадії розвитку: «Поява ознак явища», «Явище фіксується стійко», «Є динаміка розвитку», «Перехід у граничний стан». У процесі моделювання, кожної з цих стадій були присвоєні значення з інтервалу [-1; 1]: «Поява ознак явища» – «-1», «Явище фіксується стійко» – «-0,5», «Є динаміка розвитку» – «0,5», «Перехід у граничний стан» – «1».

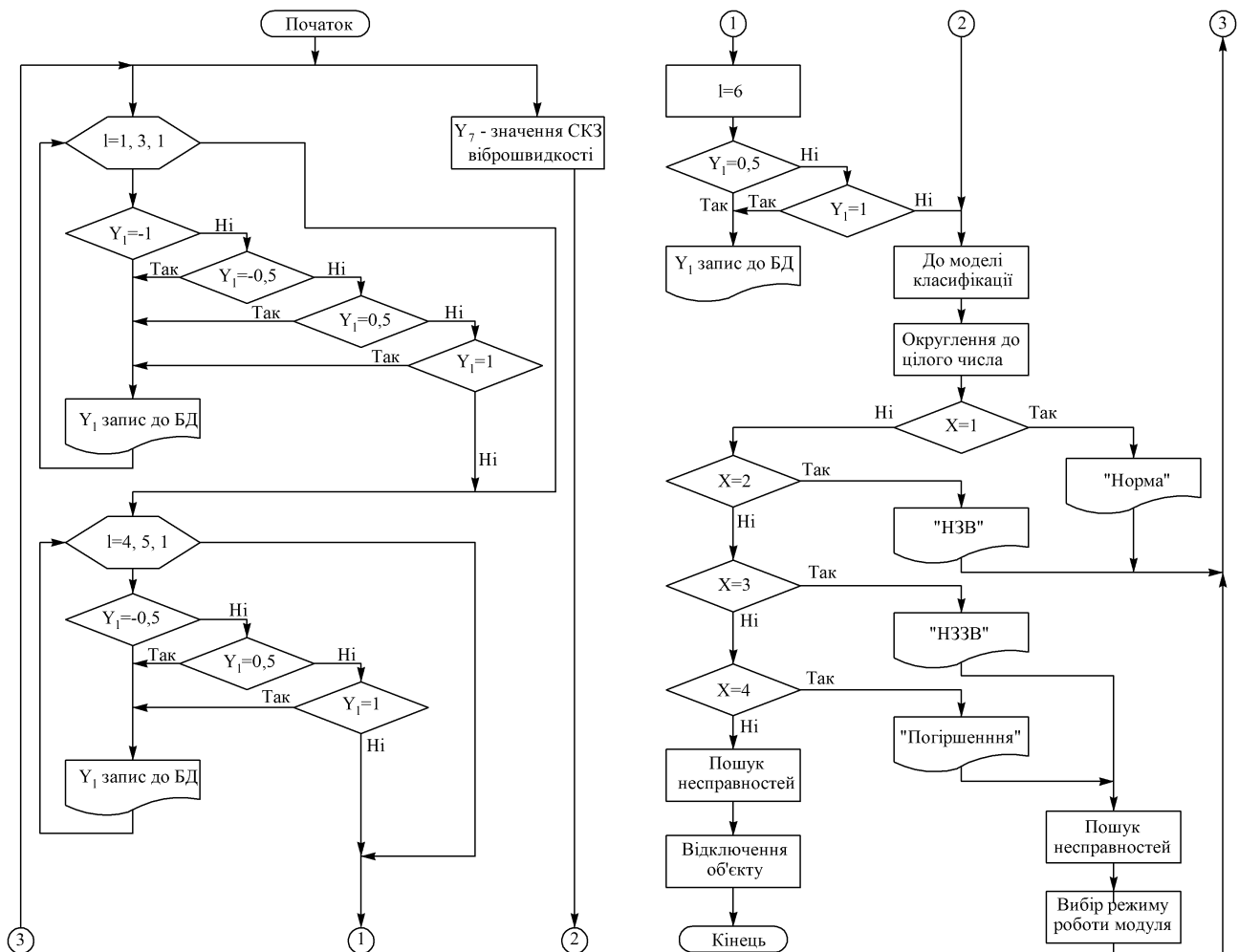


Рисунок 6 – Алгоритм оцінки технічного стану високовольтних електричних машин

**Алгоритм пошуку несправностей.** У разі виявлення стану «Норма зі значними відхиленнями» або «погіршення» необхідно здійснити пошук несправностей. Для цього розроблено нечітку модель пошуку несправностей, що дозволяє за результатами спектрального аналізу споживаного струму і вібрації машини, а також тепловізорного контролю визначити несправності об'єкта. Пошук несправностей здійснюється за  $n$

параметрів  $n-5$  з яких амплітуди струму і вібрації на характерних частотах, чотири – відхилення температури й один – за абсолютним значенням температури корпусу. Оцінка стану за параметрами амплітуди на характерних частотах визначається за відносним відхиленням поточного спектра від еталонного. Чотири входи моделі використовують абсолютне відхилення параметрів температури.

Алгоритм функціонує наступним чином. Здійснюється вимір спектрів струму живлення і вібрації в трьох взаємно перпендикулярних напрямках, виділяються амплітуди на характерних частотах. З бази даних (БД) вибираються амплітудні значення струму і вібрації на відповідних частотах і знаходяться відносні відхилення параметрів, які заносяться в БД. Далі здійснюється вимір температури корпусу в районі підшипників, яка також заноситься в БД. Далі вимірюються значення температури в чотирьох контрольних точках. З БД вибираються відповідні значення температури еталонного об'єкта і розраховуються абсолютні відхилення. Отримані дані підставляються в модель пошуку несправностей, виходом якої є  $m$  несправностей об'єкта. Проводиться оцінка отриманих коефіцієнтів розвитку несправностей і вибір тих несправностей, коефіцієнти якого негативні. Результатом роботи алгоритму є перелік несправностей, що виникли.

**Основні результати та їх обговорення.** Запропонована система комплексного функціонального діагностування високовольтних електричних машин дозволить виявляти несправності та визначати дефекти в процесі експлуатації. Метод класифікації технічного стану та алгоритм пошуку несправностей суднових високовольтних електричних машин побудовані із застосуванням нечіткої логіки. Такий підхід дозволяє визначити поточний технічний стан об'єкта та відключити його в разі передаварійного стану. Подальший аналіз результатів теплового контролю, спектрального аналізу струму живлення і вібрації визначити причини відмови. Результати проведеного дослідження показали можливість усунення недоліків методів діагностики електричних машин, що наведені в частині «Аналіз останніх досліджень та публікацій». Обрана сукупність діагностичних параметрів дозволяє компенсувати недоліки одних методів перевагами інших. Дослідження потребує продовження з метою уточнення моделей, забезпечення працездатності на реальних параметрах працюючих високовольтних електричних машин.

**Висновки.** Проведений аналіз досліджень та публікацій показав велику кількість різних методів діагностики електричних машин.

Для здійснення технічного діагностування високовольтного електрообладнання доцільно застосовувати методи та засоби функціонального комплексного діагностування при яких перевірка здійснюється в робочому режимі і не призводять до простою об'єкта.

Визначена ефективна сукупність діагностичних параметрів, що включає аналіз електророзрядної активності (ЕРА), вібраційний, струмовий і тепловізорний види контролю.

Отримано нечітку модель і метод класифікації технічного стану високовольтних електричних машин, що дозволяють, за результатами вимірювання параметрів електророзрядної активності та СКЗ віброшвидкості визначити технічний стан об'єкта, віднісши його до одного з п'яти класів станів.

Розроблена модель пошуку несправностей, реалізована за допомогою апарату нечіткої логіки, що дозволяє по виміряним значенням амплітуд струму і вібрації на характерних частотах, а також температури в контрольних точках, виявити несправності об'єкта.

Розроблено алгоритм оцінки технічного стану, що дозволяє за результатами вимірювання параметрів електророзрядної активності і СКЗ віброшвидкості, за допомогою апарату нечіткої логіки, визначити поточний технічний стан об'єкта та, у разі передаварійного стану, відключити об'єкт.

Запропоновано алгоритм пошуку несправностей суднових високовольтних електричних машин, що дозволяє за результатами тепловізорного контролю і спектрального аналізу струму живлення і вібрації за допомогою нечіткої логічної моделі, визначити причини відмови об'єкта.

**Перспективи подальших досліджень.** У найближчій перспективі є необхідність перевірки адекватності моделей функціонування запропонованих алгоритмів реальним статистичним даним, що знято з конкретного працюючого обладнання на судні та відповідного корегування моделі пошуку несправностей. Подальші дослідження доцільно спрямувати для використання запропонованих методів і засобів діагностування, розроблених моделей та алгоритмів для побудови єдиного комплексу функціонального діагностування всіх потужних високовольтних машин у робочому режимі на судні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Будашко В. В. Високовольтні технології в морській електроінженерії: монографія / В. В. Будашко, О. М. Піпченко, В. В. Пономаренко, В. А. Шевченко. Одеса: НУ «ОМА», 2020. 398 с.
2. Іванов А. А., Тимофеев К. В., Авраменко М. М., Растьогіна Г. І. Тренажер високовольтного обладнання для підготовки суднових фахівців. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2019. № 1 (20). С. 20–29.
3. Electro-technical officer. Model course 7.08, International Maritime Organization, London. 2014. 181 p.
4. SOLAS. Consolidated Edition. London: International Maritime Organization, 2020. 588 p.
5. Чорний О. П., Зачепа Ю. В., Титюк В. К., Чорна О. А. Моніторинг і діагностика електромеханічних об'єктів : навчальний посібник. Кременчуг. 2019. 122 с.
6. Ma F., Qi L., Ye S., Chen Y., Xiao H., Li S. Research on fault diagnosis algorithm of ship electric propulsion motor. Appl. Sci. 2023, 13, 4064.
7. Електропривод і автоматизація: Навчальний посібник / О. Ю. Синявський, П. І. Савченко, В. В. Савченко, Ю. М. Лавріненко, В. В. Козирський, Ю. М. Хандола, І. П. Льїчов, В. Ю. Рамш, В. Я. Бунько; За ред. О. Ю. Синявського. 2-е вид., доп і перероб., Київ, 2015. 604 с.
8. Gegenava A., Khazanov A. Statistical review of voltage endurance test of insulation for high voltage rotating machines stator windings with combined standard and accelerated tests. "Three Steps Test" TST. In Proceedings of the 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Quebec City, QC, Canada, 18–21 June 2023; pp. 1–4.
9. Jiang B.; Huang X.; Liu Y.; Nategh, S. Accelerated destructive experiment design of motor stator winding insulation systems. In Proceedings of the 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Modena, Italy, 8–9 April 2021; pp. 225–230.
10. IEC 60034-18-31-2012; Rotating Electrical Machines Part 18–31: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Thermal Evaluation and Classification of Insulation Systems Used in Rotating Machines. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012; p. 15.
11. IEC 60034-18-32-2022; Rotating Electrical Machines Part 18–32: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Evaluation by Electrical Endurance. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2022; p. 15.
12. IEC 60034-18-33-2010; Rotating Electrical Machines Part 18–33: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Multifactor Evaluation by Endurance Under Simultaneous Thermal and Electrical Stresses. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2010; p. 11.
13. IEC 60034-18-34-2012; Rotating Electrical Machines Part 18–34: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Evaluation of Thermomechanical Endurance of Insulation Systems. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012; p. 12.
14. Seri P., Ghosh R., Montanari G. C. An unsupervised approach to partial discharge monitoring in rotating machines: Detection to diagnosis with reduced need of expert support. IEEE Trans. Energy Convers. 2021, 36, 2485–2492.

15. Xu X., Yan X., Yang K., Zhao J. Ю., Sheng C., Yuan C. Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems. *Transp. Saf. Environ.* 2021, 3, 85–102.
16. ДСТУ ISO 10816-1:2007. Вібрація. Контроль стану машин за наслідками вимірювань вібрації на частинах, що не обертаються. Частина 1. Загальні вимоги.
17. Han J., Li X. D., Yu D. Yet al. Application of rough set based fuzzy neural network in fault diagnosis. *J Hefei Univ Technol Nat Sci.* 2012; 35:577–80.
18. Balasubramaniam P. and Ramesh Babu N. *Fuzzy Logic Controllers and Applications.* eBook (PDF) ISBN 978-0-85014-875-6. 2025 p.126.
19. Sano T. Diagnostic Frequency Response Analysis (FRA) Techniques for Faults in Transformers. *MEIDEN REVIEW*, vol. 7, no. 1, pp. 28–33, 2015.

## REFERENCES

1. Budashko, V. V. (2020). *Vysokovoltni tekhnolohii v morskii elektroinzhenerii: monografiia* / V. V. Budashko, O. M. Pipchenko, V. V. Ponomarenko, V. A. Shevchenko. Odesa: NU «OMA», 398 s.
2. Ivanov, A. A., Tymofeiev, K. V., Avramenko, M. M., Rastohina, H. I. (2019). *Trenazher vysokovoltного obladnannia dlia pidhotovky sudnovykh fakhivtsiv.* *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii.* 2019. № 1 (20). S. 20–29.
3. *Electro-technical officer.* (2014). *Model course 7.08,* International Maritime Organization, London. 181 p.
4. *SOLAS (2020). Consolidated Edition.* London: International Maritime Organization, 588 p.
5. Chorni, O. P., Zachepa, Yu. V., Tytiuk, V. K., Chorna, O. A. (2019). *Monitorynh i diahnostyka elektromekhanichnykh ob'ektiv : navchalnyi posibnyk.* Kremenchuh. 122 s.
6. Ma, F., Qi, L., Ye, S., Chen, Y., Xiao, H., Li, S. (2023). Research on fault diagnosis algorithm of ship electric propulsion motor. *Appl. Sci.* 13, 4064.
7. *Elektropryvod i avtomatyzatsiia* (2015). *Navchalnyi posibnyk* / O. Iu. Syniavskiy, P. I. Savchenko, V. V. Savchenko, Yu. M. Lavrinenko, V. V. Kozyrskiy, Yu. M. Khandola, I. P. Ilichov, V. Iu. Ramsh, V. Ia. Bunko; Za red. O. Iu. Syniavskoho. 2-e vyd., dop i pererob., Kyiv. 604 s.
8. Gegenava, A., Khazanov, A. (2023). Statistical review of voltage endurance test of insulation for high voltage rotating machines stator windings with combined standard and accelerated tests. “Three Steps Test” TST. In *Proceedings of the 2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Quebec City, QC, Canada,* pp. 1–4.
9. Jiang, B., Huang, X., Liu, Y., Nategh, S. (2021). Accelerated destructive experiment design of motor stator winding insulation systems. In *Proceedings of the 2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Modena, Italy,* pp. 225–230.
10. IEC 60034-18-31-2012; *Rotating Electrical Machines Part 18–31: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Thermal Evaluation and Classification of Insulation Systems Used in Rotating Machines.* International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012; p. 15.
11. IEC 60034-18-32-2022; *Rotating Electrical Machines Part 18–32: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Evaluation by Electrical Endurance.* International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2022; p. 15.
12. IEC 60034-18-33-2010; *Rotating Electrical Machines Part 18–33: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Multifactor Evaluation by Endurance Under Simultaneous Thermal and Electrical Stresses.* International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2010; p. 11.
13. IEC 60034-18-34-2012; *Rotating Electrical Machines Part 18–34: Functional Evaluation of Insulation Systems Test Procedures for Form-Wound Windings Evaluation of Thermomechanical Endurance of Insulation Systems.* International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2012; p. 12.

14. Seri, P., Ghosh, R., Montanari, G.C. (2021). An unsupervised approach to partial discharge monitoring in rotating machines: Detection to diagnosis with reduced need of expert support. *IEEE Trans. Energy Convers*, 36, 2485–2492.
15. Xu, X., Yan, X., Yang, K., Zhao, J., Sheng, C., Yuan, C. (2021). Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems. *Transp. Saf. Environ*, 3, 85–102.
16. DSTU ISO 10816-1:2007. Vibratsiia. Kontrol stanu mashyn za naslidkamy vymiriuvan vibratsii na chastynakh, shcho ne obertaiutsia. *Chastyna 1. Zahalni vymohy*.
17. Han, J., Li, X. D., Yu, D.Y. et al. (2012). Application of rough set based fuzzy neural network in fault diagnosis. *J Hefei Univ Technol Nat Sci*. 35:577–80.
18. P. Balasubramaniam and N. Ramesh Babu. *Fuzzy Logic Controllers and Applications*. eBook (PDF) ISBN 978-0-85014-875-6. 2025 p. 126.
19. Sano, T. (2015). Diagnostic Frequency Response Analysis (FRA) Techniques for Faults in Transformers. *MEIDEN REVIEW*, vol. 7, no. 1, pp. 28–33.

**Tymofeiev K. V., Voronenko S. V., Lebedenko Y. O. FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF SHIPBOARD HIGH-VOLTAGE ELECTRICAL MACHINES**

*The article is devoted to the development of methods for the functional diagnostics of high-voltage electrical machines and their practical application in maritime transport. An analysis of the main approaches to the development of diagnostic techniques and tools for electrical machines demonstrates the feasibility of using integrated functional diagnostics. The set of diagnostic parameters must meet the requirements of completeness of description of all classes of defects, maximum sensitivity to changes in the values of structural parameters, minimum composition, accessibility for control and measurement, minimum cost and time of control and measurement, sufficient resolution in recognizing individual defects. The analysis of diagnostic parameters made it possible to form an effective set that includes parameters of vibration, temperature, current consumption and capacitance, and electro-discharge activity. The most effective application of these methods is the joint use of an integrated diagnostic system.*

*An algorithm for the complex functional diagnostics of shipboard high-voltage electrical machines has been developed. The structure for the system for diagnosing the technical condition is proposed, which allows to implement the developed diagnostic algorithm and is characterized by constructive simplicity and reliability. The complex diagnostics of high-voltage electrical machines can be formalized by means of models of classification of the technical condition and fault finding based on the results of classification. A fuzzy model for classifying the technical condition in the form of predicate rules has been developed, which allows determining the technical condition of an object based on the results of measuring the parameters of electrical discharge activity and the rms value of vibration velocity. Five classes of technical condition of the object are defined: "Normal", "Normal with deviations", "Normal with significant deviations", "Deterioration" or "Pre-emergency". A fault detection model was developed and implemented using fuzzy logic.*

*The model makes it possible to detect faults in an object based on the measured values of current and vibration amplitudes at characteristic frequencies, as well as temperatures at control points. A method using a fuzzy model is proposed that searches for faults by the relative deviations of current and vibration amplitudes at characteristic frequencies, as well as temperatures at control points. The algorithm for assessing the technical condition allows to determine the current technical condition of the facility using a fuzzy logic apparatus based on the results of measuring the parameters of electrical discharge activity and the root mean square value of vibration velocity. In the case of a pre-emergency condition, a signal is generated to shut down the electrical machine. The algorithm for fault detection of shipboard high-voltage electrical machines is applied on a fuzzy logic model. The algorithm determines the causes of electrical machine failure based on the results of thermal imaging and spectral analysis of the supply current and vibration.*

**Key words:** diagnostics; electrical machine; defect; technical condition; measurement; electrical discharge activity; vibration; spectrum; fuzzy logic; model.

© Тимофеев К. В., Вороненко С. В., Лебеденко Ю. О.

Статтю прийнято до редакції 19.05.2025

***MATEPIAJO3HABCTBO***

***MATERIALS SCIENCE***

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ВИРОБІВ З НОВИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

**Проценко В. О.**, д.т.н., професор, професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: 1904pvo@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3468-4952;

**Касян О. А.**, аспірант кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: kasyan.aleksey@ukr.net, ORCID: 0009-0008-2039-6096.

*Стаття стосується техніко-економічного обґрунтування застосування виробів з нових композитних матеріалів. Обґрунтовано структуру собівартості композитних виробів, що включає вартість матеріалів, наповнювачів, армування, оброблення стаціонарними чи змінними фізичними полями, механічного оброблення. Витрати на виконання кожної операції включають оплату праці робітників, витрати на оплату електроенергії, амортизації обладнання, експлуатаційних та інших цехових витрат. Наведені вирази, які можна використовувати на практиці для визначення складових собівартості композитного виробу. Для ілюстрації виконано співставлення виготовлення втулок дейдвудних підшипників з капролону наповненого графітом, капролону наповненого графітом та дисульфідом молібдену, а також з епоксидного композиту наповненого графітом та поліамідом. Отримані вирази для розрахунку трудомісткості та вартості виготовлення втулок з цих матеріалів залежно від їхніх розмірів. Результати розрахунків показали, що вартості втулок з усіх трьох аналізованих матеріалів є цілком співставними величинами одного порядку, що в умовах одиничного виробництва судноремонтного підприємства робить витрати на виготовлення для всіх варіантів рівнозначними. Показано, що у випадку застосування втулок з капролону наповненого графітом та фісульфідом молібдену, кількість ремонтів з докуванням судна за термін його використання буде майже в 6 разів меншою ніж при застосуванні втулок з епоксидного композиту, що є ключовим фактором для вибору матеріалу, оскільки зменшує кількість простоїв судна в доку та собівартість перевезення тони вантажу. Представлена методика розрахунку може бути використана інженерами при обґрунтуванні вибору матеріалу та корисна аспірантам для співставлення отриманих результатів з дослідженнями інших авторів.*

*Ключові слова:* композитний матеріал; собівартість; оброблення; економічна доцільність; якість.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.118-131**

**Вступ.** Композитні матеріали існують з давніх часів, їх створила сама природа, що підкреслює їх перспективність. Найвідомішим композитом є деревина, що містить довгі целюлозні волокна, які утримуються вкупі та взаємодіють завдяки набагато слабшій механічно речовині – лігніну. Таким чином, у деревині дві речовини з низькою міцністю, лігнін та целюлоза, сукупно утворюють набагато міцнішу речовину. Композитами є кістки людського тіла (фосфат кальцію + колаген), та в ширшому розумінні саме людське тіло. Нашими предками композити здавна використовувались перш за все у будівництві, достатньо згадати поєднання соломи та глини, а згодом і залізобетону, використовувались для полювання та у військових діях (дамаська сталь), тепер їх використовують у найбільш прогресивних галузях виробництва, зокрема літаків та аерокосмічної техніки.

У сучасному розумінні, композитні матеріали, що застосовують у техніці, умовно ділять на такі класи [1]:

– полімерні матричні композити – зазвичай термореактивні смоли (епоксидні, поліамідні чи поліефірні) або термопласти, армовані склом, вуглецем, бором або арамідними (кевларовими) волокнами, керамічними монокристаллами або, останнім часом, металевими волокнами. Вони в основному використовуються в умовах, що передбачають відносно низькі робочі температури (як правило, до 400°C).

– металоматричні композити – найчастіше на основі алюмінієвих, магнієвих, титанових або мідних сплавів, в які вводяться борові, вуглецеві (графітові) або керамічні волокна (зазвичай оксид алюмінію або карбід кремнію). Робоча температура таких матеріалів рідко перевищує більше ніж 800°C. Температура обмежується границею

розм'якшення або плавлення, що характеризує матеріал матриці. Якщо передбачуване застосування передбачає високі температури, то як матрицю застосовують сплави на основі нікелю та ін. [2];

– композити з керамічною матрицею, що розроблені спеціально для застосування за високих робочих температур понад 1000°C. Широко використовуються: карбід кремнію (SiC), оксид алюмінію (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) та скло, а поширеними армуючими волокнами також є керамічні матеріали;

– вуглець-вуглецеві композити, що містять вуглецеву або графітову матрицю, армовану волокнами чи графітовими тканинами, що забезпечує стійкість до надвисоких температур близько 3000°C, що сукупно з низькою щільністю та низьким коефіцієнтом теплового розширення робить їх дуже прогресивними. Найпоширенішими волокнистими композитами є матеріали на основі вуглецевого волокна, скловолокна та кевлару.

Враховуючи велику різноманітність матеріалів, очевидно, що існує багато критеріїв для їх класифікації, і згадані вище – лише деякі з них. Велике різноманіття матеріалів ускладнює задачу їх вибору для тих чи інших умов. Особливо це стосується полімерних композитів, як широко розповсюджених у техніці, і тому є фокусом досліджень багатьох науковців.

**Аналіз публікацій.** У структурі експлуатаційних витрат для засобів транспорту значну частину займають витрати на технічне обслуговування та ремонт, які залежать від його періодичності та можуть бути достатньо трудомісткими [3]. На цей показник впливає в свою чергу довговічність таких, на перший погляд простих елементів як ущільнення, довговічність яких залежить як від розподілу навантажень [4], так і від опору зношуванню матеріалу. Так, на періодичність докування судна впливає зносостійкість матеріалу ущільнень та втулок дейдвудних підшипників, причому вартість самих цих виробів є незначною порівняно з вартістю докування. Те саме стосується авіап перевезень, де значний вплив на прибутковість авіакомпаній мають витрати на обслуговування та експлуатацію парку, що підкреслює важливість застосування матеріалів із високими показниками, що здатні зменшити потреби в обслуговуванні та підвищують строк служби елементів повітряних суден, оскільки зниження частоти та тривалості технічного обслуговування підвищує доступність літаків та мінімізує перерви в розкладі рейсів [5]. Такий підхід до вибору витратних елементів при технічному обслуговуванні дає можливість авіакомпаніям підсилити свою конкурентоспроможність внаслідок оптимізації витрат [6]. Зокрема, оцінка потреби технічного обслуговування та супутніх витрат є визначальною для прийняття рішень про заміну матеріалів деталей газотурбінних двигунів літальних апаратів з метою зменшення ризиків під час виконання польотів [7, 8]. З цією ж метою розробляються методи техніко-економічного аналізу композитів із керамічною матрицею [9].

Застосування полімерних композитів часто дозволяє отримати достатньо швидкі рішення по отриманню фізичних моделей при виконанні наукових досліджень [10] чи ремонту, де виробництво є одиничним і не потребує детального техніко-економічного обґрунтування. У випадку ж застосування у серійному чи масовому виробництві ресурсоемних композитних виробів на основі полімерів, що потребують дорожчих вихідних матеріалів, значних витрат енергії та праці на оброблення, виконання техніко-економічного аналізу є необхідним.

**Постановка проблеми.** Значна кількість досліджень в галузі матеріалознавства стала джерелом розроблення і вивчення властивостей нових матеріалів, на шляху впровадження яких часто знаходиться ресурсоемність композиції, енергоємність чи трудомісткість запропонованої технології, низькі експлуатаційні показники готових виробів та ін. З огляду на наявність явного дослідницького пробілу в галузі техніко-економічного обґрунтування доцільності застосування нових композитних матеріалів, що підкреслюється відсутністю такого обґрунтування у значній кількості захищених дисертацій з матеріалознавства, існує потреба у розробленні методології його виконання для виведення нових розроблюваних матеріалів з лабораторій у сферу реального використання.

**Метою роботи** є розроблення методики визначення собівартості виробів з матеріалів типу полімерних композитів для спрощення прийняття рішення про впровадження того чи іншого виробу шляхом виконання техніко-економічного аналізу.

**Задачі роботи:**

- обґрунтувати структуру собівартості виробів з композиційних матеріалів на прикладі полімерних епоксикомпозитів;
- навести вирази для обчислення основних витрат, що формують собівартість таких виробів;
- виконати розрахунки та порівняння собівартості виробів з композитних матеріалів на прикладі втулок дейдвудних підшипників урахувавши такі критерії як трудомісткість виготовлення, вартість та довговічність.

**Виклад основного матеріалу.** Вартість виготовлення  $B_{KB}$  виробу з композитного матеріалу (грн/шт.) можна обчислити як суму вартості матеріалів  $B_M$  та вартості оброблення  $B_O$  (1).

$$B_{KB} = B_M + B_O. \quad (1)$$

До вартості матеріалів (для випадку композитів на основі рідких смол) (2) входить вартість віднесених до одного виробу матеріалу матриці  $B_{MM}$ , вартість матеріалу твердника  $B_{MT}$ , вартість матеріалу наповнювача(ів)  $B_{MH}$ , матеріалу армування(нь)  $B_{MA}$  та ливарної форми  $B_\Phi$  за відрахуванням вартості  $B_{MB}$  матеріалу відходів (у випадку складності утилізації цю вартість необхідно додавати):

$$B_M = \sum_{i=1}^n B_{Mi} - B_{MB} = B_{MM} + B_{MT} + B_{MH} + B_{MA} + B_\Phi - B_{MB}. \quad (2)$$

Технологія оброблення може включати вплив на виріб стаціонарних (температурне, електричне, силове та ін.) чи змінних (магнітно-імпульсне, ультрафіолетове та ін.) фізичних полів, а також механічне оброблення різанням, тиском і т.п., загалом на  $n$  операціях із відповідною вартістю  $B_{OсФП}$ ,  $B_{OзФП}$ ,  $B_{OМ}$  (3).

$$B_O = B_{OсФП} + B_{OзФП} + B_{OМ}. \quad (3)$$

Після підстановки (2) та (3) у (1), матимемо вираз (4):

$$\begin{aligned} B_{KB} &= \{B_{MM} + B_{MT} + B_{MH} + B_{MA} + B_\Phi - B_{MB}\} + B_{OсФП} + B_{OзФП} + B_{OМ} = \\ &= \{B_{MM} + B_{MT} + B_{MH} + B_{MA} + B_\Phi - B_{MB}\} + \sum_{j=1}^n B_{Oj} = \{B_K + B_\Phi - B_{MB}\} + \sum_{j=1}^n B_{Oj} =. \end{aligned} \quad (4)$$

Вартість матеріалів можна оцінити як:

$$B_{Mi} = m_{Mi} \times C_{Mi}, \quad (5)$$

де  $m_{Mi}$  – маса  $i$ -го матеріалу (матриці, твердника, наповнювача, армування, відходів), кг;

$C_{Mi}$  – ціна  $i$ -го матеріалу, грн/кг.

У випадку застосування композитів, де задано масові частки кожного компонента  $q_{mi}$  їх ціну та їх густину  $\rho_{mi}$  вартість композиції рахувати за виразом:

$$\left\{ \begin{aligned} B_K &= B_{MM} + B_{MT} + B_{MH} + B_{MA} = \rho_{зв} V_\epsilon C_{зв}; \\ \rho_{зв} &= \sum_{i=1}^n \rho_{mi} q_{mi} / \sum_{i=1}^n q_{mi}; \\ C_{зв} &= \sum_{i=1}^n C_{mi} q_{mi} / \sum_{i=1}^n q_{mi}. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Вартість оброблення  $B_O$  на  $j$ -тій операції, у загальному випадку є сумою оплати праці робітника  $B_{OПР}$ , вартості електроенергії  $B_{EH}$ , амортизації обладнання  $AM$ , експлуатаційних

витрат  $B_E$  (технічне обслуговування та ремонт обладнання, інструменту, оснащення, витратні матеріали і т.ін.). Сюди також необхідно додати інші цехові витрати  $B_{ЦВ}$  (на утримання та обслуговування виробничих площ, забезпечення охорони праці та т.д.).

$$B_{Oj} = B_{ОПРj} + B_{ЕНj} + AM_j + B_{Ej} + B_{ЦВj}; \quad (7)$$

$$B_{ОПРj} = \frac{12 \times 3П_{робj} + ОВ_{робj}}{\PhiРЧ_{робj}} \times \frac{T_{шкj}}{60n_{ej}} \times \left[ 1 + \frac{ССВ}{100} \right]; \quad (8)$$

$$B_{ЕНj} = \frac{P_j \times t_{oj}}{60n_{ej}\eta_j} \times Ц_{ЕНj}; \quad (9)$$

$$AM_j = \frac{B_{облj}}{T_{викj} \times \PhiРЧ_{облj}} \times \frac{t_{oj}}{60n_{ej}}, \quad (10)$$

де  $P_j$  – потужність, що витрачається на оброблення, кВт;

$t_{oj}$  – основний час оброблення, хв;

$n_{ej}$  – кількість одночасно оброблюваних виробів, шт.;

$\eta_j$  – коефіцієнт корисної дії обладнання;

$Ц_{ЕН}$  – ціна електроенергії грн/(кВт×год);

$3П_{робj}$  – величина середньомісячної оплати праці відповідного робітника, грн;

$ОВ_{робj}$  – величина оплати відпустки робітника, грн;

$\PhiРЧ_{робj}$  – річний фонд робочого часу робітника год/рік;

$T_{шкj}$  – штучно-калькуляційний час (враховує оперативний час та підготовчо-заклучний час на налагодження обладнання), хв;

$ССВ = 22\%$  – єдиний соціальний внесок для фізичних осіб-підприємців;

$B_{облj}$  – вартість обладнання (з інструментом та оснащенням), грн;

$T_{викj}$  – термін використання обладнання, років (наприклад, для металорізальних верстатів зазвичай приймається 6...10 років);

$\PhiРЧ_{облj}$  – річний фонд робочого часу обладнання год/рік.

У випадку наявності даних з досвіду виробництва, можна брати замість  $T_{шк} = \phi_{нз} t_o$ , де  $\phi_{нз}$  – коефіцієнт, що враховує наявність підготовчо-заклучного часу (залежить від виду оброблення, застосованого обладнання та оснащення) [11].

Експлуатаційні витрати обчислюються наступним чином [12]:

$$B_{Ej} = B_{ТОj} + B_{Pj} + B_{ВМj} + B_{Юj} + B_{РПj}, \quad (11)$$

де  $B_{ТОj}$  – витрати на технічне обслуговування обладнання, зведені до вартості однієї деталі, грн/шт.;

$B_{Pj}$  – витрати на ремонт обладнання, зведені до вартості однієї деталі, грн/шт.;

$B_{ВМj}$  – вартість витратних матеріалів, зведена до вартості однієї деталі, грн/шт.;

$B_{Юj}$  – витрати на експлуатацію інструмента та оснащення, зведені до вартості однієї деталі, грн/шт.;

$B_{РПj}$  – витрати на розроблення та впровадження програм для роботи обладнання, зведені до вартості однієї деталі, грн/шт.

Експлуатаційні витрати  $B_E$  та інші цехові витрати  $B_{ЦВ}$  (залежно від рівня ощадності та організації виробництва) орієнтовно становлять 75...150% (на підприємствах із менш досконалим виробничим процесом цей відсоток може бути більшим) від величини оплати праці робітника  $B_{ОПР}$  [12...14]. З урахуванням цього, вираз (7) для розрахунку вартості оброблення на  $j$ -ій операції подамо у вигляді, зручному для практичного використання:

$$B_{Oj} = (1, 75...2, 50)B_{ОПРj} + B_{ЕНj} + AM_j. \quad (12)$$

Застосування показаної методики будемо розглядати на прикладі виготовлення втулок дейдвудних підшипників (рис. 1) із матеріалів, застосування яких розглянуто в роботах

[15...17], а їх основні властивості зведено в табл. 1. У подальших викладках використовуватимемо коефіцієнти довжини  $k_1 = l/D$  та діаметрів  $k_2 = d/D$  ( $D$  – зовнішній діаметр втулки;  $d$  – діаметр отвору втулки;  $l$  – довжина втулки).

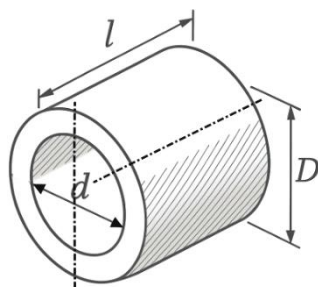


Рисунок 1 – Ескіз втулки дейдвудного підшипника (спрощено)

Таблиця 1 – Характеристики порівнюваних матеріалів

Позначення матеріалу	Найменування матеріалу	Модуль пружності $E$ , ГПа	Густина $\rho_m$ , кг/мм <sup>3</sup>	Ціна $C_m$ , грн/кг
$M1$	Капролон ПА-6МГ, наповнений графітом [15]	1,2...1,6	$1,17 \times 10^{-6}$	280
$M2$	Капролон ПА-6МДМ, наповнений графітом та дисульфідом молібдену [16]	1,6...2,0	$1,22 \times 10^{-6}$	340
$M3$	Матеріал ЕКМ-3 [17] ( $\Sigma q = 220$ мас.ч.):	5,0...6,0	$\rho_{зв} = 1,75 \times 10^{-6}$	$C_{зв} = 270$
	Смола: Ероху 525 ( $q_{m1} = 100$ мас.ч.)		$1,20 \times 10^{-6}$	300
	Твердник: ПЕПА ( $q_{m2} = 5$ мас.ч.)		$1,00 \times 10^{-6}$	600
	Твердник: Telolit 410 ( $q_{m3} = 5$ мас.ч.)		$1,00 \times 10^{-6}$	1100
	Наповнювач 1: графіт АГ 1500 ( $q_{m4} = 60$ мас.ч.)		$2,90 \times 10^{-6}$	280
	Наповнювач 2: перліт ( $q_{m5} = 20$ мас.ч.)		$2,30 \times 10^{-6}$	50
	Наповнювач 3: поліамід ПА-6 ( $q_{m6} = 30$ мас.ч.)		$1,15 \times 10^{-6}$	100
<i>Примітка:</i> вартості матеріалів взято з відкритих джерел.				

За умови співвідношення для матеріалів  $M1$  та  $M2$  вартості матеріалу та вартості відходів  $B_6/B_m = 0,25$ , витрати на матеріал (з урахуванням 10% запасу на незворотні втрати матеріалу та ін.) можуть бути визначені згідно виразу:

$$B_m = 1,1 \times 0,785 \rho_m \frac{k_1}{k_2^3} d^3 (1 - 0,25 k_2^2) C_m. \quad (13)$$

Для матеріалів  $M1$  та  $M2$  оброблення передбачається тільки механічне в одну операцію ( $j = 1$ ) на токарно-гвинторізному верстаті за дві установи, що включає, підрізання торця, зовнішнє точіння по діаметру  $D$ , свердління, розсвердлювання та розточування отвору  $d$ , відрізання деталі від прутка, підрізання протилежного торця. Режими різання для обох матеріалів  $M1$  та  $M2$  вважали однаковими. Для нормування операції використовували емпіричні співвідношення, наведені у [11] ( $\phi_{пз} = 2,14$ ). Результати, перетворені відносно внутрішнього діаметра та коефіцієнтів  $k_1$ ,  $k_2$ , дали можливість отримати вирази для основного та штучно-калькуляційного часу:

$$t_{o1} = 0,17 \frac{d^2}{k_2} (2 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.}; \quad (14)$$

$$T_{\text{шк1,2}} = 0,36 \frac{d^2}{k_2} (2 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.} \quad (15)$$

У подальших перетвореннях нехтували витратами на електроенергію ( $B_{EH} = 0$ ) та амортизацію ( $AM = 0$ ), віднісши їх до інших цехових витрат, оскільки перші незначні, а другі в цьому випадку можна приймати нульовими, оскільки передбачається застосування вже проамортизованого обладнання. Інші величини в розрахунках брали наступними:  $ЗП_{роб} = OB_{роб} = 30000$  грн,  $\Phi PЧ_{робj} = 1800$  год/рік (при 36-годинному робочому тижні). Тоді вираз для визначення витрат на оплату праці верстатника з урахуванням (15) матиме вигляд:

$$B_{OPP} = 1600 \frac{d^2}{k_2} (2 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (16)$$

Прийнявши при цьому відсоток, що враховує експлуатаційні та інші цехові витрати 75% ( $B_{OPP} + B_E + B_{ШВ} = 1,75B_{OPP}$ ), з урахуванням виразів (12), (13), (16), отримали вираз для визначення вартості деталей типу втулок з матеріалів  $M1$  та  $M2$ :

$$\begin{aligned} B_{KB} &= B_M + 1,75B_{OPP} = \\ &= 0,86\rho_m \frac{k_1}{k_2^3} d^3 \Pi_m (1 - 0,25k_2^2) + 2800 \frac{d^2}{k_2} (2 + 3k_1 k_2 + k_1) \times 10^{-6}, \text{ грн.} \end{aligned} \quad (17)$$

Підставивши у (17) ціни матеріалів  $M1$  та  $M2$ , а також прийнявши в середньому характерне для втулок дейдвудних підшипників співвідношення  $k_2 = 0,75$ , після нескладних перетворень отримаємо вирази для вартості втулок із цих матеріалів залежно від їхніх розмірів:

$$B_{KB1} = 574d^2 [k_1 (d + 28,3) + 17,4] \times 10^{-6}, \text{ грн.}; \quad (18)$$

$$B_{KB2} = 726d^2 [k_1 (d + 22,4) + 13,8] \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (19)$$

Для матеріалу  $M3$  матимемо наступні викладки. Вартість форми, що складатиметься з пустотілого циліндра зовнішнім діаметром  $1,25D$ , внутрішнім –  $1,05D$ , та встановленого всередину співвісного стрижня діаметром  $0,9d$ , із додаванням 10% на основу форми (множник 1,1) при  $k_2 = 0,75$  становитиме:

– форми, видрукуваної на  $3D$  принтері з матеріалу  $ABS$  ( $\rho_{mf} = 1,1 \times 10^{-6}$ ;  $\Pi_{mf} = 8000$  грн/кг, стійкість форми  $C\Phi = 50$  шт.):

$$\begin{aligned} B_{\phi3-1} &= 1,1 \times 0,785l(0,46D^2 + 0,81d^2) \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} = \\ &= 1,1 \times 0,785 \times \frac{k_1}{k_2^3} d^3 (0,46 + 0,81k_2^2) \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} = \\ &= 0,7 \times \frac{k_1}{k_2^3} d^3 (0,57 + k_2^2) \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} = 1,88k_1 d^3 \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} \times 10^{-6} = 310k_1 d^3 \times 10^{-6}, \text{ грн.} \end{aligned} \quad (20)$$

– сталевій зварної форми за тих же співвідношень розмірів ( $\rho_{mf} = 7,8 \times 10^{-6}$ ;  $\Pi_{mf} = 1000$  грн/кг (враховує вартість матеріалу та виготовлення);  $C\Phi = 250$  шт.):

$$B_{\phi3-2} = 1,88k_1 d^3 \frac{\rho_{mf} \Pi_{mf}}{C\Phi} \times 10^{-6} = 60k_1 d^3 \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (21)$$

Порівняння виразів (20) та (21) демонструє, що застосування друкованих форм може суттєво підвищити вартість виробів, тому далі орієнтуватимемось на сталеві форми.

Обчислені значення зведених ціни та густини для композиції дозволили отримати вираз для визначення вартості композиції для заготовки з розмірами, адекватними зазначеним розмірами ливарної форми ( $k_2 = 0,75$ ):

$$\begin{aligned} B_{K3} &= 0,785l(1,10D^2 - 0,81d^2)\rho_{36}Ц_{36} = \\ &= 0,64\frac{k_1}{k_2^3}d^3(1,36 - k_2^2)\rho_{36}Ц_{36} = 572k_1d^3 \times 10^{-6}, \text{ грн.} \end{aligned} \quad (22)$$

Значний попит на приймання відходів механічного оброблення епоксидних композитів авторам невідомий, тому приймаємо вартість матеріалу відходів  $B_{MB} = 0$ .

Таким чином, витрати на матеріал  $M3$  для втулок, відлитих в сталеві форми становитимуть:

$$B_{M3} = B_{K3} + B_{\phi3} = 632k_1d^3 \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (23)$$

Технологія виготовлення виробу з матеріалу  $M3$  включає чотири операції ( $n = 5$ ): оброблення композиції температурним полем та механічне оброблення, основні з яких наведено в табл. 2.

При токарній обробці заготовки з матеріалу  $M3$  матимемо вирази для основного, штучно-калькуляційного часу та вартості оплати праці робітника на операції 025:

$$t_o = 0,17\frac{d^2}{k_2^2}(0,3 + 3k_1k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.}; \quad (24)$$

$$T_{\text{шк}} = 0,36\frac{d^2}{k_2^2}(0,3 + 3k_1k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.} \quad (25)$$

$$B_{\text{ОПР4}} = 1600\frac{d^2}{k_2^2}(0,3 + 3k_1k_2 + k_1) \times 10^{-6}, \text{ грн.} \quad (26)$$

Тоді трудомісткість виготовлення втулки з матеріалу  $M3$  становитиме:

$$T_{\text{шк3}} = 268 + 0,36\frac{d^2}{k_2^2}(0,3 + 3k_1k_2 + k_1) \times 10^{-3}, \text{ хв.} \quad (27)$$

Графіки залежностей (15) та (28) для трудомісткостей виготовлення втулок з аналізованих матеріалів від їх розмірів для поширених на флоті діаметрів гребних валів  $d = 40 \dots 120$  мм та  $k_1 = 1,0 \dots 3,0$ , наведено на рис. 2. Для ілюстрації на рис. 3 порівняно трудомісткість виготовлення для модельної втулки  $d = 100$  мм,  $D = 132$  мм,  $l = 270$  мм: для виробів із матеріалів  $M1$  чи  $M2$  вона становитиме  $T_{\text{шк1,2}} = 54$  хв, а для матеріалу  $M3$  –  $T_{\text{шк3}} = 312$  хв, що робить висновки очевидними.

За прийняття тут вже наведених раніше припущень цехові втрати, оплату електроенергії та амортизацію обладнання, вартість втулки з матеріалу  $M3$  ( $k_2 = 0,75$ ) становитиме:

$$\begin{aligned} B_{KB3} &= B_M + 1,75 \sum_{j=1}^4 B_{\text{ОПР}j} = \\ &= 632k_1d^3 \times 10^{-6} + 1,75 \left[ 129 + 1600\frac{d^2}{k_2^2}(0,3 + 3k_1k_2 + k_1) \times 10^{-6} \right] = \\ &= 226 + 632d^2 \left[ k_1(d + 25,6) + 2,4 \right] \times 10^{-6}, \text{ грн.} \end{aligned} \quad (28)$$

Графіки залежностей (18), (19) та (27) для вартостей втулок наведено на рис. 4. На цьому графіку видно лінію перетину поверхонь  $M2$  та  $M3$ , тобто в зоні більших діаметрів та довжин за прийнятих умов застосування матеріалу  $M3$  може забезпечити нижчу вартість виробів. Втулки з матеріалу  $M1$  дешевші за будь-яких умов. Так, вартість виготовлення модельної втулки  $d = 100$  мм,  $D = 132$  мм,  $l = 270$  мм з матеріалу  $M1$  буде  $B_{KB1} = 1573$  грн (рис. 5), з матеріалу  $M2$  –  $B_{KB2} = 1877$  грн, а з матеріалу  $M3$  –  $B_{KB3} = 1829$  грн.

Сумісне розв'язання рівнянь (19) та (27) дало можливість побудувати графік (рис. 6) лінії рівної вартості виробів із матеріалів  $M2$  та  $M3$ , що є лінією перетину відповідних поверхонь вартостей на графіку рис. 4.

Таблиця 2 – Технологічний маршрут виготовлення втулки з матеріалу  $M3$

<i>№ операції та її короткий зміст (кількість одночасно оброблюваних заготовок)</i>		<i>Основний / штучно- калькуляційний час <math>t_o</math> / <math>T_{шк}</math>, хв</i>	<i>Заробітна плата робітника, грн/міс. / оплата праці робітника за операцію на один виріб <math>V_{опр}</math>, грн</i>
005 Термічна ( $n_6 = 5$ )		60 / 72	20000 / 42
1.	Нагріти смолу до $T = 353...373$ К і витримати при цій температурі	30	
2.	Підготувати та зважити компоненти композиції	{10}	
3.	Ввести наповнювачі в смолу та піддати змішуванню	10	
4.	Етерифікувати компаунд при $T = 333...353$ К.	20	
5.	Охолодити компаунд до кімнатної температури	{120}	
010 Вакуумна ( $n_6 = 5$ )		50 / 70	15000 / 31
1.	Ввести твердники	1	
2.	Залити композицію у форми	4	
3.	Вакуумувати композицію	45	
Витримка на повітрі 24 год		{1440}	–
015 Термічна ( $n_6 = 5$ )		120 / 126	15000 / 56
1.	Підігріти композицію до $T = 393$ К і витримати	120	
Охолодити (2 год) та витримати на повітрі 24 год		{1442}	–
025 Токарно-гвинторізна ( $n_6 = 1$ )		за виразом (24) / за виразом (25)	30000 / за виразом (26)
1.	Підрізати торець		
2.	Точити циліндр $D$		
3.	Розточити отвір $d$		
4.	Підрізати торець		
Сумарна трудомісткість за виразом (27)			За виразом (28)
<i>Примітка:</i> у фігурних дужках наведено час, який перекривається іншим часом, або який не потребує участі та оплати праці робітника			

Отримані результати можна пояснити тим, що втулки з матеріалів  $M1$  та  $M2$  тут передбачено точити з прутків, через що при великих діаметрах  $d$  зростає витрата матеріалу у відходи (свердління отвору). При виготовленні втулок із матеріалів  $M1$  та  $M2$  литтям трубчастих заготовок, забезпечити нижчу вартість виробів із матеріалу  $M3$  буде важко.

Специфіка роботи суден, де передбачається встановлення у дейдвудних підшипниках втулок з аналізованих матеріалів, передбачає їх докування, у тому числі для заміни втулок, тому основним функціональним критерієм для втулок є довговічність, а для їхніх матеріалів – зносостійкість. Відтак, кількість ремонтів із докуванням судна для заміни втулок дейдвудних підшипників за строк служби судна у роботі [15] запропоновано визначати за виразом (29).

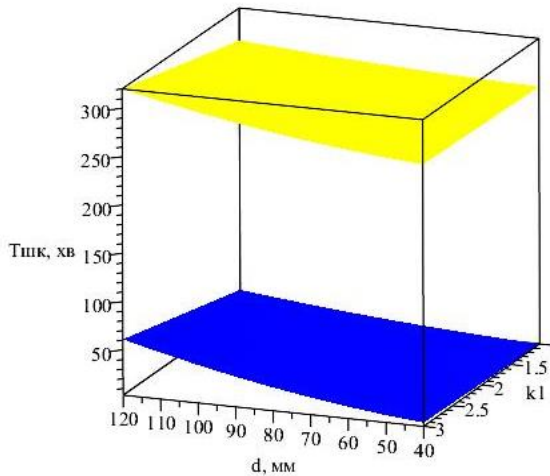


Рисунок 2 – Графіки залежності трудомісткості виготовлення виробів із матеріалів *M1* та *M2* (синій), а також *M3* (жовтий) від їх розмірів

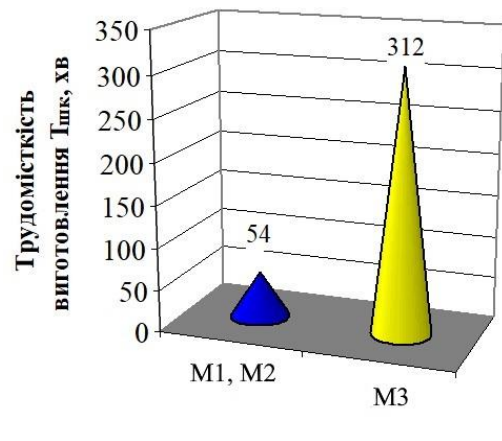


Рисунок 3 – Діаграма трудомісткості виготовлення модельної втулки з матеріалів *M1*, *M2* та *M3*

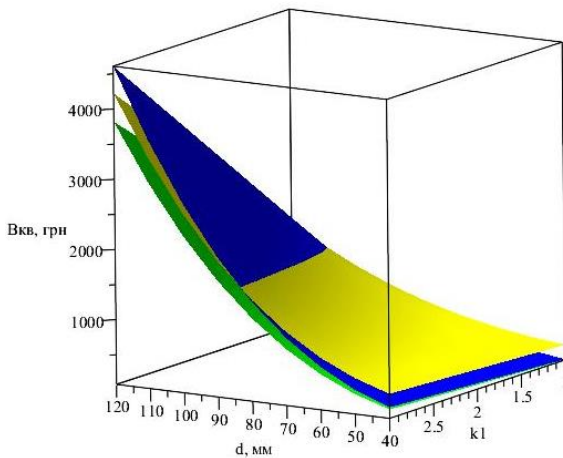


Рисунок 4 – Графіки залежності вартості виробів із матеріалів *M1* (зелений), *M2* (синій) та *M3* (жовтий) від їх розмірів

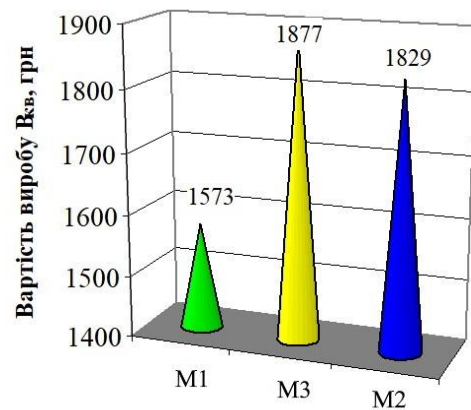


Рисунок 5 – Діаграма вартості модельної втулки з матеріалів *M1*, *M2* та *M3*

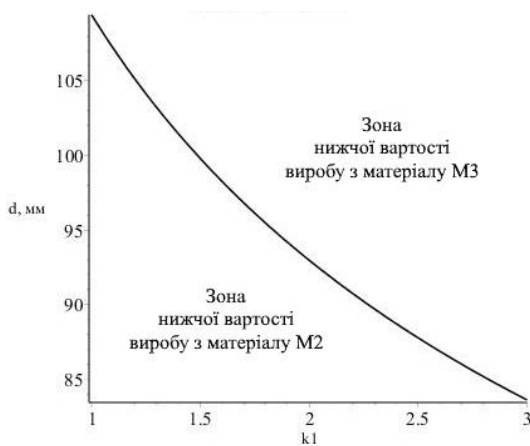


Рисунок 6 – Співвідношення розмірів, що забезпечують рівну вартість виробів з матеріалів *M2* та *M3*

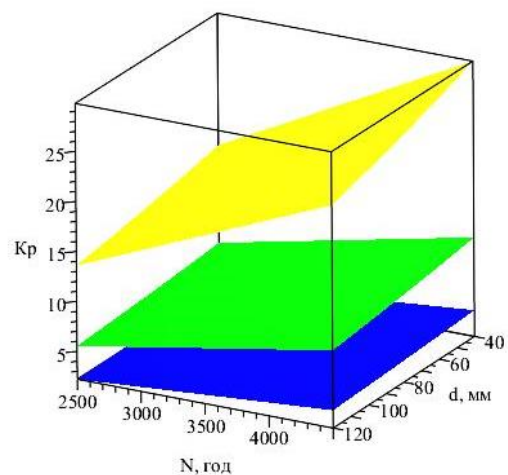


Рисунок 7 – Графік залежності періодичності ремонту (докування) вантажних суден за строк служби залежно від діаметра гребного вала та матеріалу втулки дейдвудного підшипника: *M1* (зелений), *M2* (синій) та *M3* (жовтий)

$$K_p = 25 \frac{k_{cc} N_{ход.}}{[2z] - 2z_{уст.}} I_{з\Sigma} = 25 \frac{k_{cc} N_{ход.}}{0,0055d + 1,8} I_{з\Sigma}, \quad (29)$$

де 25 років – проєктований строк служби судна;

$k_{cc}$  – коефіцієнт строку служби судна до морального чи фізичного зносу (1 – для крупнотонажних транспортних суден, 2 – для крупнотонажних пасажирських суден);

$N_{ход.}$  – річна кількість ходових годин судна, (год)/рік;

$[2z] = 0,0120d + 1,8$  – гранично допустимий в експлуатації зазор у підшипнику (для дейдвудних підшипників зі втулками з неметалевих матеріалів діаметром до 600 мм), мм (формула Регістра);

$2z_{уст.} = 0,0065d$  – установчий (монтажний чи першопочатковий) зазор у підшипнику, мм [15];

$I_{з\Sigma}$  – сумарна інтенсивність зношування для вала та втулки (мм/1000 год) (табл. 3).

Таблиця 3 – Триботехнічні властивості порівнюваних матеріалів

Позначення матеріалу	Коеф. тертя $f$ при мащенні водою	Інтенсивність зношування $I_z$				
		вала		втулки		сумарна для деталей підшипника
M1 ( $V = 1,3$ м/с, $p = 2,6$ МПа) [15]	0,020	мг/ (км·см <sup>2</sup> )	мм/1000 год	мг/ (км·см <sup>2</sup> )	мм/1000 год	мм/1000 год
		*0,003	*0,018	0,005	0,200	
M2 [16]	0,016	–	*0,007	–	0,080	0,087
M3 ( $V = 1,0$ м/с, $p = 2,7$ МПа) [17]	0,038	–	**0,025	мг/км	мм/1000 год	0,535
				0,05	0,51	

*Примітка:* \*у дослідях [15] для матеріалів на основі капролону контртіло було виготовлено з нержавіючої сталі 10X18H9T, з якої виготовляють гребні вали суден; \*\*у дослідях [17] контртіло для матеріалу M3 було виготовлено зі сталі 45 (45...48 HRC), знос контртіла тут не фіксувався, тому для роботи зі втулкою з матеріалу M3 інтенсивність зношування вала взято близько 5% від інтенсивності зношування втулки, у запас довговічності (знижено, насправді вал буде зношуватись інтенсивніше).

Графіки залежності (29), побудовані для суховантажного судна у випадку застосування втулок з аналізованих матеріалів (табл. 3) при  $N = 2500 \dots 5000$  год/рік наведено на рис. 7. Очікувано, найменшу кількість замін втулок забезпечить їх виготовлення з матеріалу M2. Наприклад, при  $N = 4000$  год/рік для втулки з  $d = 100$  мм із матеріалу M1 –  $K_p = 9$ , для матеріалу M2 –  $K_p = 4$ , для матеріалу M3 –  $K_p = 23$  (або докування майже щороку).

Для випадку застосування модельних втулок  $d = 100$  мм,  $D = 132$  мм,  $l = 270$  мм із різних матеріалів, з метою порівняння, отримані результати розрахунків зведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Основні характеристики модельних втулок дейдвудних підшипників з аналізованих матеріалів

Позначення матеріалу	Коеф. тертя $f$ при мащенні водою	Трудомісткість виготовлення $T_{штк}$ хв	Тривалість виготовлення, хв	Вартість виготовлення $B_{КВ}$ , грн	Кількість ремонтів $K_p$
M1	0,020	54	54	1573	9
M2	0,016	54	54	1877	4
M3	0,038	312	3314	1829	23

Дані табл. 4 свідчать, що застосування для виготовлення втулок матеріалу *M3* забезпечить найбільшу кількість ремонтів, а відтак завдяки найбільшій тривалості простоювання та витрат на ремонт, найбільші питомі витрати на тонну перевезеного судном вантажу, що знизить прибутки від експлуатації судна оснащеного такими втулками. Втулки з матеріалу *M3* забезпечать найбільші втрати на тертя в дейдвудному підшипнику, а відтак витрати на паливо, що додатково підвищить вартість перевезень. Трудомісткість виготовлення втулок із матеріалу *M3* майже в 6 разів більше ніж для втулок з матеріалів *M2* та *M3* (а тривалість виготовлення більше в понад 60 разів). Отримані результати роблять вибір матеріалу для втулок дейдвудних підшипників більш обґрунтованим і переконливо свідчать на користь застосування матеріалів *M1* чи *M2*. Авторами [15, 16] близько 40 років досліджувалось застосування різноманітних матеріалів для виготовлення втулок дейдвудних підшипників, найкращі результати отримано для капролонографіту та капролону наповненому графітом та дисульфідом молібдену, причому дані лабораторних дослідів добре узгоджувались з практикою експлуатації суден, що дає підстави їм довіряти. Спроби застосування епоксидних композитів для виготовлення втулок підшипників також відомі з 60-х років ХХ ст., проте в практиці судноремонту вони не прижились. Слід також відзначити, що за даними [18], найменшу інтенсивність зношування мають епоксидні композити зі вмістом графіту близько 10% проти близько 30% використаних у матеріалі *M3*. Це формує резерви для подальших досліджень епоксидних композитів триботехнічного призначення і пошуку сфер їх застосування, оскільки як реальну альтернативу термопластам типу наповненого антифрикційними добавками, капрону для виготовлення втулок дейдвудних підшипників, що змащуються водою, наразі їх розглядати важко.

#### **Висновки:**

- обґрунтовано структуру собівартості виробів із композиційних матеріалів, що включає віднесені до одиниці виробу вартості матеріалів та оброблення стаціонарними чи змінними фізичними полями, а також механічного оброблення. Вартість матеріалів включає вартість складових композиту (матриці, твердників, наповнювачів), армування тощо. Вартість оброблення на кожній операції залежить від оплати праці робітника, вартості електричної енергії, амортизації обладнання, експлуатаційних та інших цехових витрат;
- наведені вирази для обчислення основних витрат, що формують собівартість таких виробів, уможливають виконання практичних розрахунків;
- на прикладі втулок дейдвудних підшипників суден, обчислено вартість виготовлення виробів для трьох матеріалів та обґрунтовано рішення про застосування одного з них, ураховуючи такі критерії як трудомісткість виготовлення, вартість та довговічність;
- у нових дослідженнях, що стосуються розроблення та вивчення властивостей нових матеріалів чи технологій рекомендується виконувати якісне порівняння отриманих технічних рішень з аналогічними дослідженнями інших авторів за технічними та економічними показниками з метою оцінки доцільності використання отриманих результатів.

**Напрямки подальших досліджень.** Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення критеріїв якості виробів із композитних матеріалів, що ураховують ступінь вдосконалення виконання ними своїх функцій, вартість і трудомісткість виготовлення, витрати ресурсів на експлуатацію і т.д. За результатами цих досліджень можуть бути розроблені системи автоматизованого проектування виробів з таких матеріалів, у тому числі із застосуванням засобів штучного інтелекту.

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Emin A. How Composite Materials Influence Sustainable Development: Array. EuroEconomica. 40(2): 2021. <https://dj.univ-danubius.ro/index.php/EE/article/view/1459>.
2. Барановська О. В. Особливості структуроутворення та властивості спечених металоматричних композитів та епоксиполімерів з дисперсним наповнювачем на основі системи Ti-Fe-Si-Mn-C(B): дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 – матеріалознавство / О. В.

Барановська; Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. К., 2025. 254 с.

3. Protsenko V., Rusanov S., Babii M., Nastasenکو V. The influence of operating factors on the ram-type steering gear elements force interaction / *Journal of maritime research*. Vol. 22. No. 1.: 2025. 349–354. <https://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/view/1112/993>.

4. Protsenko V., Nastasenکو V., Babii M., Protasov R. Marine ram-type steering gears maintainability increasing. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnícky časopis*. Vol. 72, №2: 2022. 149–160. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0025>.

5. Camilleri M. A. Aircraft operating costs and profitability. *Travel Marketing, Tourism Economics, and the Airline product*. Vol. 12. Springer Nature, Cham, Switzerland: 2017. 191–204. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49849-2\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49849-2_12).

6. Mofokeng T., Mativenga P.T., Marnewick A. Analysis of aircraft maintenance processes and cost. *Procedia CIRP* 90: 2020. 467–470.

7. Lopes I., Senra P., Vilarinho S., Sá V., Teixeira C., Lopes J., Alves A., Oliveira J., Figueiredo M. Requirements specification of a computerized maintenance Management System – A Case Study. *Procedia CIRP* 52: 2016. 268–273.

8. Achouch M., Dimitrova M., Ziane K. et al. On predictive maintenance in industry 4.0: overview, models, and challenges. *Appl Sci* 12: 2022. 8081.

9. Karadimas G., Ioannou A., Kolios A. et al. Techno-Economic analysis of ceramic matrix composites integration in remaining useful Life Aircraft Engine Hot Section Components. *Int J Adv Manuf Technol* 135: 2024. 4189–4203. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14743-w>.

10. Nosov P., Zinchenko S., Nahrybelnyi Y., Onyshko D., Polishchuk V. Development and 3D printing of vessel models with automated traffic control systems. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*. No. 26–27: 2023. 70–81. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.070-081>.

11. Горбацевич О. Ф. Курсове проектування з технології машинобудування: навчальний посібник / О. Ф. Горбацевич, В. А. Шкред. Мінськ: Вища школа, 1983. 256 с.

12. Руденко П. О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні / П. О. Руденко. К.: Вища школа, 1993. 414 с.

13. Технологія машинобудування (дипломне проектування) / І. О. Григурко, М. Ф. Брендуля, С. М. Доценко. Львів: «Новий Світ – 2000», 2020. 744 с.

14. Сидоренко В. Н. Економічна ефективність механізації наплавлення / В. Н. Сидоренко, В. А. Шихальов, О. М. Портняжкіна // У зб. "Виробництво великих машин". Під ред. А. І. Волконського, С. Є. Полякова (Праці НІИТЯЖМАШ Уралмашзаводу). Вип. 20, 1971. С. 124–138.

15. Бузков В. А. Підвищення службових властивостей матеріалів для розвитку суднових дейдвудних пристроїв та захисту моря: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.01 – матеріалознавство / В. А. Бузков; Одеський державний морський університет. Одеса, 1998. 448 с.

16. Сторожев В. П. Причини та закономірності поступових відмов основних триботехнічних об'єктів енергетичної системи судна та підвищення їх ресурсу: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.02 – машинознавство / В. П. Сторожев; Одеський державний морський університет. Одеса, 2002. 381 с.

17. Браїло М. В. Розроблення епоксикомполімерів з комплексом дисперсних і поліамідного наповнювачів для деталей вузлів тертя: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 – матеріалознавство / М. В. Браїло; Херсонська державна морська академія. Херсон, 2015. 227 с.

18. Smoleń J., Stepień K., Mikuśkiewicz M., Myalska-Głowacka H., Koziół, M., Godzierz M., Janeczek H., Czakiert J. Tribological Properties of Composites Based on Single-Component Powdered Epoxy Matrix Filled with Graphite. *Materials* 17: 2024. 3054. <https://doi.org/10.3390/ma17133054>.

## REFERENCES

1. Emin, A. (2021). How Composite Materials Influence Sustainable Development: Array. *EuroEconomica*. 40(2). <https://dj.univ-danubius.ro/index.php/EE/article/view/1459>.
2. Baranovska, O. V. (2025). *Features of structure formation and properties of sintered metal matrix composites and epoxy polymers with dispersed filler based on the Ti-Fe-Si-Mn-C(B) system*. : dys. ... d-ra tekhn. nauk: spets. 05.02.01 – Materials Science / O. V. Baranovska; I. M. Frantsevych Institute for Problems of Materials Science of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv. 254.
3. Protsenko, V., Rusanov, S., Babii, M., Nastasenکو, V. (2025). The influence of operating factors on the ram-type steering gear elements force interaction / *Journal of maritime research*. Vol. 22. No. 1. 349–354. <https://www.jmr.unican.es/index.php/jmr/article/view/1112/993>.
4. Protsenko, V., Nastasenکو, V., Babii, M., Protasov, R. (2022). Marine ram-type steering gears maintainability increasing. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnícky časopis*. Vol. 72, №2. 149-160. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0025>.
5. Camilleri, M. A. (2017). Aircraft operating costs and profitability. *Travel Marketing, Tourism Economics, and the Airline product*. Vol. 12. Springer Nature, Cham, Switzerland. 191–204. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-49849-2\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-49849-2_12).
6. Mofokeng, T., Mativenga, P. T., Marnewick, A. (2020). Analysis of aircraft maintenance processes and cost. *Procedia CIRP* 90. 467–470.
7. Lopes, I., Senra, P., Vilarinho, S., Sá, V., Teixeira, C., Lopes, J., Alves, A., Oliveira, J. (2016). Figueiredo M. Requirements specification of a computerized maintenance Management System – A Case Study. *Procedia CIRP* 52. 268–273.
8. Achouch, M., Dimitrova, M., Ziane, K. et al. (2022). On predictive maintenance in industry 4.0: overview, models, and challenges. *Appl Sci* 12. 8081.
9. Karadimas, G., Ioannou, A., Kolios, A. et al. (2024). Techno-Economic analysis of ceramic matrix composites integration in remaining useful Life Aircraft Engine Hot Section Components. *Int J. Adv. Manuf. Technol.* 135. 4189–4203. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14743-w>.
10. Nosov, P., Zinchenko, S., Nahrybelnyi, Y., Onyshko, D., Polishchuk, V. (2023). Development and 3D printing of vessel models with automated traffic control systems. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*. No. 26–27: 2023. 70–81. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.070-081>.
11. Horbatsevych O. F. (1983). *Kursove proektuvannia z tekhnolohii mashynobuduvannia: navchalnyi posibnyk* / O. F. Horbatsevych, V. A. Shkred. Minsk: Vyscha shkola. 256 s.
12. Rudenko, P. O. (1993). *Design of technological processes in mechanical engineering* / P.O. Rudenko. Kyiv: Vyscha Shkola. 414.
13. Hryhurko, I. O., Brendulya, M. F., Dotsenko, S. M. (2020). *Mechanical engineering technology (Diploma design)* / I. O. Hryhurko, M. F. Brendulya, S. M. Dotsenko. Lviv: Novyi Svit – 2000. 744.
14. Sydorenko V. N. (1971). *Ekonomichna efektyvnist mekhanizatsii naplavlennia* / V. N. Sydorenko, V. A. Shykhlov, O. M. Portniashkina // U zb. "Vyrobnyststvo velykykh mashyn". Pid. red. A. I. Volkonskoho, S. Ye. Poliakova (Pratsi NYYTiaZhMASH Uralmashzavodu). Vyp. 20. S. 124–138.
15. Buzkov, V. A. (1998). *Improving the service properties materials for the development of ship stern tube devices and sea protection*: dis. ... Dr. Sci. (Eng.): 05.02.01 – Materials Science / V.A. Buzkov; Odesa State Maritime University. Odesa. 448.
16. Storozhev, V. P. (2002). *Causes and regularities gradual failures of main tribotechnical objects a ship's power system and increasing their service life*: dis. ... Dr. Sci. (Eng.): 05.02.02 – Machine Science / V. P. Storozhev; Odesa State Maritime University. Odesa. 381.
17. Brailo, M. V. (2015). *Development epoxy composites with complex of dispersed and polyamide fillers for parts of friction*: dis. ... Cand. Sci. (Eng.): 05.02.01 – Materials Science / M. V. Brailo; Kherson State Maritime Academy. Kherson. 227.

18. Smoleń, J., Stepień, K., Mikuśkiewicz, M., Myalska-Głowacka, H., Koziół, M., Godzierz, M., Janeczek, H., Czakiert, J. (2024). Tribological Properties of Composites Based on Single-Component Powdered Epoxy Matrix Filled with Graphite. *Materials* 17. 3054. <https://doi.org/10.3390/ma17133054>.

**Protsenko V. O., Kasyan O. A. NEW COMPOSITE MATERIALS MADE PRODUCTS DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION FEATURES**

*The article deals with the techno-economic feasibility of using products made from new composite materials. The proposed cost structure of composite products includes the cost of materials, fillers, reinforcement, processing with stationary or variable physical fields, and mechanical processing by cutting, pressure, or other methods. The costs of performing each operation to manufacture a composite product are proposed to be calculated using a comprehensive approach. These include workers' wages, electricity expenses, equipment depreciation, costs of operating cutting tools and equipment, machine programming, and other shop costs—in particular, payment for the operation of production areas, ventilation, heating, etc. Ratios are introduced that can be used in practice to determine the specified components of the cost of a composite product. For illustration, calculations and comparisons of the manufacture of deadwood-bearing bushings from graphite-filled caprolon, caprolon filled with graphite and molybdenum disulfide, as well as from an epoxy composite filled with graphite and polyamide, are presented. The expressions for calculating the labor intensity and cost of manufacturing bushings from these materials, depending on their sizes and the relationships between them, were obtained. The calculation results showed that the cost of bushings made from all three analyzed materials are comparable in magnitude—values of the same order—making the manufacturing costs for all options equivalent under unit production conditions at a ship repair enterprise. By determining wear, it is shown that in the case of using bushings from caprolon filled with graphite and molybdenum disulfide, the number of repairs with docking of the vessel during its service life will be almost six times less than when using bushings made from epoxy composite (9 and 23 dockings over 25 years, respectively). The set of results obtained is key for choosing a material, as the greater wear resistance of the bushings reduces the number of vessel downtimes in the dock and the cost of transporting a ton of cargo. The presented calculation method can be used by engineers when justifying the choice of material and is helpful for graduate students to compare the results obtained with studies by other authors. This could be one step toward adhering to the principles of open science and reducing the amount of research conducted merely for the sake of research.*

**Key words:** composite material; cost price; processing; economic feasibility; quality.

© Проценко В. О., Касян О. А.

Статтю прийнято до редакції 02.06.2025

***СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН***  
***NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING***

## СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ВИБОРУ МАНЕВРУ СУДНА ЗГІДНО З ВИМОГАМИ МПЗЗС-72

**Бень А. П.**, к.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a\_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489;

**Матейчук В. М.**, Ph.D., доцент кафедри управління судном Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: mateichykv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9328-0651.

*Стаття присвячена питанням застосування Міжнародних правил запобігання зіткнень суден (МПЗЗС-72) у системах підтримки прийняття рішень (СППР) судноводія. Проведено аналіз досліджень у галузі створення формальних моделей МПЗЗС-72 та їх практичного застосування в системах управління рухом суден. Виявлено, що на поточний момент часу перспективним напрямом наукових досліджень є створення методів оцінки рівня небезпеки навігаційних ситуацій згідно з вимогами МПЗЗС-72, адаптованих до застосування в СППР судноводія. Доведено, що важливим аспектом успішного застосування МПЗЗС-72 у судноводінні є не лише створення їх адекватних формальних моделей, адаптованих до застосування СППР судноводія та автоматизованих системах керування рухом суден, а й розвиток тренажерних систем підготовки морських фахівців з метою підвищення їх компетентності в галузі практичних навичок застосування правил під час несення вахти. Розроблено класифікацію навігаційних ситуацій, що виникають у процесі розходження суден згідно з вимогами МПЗЗС-72 та метод оцінки рівня їх небезпеки відповідно до параметрів руху. Здійснено практичну реалізацію запропонованої класифікації та методу оцінки рівня небезпеки навігаційних ситуацій у СППР судноводія, яку інтегровано з навігаційним обладнанням тренажера Wartsila «Navi-Trainer Professional 5000». Створено програмні засоби реалізації інформаційного обміну між СППР та навігаційним обладнанням тренажера у режимі реального часу, що дозволяє здійснювати постійний моніторинг змін навігаційних ситуацій. Пріоритетним напрямом практичного застосування СППР, що створена, є забезпечення тренажерної підготовки морських фахівців з метою отримання практичних навичок застосування МПЗЗС-72 на навігаційному містку. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка окремого програмного модуля СППР для ведення статистичного аналізу успішності тренажерної підготовки фахівців, які проходять її на навігаційному тренажері, в розрізі визначення складнощів застосування окремих правил МПЗЗС-72 для різних типів навігаційних ситуацій та умов плавання.*

**Ключові слова:** судноводіння; системи підтримки прийняття рішень; МПЗЗС-72; навігаційна ситуація; управління судном; навігаційний тренажер; тренажерна підготовка; безпека мореплавства.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.133-144**

**Вступ.** МПЗЗС-72 є основоположним нормативним документом, який регламентує процеси розходження суден, тому питанням формалізації правил присвячено досить велику кількість робіт дослідників, що працюють у галузі інтелектуальних та автоматизованих систем управління рухом суден [1–10]. Слід зазначити, що інтенсивне впровадження досягнень сучасних інформаційних технологій у галузі судноводіння, яке відбувається протягом останніх двох десятиліть, привертає увагу дослідників із різних країн світу до створення новітніх автоматизованих та інтелектуальних систем керування рухом суден, а також систем підтримки прийняття рішень (СППР) судноводія [11–17]. Розробка таких систем, зі свого боку, обумовлює потребу в створенні відповідних математичних моделей, методів, апаратних та програмних засобів, які забезпечуватимуть імплементацію вимог МПЗЗС-72 на практиці.

З огляду на вищезазначене, а також, беручи до уваги інтенсифікацію застосування засобів обробки навігаційної інформації в галузі судноводіння, виникає нагальна потреба розробки методів класифікації навігаційних ситуацій, та формальних моделей МПЗЗС-72, придатних до застосування в інтелектуальних системах керування рухом суден.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Питанням формалізації вимог правил МПЗЗС-72 з метою їх подальшого застосування в інтелектуальних навігаційних

інформаційних системах, системах підтримки прийняття рішень та автоматизованих системах управління рухом суден, у тому числі автономних, присвячена низка робіт закордонних та вітчизняних дослідників, в яких розглянуто різні аспекти практичного застосування МПЗЗС-72 [1–9], та створення відповідних систем управління [11–20].

Так, у роботі [1] описано підходи, які слід враховувати при розробці алгоритмів, що покладено в основу функціонування СППР судноводія для прийняття рішень у ситуаціях розходження суден. Зазначені СППР можуть бути застосовані як безпосередньо на борту судна, так і для процесів дистанційного керування суднами, а також для автономних систем керування.

У статті [2] запропонована дворівнева гібридна система координації руху суден для запобігання зіткнень двох або трьох суден у ситуаціях їхнього небезпечного зближення. В основу роботи системи покладено формальні моделі координації руху суден побудовані відповідно до дотримання вимог МПЗЗС-72. Також у статті наведено приклад практичної реалізації створеної системи.

У статті [3] представлено ефективний алгоритм уникнення зіткнень, який використовує порогові функції керування, засновані на застосуванні маневрених характеристик суден у поєднанні з вимогами МПЗЗС-72. На відміну від традиційних методів управління рухом судна, яким бракує явного врахування технічних можливостей здійснення судном повороту та зміни напрямку руху з метою уникнення зіткнення, автори пропонують дві функції керування, що розраховуються на основі параметрів лівих та правих кіл повороту. Ці функції встановлюють умови безпеки руху суден шляхом визначення дистанцій між суднами та центрами кіл їх повороту, що, зі свого боку, дозволяє ефективно визначити, як напрямки руху для ухилення від зіткнення, так і можливості повороту власного судна.

У роботі [4] проведені дослідження в напрямку визначення прогалин у розумінні та застосуванні МПЗЗС-72 серед морських студентів та досвідчених офіцерів. Автори проаналізували основні причини зіткнень суден, та з'ясували, що домінуючими факторами виникнення морських аварій є людський фактор і неправильне тлумачення правил. За допомогою анкетування цільових груп, було перевірено рівень їх розуміння правил, та виявлено, що недоліки у знаннях найчастіше виникають через неправильну інтерпретацію правил та їх помилкове застосування. За результатами дослідження визначено, що професійну компетентність навігаційних офіцерів можна покращити шляхом застосування відповідних методів навчання, які включають використання реальних сценаріїв, електронного навчання та мають на меті допомогти студентам не лише запам'ятати правила, а й зрозуміти їх вірне застосування на практиці.

У статті [5] пропонується застосування у системах уникнення зіткнень суден нового інтелектуального алгоритму виявлення небезпечних навігаційних ситуацій, заснованого на застосуванні нечіткої логіки у поєднанні з правилами МПЗЗС-72. Основна увага приділяється сценаріям, пов'язаним із розходженням кількох суден, оскільки їм притаманний істотно вищий ризик виникнення зіткнень. Система оцінює рівень ризиків зіткнень для кожного судна, використовуючи в якості вихідних даних масштабовану дистанцію до найближчої точки зближення та час до найближчої точки зближення. На основі розрахованого рівня ризику зіткнення, кута зустрічі та відносного кута руху кожного судна, визначеного відносно інших, система ухвалює рішення щодо уникнення зіткнень.

Робота [6] присвячена вирішенню проблеми формалізації МПЗЗС-72 у технічних системах. Автори пропонують застосовувати онтологічну модель поведінки суден, засновану на МПЗЗС-72, використовуючи методи графів знань. У такому випадку судно розглядається як просторово-часовий об'єкт, а його поведінка описується як зміни окремих параметрів руху у часових та просторових масштабах.

У роботі [7] досліджуються актуальні питання та потенційні виклики застосування МПЗЗС-72 у контексті розвитку автономних суден. Автори аналізують чинні правила, які були розроблені для суден, керованих людиною, і розглядають їхню відповідність потребам та можливостям практичного застосування для повністю автономних систем.

Стаття [8] присвячена вивченню проблем безпеки на морі, пов'язаних із ризиками зіткнень суден та ролі МПЗЗС-72 у їх вирішенні. Автори зазначають, що, попри свою важливість як основного міжнародного регуляторного документа, формулювання МПЗЗС-72 не завжди є повністю зрозумілими для судноводіїв, що часто призводить до виникнення непорозумінь та двозначностей трактувань правил. У статті підкреслюється, що, хоча і наразі ведеться багато дискусій щодо застосування МПЗЗС-72, внесення істотних змін у їх чинну редакцію вбачається малоімовірним. Тому, замість перероблення правил, пропонується зосередитись на вдосконаленні методів, які забезпечать ефективніше використання правил на практиці, перш за все у сферах освіти та тренажерної підготовки морських фахівців.

У роботі [9] досліджуються особливості застосування МПЗЗС-72 в СППР судноводія. Автори зазначають, що СППР, які застосовуються для навігації морських суден, повинні забезпечувати коректну реалізацію дотримання вимог МПЗЗС-72 в процесах керування рухом. У статті запропоновано нову методику визначення безпечної зони навколо власного судна, засновану на застосуванні просторово-часової логіки.

За підсумками проведеного аналізу літературних джерел із проблеми, що досліджується, [1–20], можна зробити висновок, що важливими аспектами успішного застосування МПЗЗС-72 в судноводінні є не лише створення їх адекватних формальних моделей, адаптованих до застосування у СППР судноводія та автоматизованих системах керування рухом суден, а й розвиток тренажерних систем підготовки морських фахівців із метою підвищення їх компетентності в галузі практичних навичок застосування правил під час несення вахти на навігаційному містку.

Таким чином, створення методів оцінки рівня небезпеки навігаційних ситуацій згідно з вимогами МПЗЗС-72 та їх подальше практичне використання в СППР судноводія, пріоритетним напрямом застосування якої буде тренажерна підготовка морських фахівців, являє собою актуальну науково-практичну задачу сьогодення, і є предметом даного дослідження.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є побудова класифікації навігаційних ситуацій, що виникають у процесі розходження суден згідно з вимогами МПЗЗС-72, та розробка методу оцінки рівня їх небезпеки залежно від наявних параметрів руху суден, які виконують маневр розходження, адаптованої до застосування в СППР судноводія.

Об'єкт дослідження: процес застосування правил МПЗЗС-72 в СППР судноводія.

Предмет дослідження: метод оцінки рівня небезпеки навігаційних ситуацій у СППР судноводія та прийняття рішень з управління рухом судна відповідно до вимог МПЗЗС-72.

Досягнення поставленої мети дослідження передбачає вирішення наступних задач:

1. Розробити класифікацію навігаційних ситуацій, що виникають у процесі розходження суден згідно з вимогами МПЗЗС-72.

2. Розробити метод оцінки рівня небезпеки навігаційних ситуацій розходження суден згідно з правилами МПЗЗС-72 відповідно до параметрів їх руху.

3. Здійснити практичну реалізацію запропонованої класифікації та методу оцінки рівня небезпеки навігаційних ситуацій у СППР судноводія, яка інтегрована з навігаційним обладнанням тренажера «Wartsila «Navi-Trainer Professional 5000».

**Виклад основного матеріалу.** Важливість правил, як ключового нормативного документа в судноводінні, обумовлює необхідність розробки методу оцінки рівня небезпеки навігаційних ситуацій згідно з вимогами МПЗЗС-72, придатного для використання в СППР судноводія. Із метою створення зазначеного методу, спочатку, відповідно до першої задачі дослідження, було розроблено класифікацію базових навігаційних ситуацій, що виникають у процесі розходження суден.

Перш за все, слід зазначити, що структурно МПЗЗС-72 складаються з шести частин, які містять 41 правило, і чотирьох додатків [10], (рис. 1).

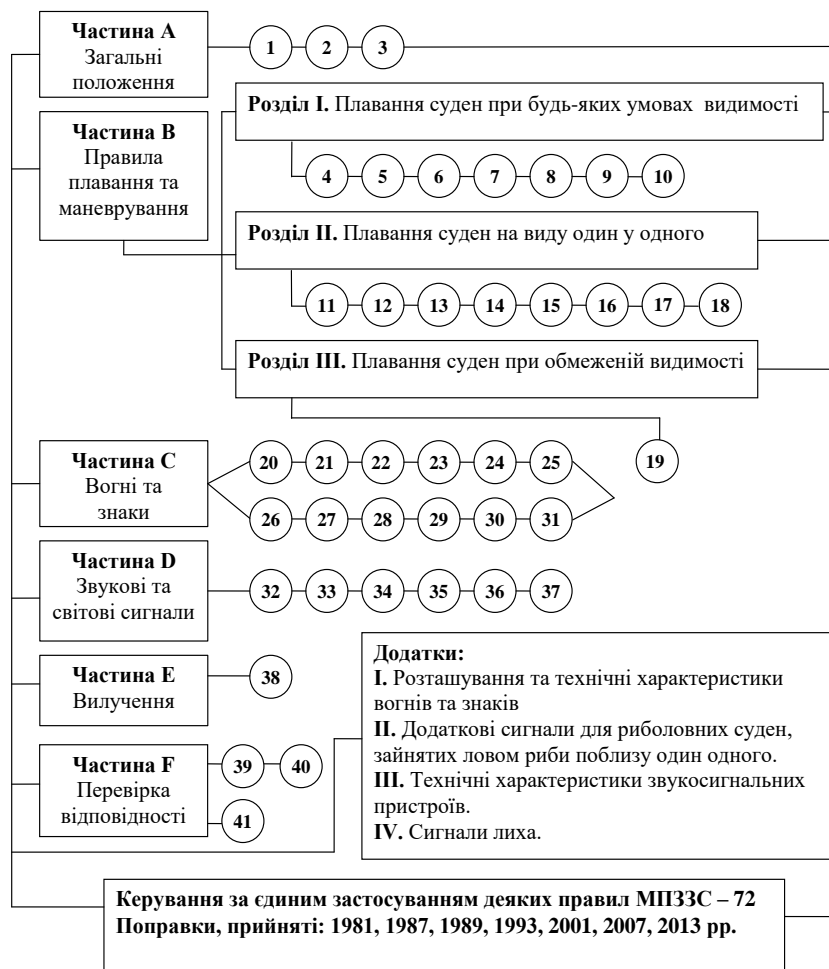


Рисунок 1 – Структура правил МПЗЗС-72

З точки зору розробки класифікації навігаційних ситуацій за рівнем небезпечності руху суден, для СППР судноводія найбільший інтерес представляють правила, які містяться у частини В – «Правила плавання і маневрування» (за винятком правил 4,5 і 11, що визначають умови застосування інших правил з частини В). Відомості, які містяться в частинах А, С, D, Е, F правил носять переважно декларативний характер і не є предметом розгляду даної статті.

МПЗЗС-72 містить дві незалежні системи координації взаємодіючих суден: для умов доброї й обмеженої видимості відповідно. В умовах доброї видимості МПЗЗС-72 передбачені взаємні обов'язки суден залежно від їх початкової відносної позиції, району плавання, можливостей маневрування, які визначаються типом суден, їх конструктивними особливостями або технічним станом. За умов доброї видимості застосовуються правила Розділу 1 та Розділу 2 частини В, слід зазначити, що з точки зору реалізації функцій СППР необхідно здійснювати постійний контроль дотримання правил 6–8 Розділу 1 та 13–18 Розділу 2. Розділ 2 частини В регламентує процеси розходження та взаємодії власного судна з іншими, тому його аналізу слід приділити особливу увагу.

Проведений аналіз частини В правил МПЗЗС-72, дозволив визначити базові навігаційні ситуації, що виникають у процесі розходження суден, а також побудувати їх класифікацію відповідно до дій судноводія та правил МПЗЗС-72, що застосовуються у кожному випадку. Встановлено, що базовими навігаційними ситуаціями, які виникають при розходженні суден залежно від параметрів їх руху та взаємного розташування є наступні вісім типів ситуацій:

1. *Зустрічний курс:* два судна прямують один на одного або майже на зустрічних курсах.

*Ознаки:* курси майже протилежні (різниця  $\approx 180^\circ \pm 10^\circ$ ).

*Дії згідно МПЗЗС-72:* Обидва судна повинні відвернути праворуч, щоб розминутися лівими бортами (Правило 14).

2. *Перетин курсів:* Судна прямують на перехресних курсах, і траєкторії можуть перетнутися.

*Ознаки:* один з капітанів бачить інше судно на правому траверзі, різниця курсів складає від  $45^\circ$  до  $135^\circ$ .

*Дії згідно МПЗЗС-72:* судно, яке бачить інше справа, повинне дати дорогу (Правило 15), судно, що має перевагу, повинно зберігати курс і швидкість (Правило 17).

3. *Обгін:* одне судно наздоганяє інше зі швидкістю, що перевищує його хід.

*Ознаки:* обгін відбувається в межах  $22,5^\circ$  позаду траверзу судна, яке обганяють.

*Дії згідно МПЗЗС-72:* судно, що обганяє, повинне триматися осторонь і забезпечити безпечне розходження (Правило 13), судно, яке обганяють, не повинне змінювати курс.

4. *Паралельні курси:* судна йдуть однаковим курсом і напрямком, але на різних дистанціях, і ризик зіткнення мінімальний.

*Ознаки:* рух суден паралельними курсами.

*Дії згідно МПЗЗС-72:* не вимагає дій, але навігаційна ситуація потребує постійного моніторингу (Правило 5).

5. *Небезпечне зближення:* Судна зближуються до мінімально допустимої дистанції, незалежно від курсу.

*Ознаки:* мінімальна дистанція зближення менше ніж 1 милі (CPA < 1 милі).

*Дії згідно МПЗЗС-72:* потребує негайного реагування відповідно до ситуації, що склалася (Правило 8).

6. *Ускладнені умови видимості:* туман, дощ, ніч, сильний вітер, імла, погана видимість.

*Ознаки:* обмеження зорового контролю руху.

*Дії згідно МПЗЗС-72:* зниження швидкості руху, ведення радіолокаційного спостереження, подавання звукових сигналів (Правила 19, 35).

7. *Обмежений простір для маневрування:* маневрування у вузькостях та обмежених акваторіях.

*Ознаки:* русло річки, канал, протока, порт.

*Дії згідно МПЗЗС-72:* судна, що не можуть маневрувати вільно (наприклад, великі танкери), мають пріоритет (Правило 9, Правило 10, Правило 34).

8. *Аварійні ситуації:* відмова судових систем та механізмів.

*Ознаки:* Вихід із ладу двигуна, стерна, втрата ходу.

*Дії згідно МПЗЗС-72:* рішення приймаються відповідно до пріоритету безпеки і сповіщення інших суден (AIS, сигнали, Правило 36, Правило 37).

Узагальнена класифікація навігаційних ситуацій та дій судоводія і правил МПЗЗС-72, що відповідають їм, наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 – Класифікація основних навігаційних ситуацій

№	Тип ситуації	Ключові дії	Правила МПЗЗС-72
1	Зустрічний курс	Обидва судна відвертають праворуч	14
2	Перетин курсів	Судно, яке бачить інше праворуч, поступається	15, 16, 17
3	Обгін	Судно, що обганяє – поступається	13
4	Паралельний курс	Моніторинг навігаційної ситуації	5
5	Небезпечне зближення	Зміна курсу/швидкості	8, 16
6	Погана видимість	Сповільнення руху, радар, сигнали	19, 35
7	Обмежене маневрування	Пріоритет суднам, обмеженим у маневрі	9, 10, 34
8	Аварійна ситуація	Уникнення зіткнення, сповіщення	36,37

Слід окремо зазначити, що з позицій аналізу рівня небезпеки навігаційної ситуації в СППР судноводія стосовно можливого зіткнення суден, ключовим є Правило 7 – «Небезпека зіткнення». З метою визначення дій судноводія, спрямованих на уникнення зіткнення, для кожного судна, за яким ведеться спостереження, рекомендується проводити аналіз траєкторії руху за шістьма ключовими параметрами: пеленг та дистанція до цілі, істинний курс та швидкість цілі, дистанція найкоротшого зближення (CPA) та час до найкоротшого зближення (TCPA).

Проведений аналіз низки робіт різних авторів [16–20], дозволив виявити, що на поточний момент часу не існує єдиної класифікації рівня небезпеки навігаційних ситуацій стосовно зіткнення суден залежно від параметрів їх руху та взаємного розташування.

З метою вирішення вказаної проблеми, для визначення рівня небезпеки навігаційних ситуацій, була розроблена класифікація суден цілей за небезпекою зіткнення (табл. 2), яка також може бути додатково відкоригована з урахуванням типів суден цілей.

Перевагою пропонованого підходу у порівнянні з вже чинними є можливість одночасного врахування при оцінці навігаційної ситуації CPA, TCPA, а також типів суден та їх геометричних розмірів, що дозволяє здійснити більш адекватну оцінку рівнів ризиків, які виникають у процесі розходження та маневрування.

Слід зазначити, що важливим практичним напрямом застосування СППР судноводія є їх використання в навчальному процесі морських навчальних закладів під час проведення тренажерної підготовки курсантів – майбутніх судноводіїв. У процесі проходження вищезазначеної підготовки курсанти повинні не лише продемонструвати знання МПЗЗС-72, а й, що найважливіше, навички їх коректного та своєчасного застосування на практиці – в процесі управління рухом судна в складних навігаційних ситуаціях – маневруванні та розходженні з іншими суднами із використанням сертифікованого тренажерного обладнання.

Таблиця 2 – Класифікація суден цілей за небезпекою зіткнення

CPA, милі	TCPA, хвилини				
	<5	5–10	10–15	15–20	>20
<0.5	дуже значна	дуже значна	дуже значна	дуже значна	значна
0.5–1	дуже значна	дуже значна	значна	значна	значна
1–1.5	дуже значна	значна	значна	значна	незначна
1.5–2	значна	значна	незначна	незначна	незначна
>2	значна	незначна	незначна	незначна	незначна

За допомогою мови програмування C#, автори розробили програмне забезпечення СППР судноводія, яке підтримує інформаційний обмін зі штатним обладнанням навігаційного тренажера від компанії Wartsila «Navi-Trainer Professional 5000» за допомогою інтерфейсу Serial Com Port. Навігаційна інформація з тренажерного обладнання Navi-Trainer Professional 5000 надходить до СППР судноводія у вигляді повідомлень NMEA. NMEA – це спеціальний протокол для підтримки взаємодії морського навігаційного обладнання від різних виробників, розроблений Національною асоціацією морської електроніки. Повідомлення NMEA містить заголовок, набір даних і поле контрольної суми для перевірки точності переданої інформації. Для функціонування програмного забезпечення СППР важливими є наступні показники навігаційного обладнання: Log, Gyro, Aра. Log, Gyro – для визначення вектора руху власного судна. Aра – для визначення пеленга та дистанції суден цілей, їх параметрів руху.

Програмне забезпечення СППР, що створено, надає можливість налаштування критеріїв визначення ризику зіткнення шляхом введення параметрів безпечної дистанції та часу розходження з суднами цілями. Здійснюється візуалізація параметрів руху власного судна, та параметрів руху суден цілей: пеленги, дистанції до інших суден, їх швидкості та курси, дистанції найкоротшого зближення (CPA), час до найкоротшого зближення (TCPA).

Обмін інформацією з тренажерним обладнанням дозволяє щосекунди отримувати актуальну інформацію параметрів руху всіх суден у зоні спостереження. Таким чином здійснюється оцінка ризику зіткнення з усіма суднами цілями, у тому числі з тими, що маневрують. На підставі створеної класифікації навігаційних ситуацій та з урахуванням вимог правил розходження суден, СППР судноводія в реальному часі оцінює ризики зіткнення з суднами цілями, що визначаються відповідно до навігаційної ситуації, яка наявна на поточний момент часу. Всі наявні судна цілі класифікуються згідно трьом категоріям: небезпечна ціль, потенційно небезпечна ціль, ціль, яка не представляє загрози. Візуальне маркування суден цілей відбувається із застосуванням принципів когнітивної графіки: небезпечні судна маркуються червоним кольором, потенційно небезпечні – жовтим, ті, що не являють загрози, – зеленим.

Додатково, у процесі функціонування СППР здійснюється виведення правил запобігання зіткнень МПЗЗС-72 за якими класифіковано навколишні судна та відбувалося маневрування, а також надаються рекомендації судноводію щодо зміни курсу та/або швидкості власного судна, які необхідні для запобігання зіткненню.

На основі навігаційної інформації програмне забезпечення автоматично аналізує навігаційну обстановку та дає рекомендації щодо безпечного розходження з суднами цілями відповідно до вимог правил.

У вікні інтерфейсу СППР відображаються навігаційні дані власного судна, такі як: гірокомпасний курс, швидкість судна відносно води. Функціонал програмного забезпечення дозволяє встановлювати налаштування дистанції відображення суден цілей, параметрів дистанції найкоротшого зближення, величини векторів руху суден цілей та характеру векторів (відносні або абсолютні). Ліворуч у вікні програми присутній функціонал, що забезпечує процеси обміну даними між тренажерним обладнанням навігаційного тренажера Navi-Trainer Professional 5000.

На початковому етапі на інформаційному дисплеї програмного забезпечення наносяться позиції суден на розгортці радара, на основі інформації, що подається з навігаційного обладнання. Після обробки даних за допомогою системи ARPA на інформаційному дисплеї наносяться вектори суден цілей, інформація щодо швидкості та курсу всіх суден цілей, значення CPA та TCPA для кожної цілі. Інформація про параметри руху суден також відображається у спеціальній області у правій стороні екрана з вкладками для перемикавання на різні судна цілі (рис. 2).

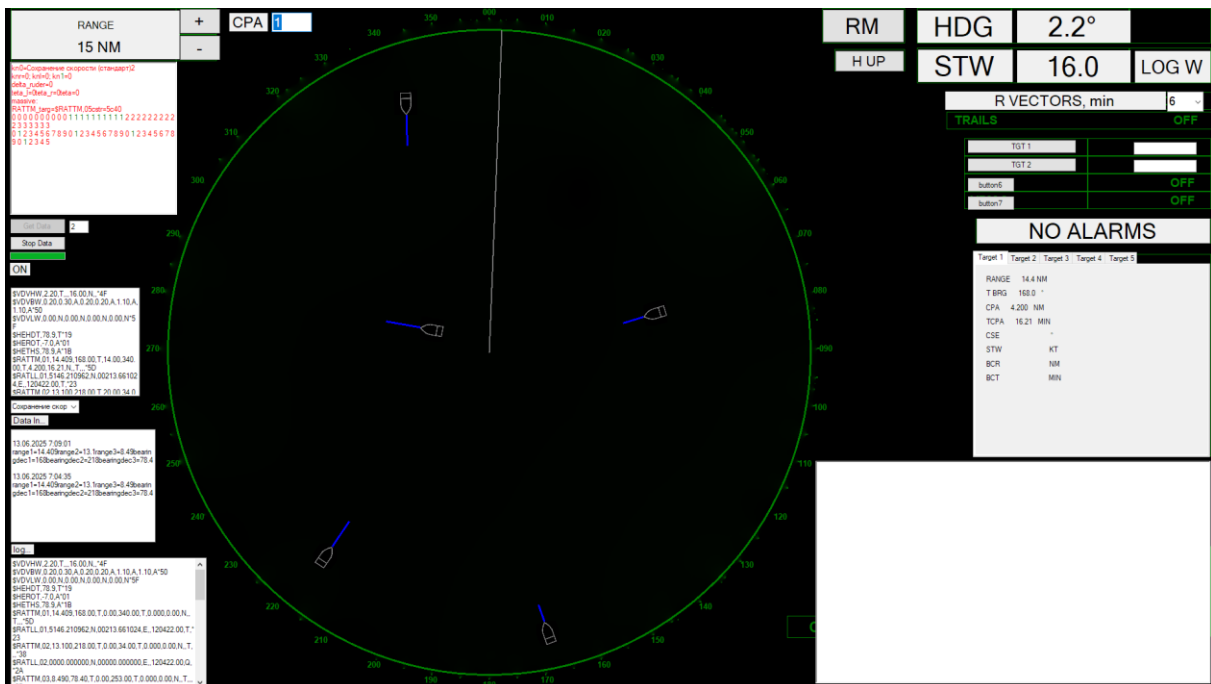


Рисунок 2 – Етап нанесення векторів руху суден цілей на інформаційному дисплеї

На наступному етапі відбувається аналіз суден цілей за критеріями небезпеки зіткнення та визначення правил МПЗЗС-72, які описують дії суден для запобігання зіткнень, їх відображення в інформаційному вікні та рекомендацій щодо уникнення зіткнення. При наведенні на цілі з'являється детальна інформація щодо параметрів руху судна та рекомендація щодо розходження з суднами (рис. 3).

Таким чином, СППР судноводія постійно відображає актуальну навігаційну ситуацію щодо розходження з суднами із зазначенням правил МПЗЗС та рівня небезпеки кожного судна.

Важливою відмінною рисою СППР, що створена, є її інтеграція з обладнанням навігаційного тренажера Wartsila «Navi-Trainer Professional 5000», що дозволяє відпрацьовувати заздалегідь завдані навігаційні вправи із застосуванням сертифікованого тренажерного обладнання. Також важливим є те, що процеси прийняття рішень з управління рухом судна мають постійний інформаційний супровід у вигляді переліку правил МПЗЗС-72, які слід враховувати для поточної навігаційної ситуації.

Застосування запропонованої СППР судноводія в навчальному процесі морських навчальних закладів дозволить підвищити ефективність навчання та контролю знань здобувачів вищої освіти, а також створити сприятливі умови для опанування ними практичних навичок застосування МПЗЗС-72 у процесі несення вахти на навігаційному містку.

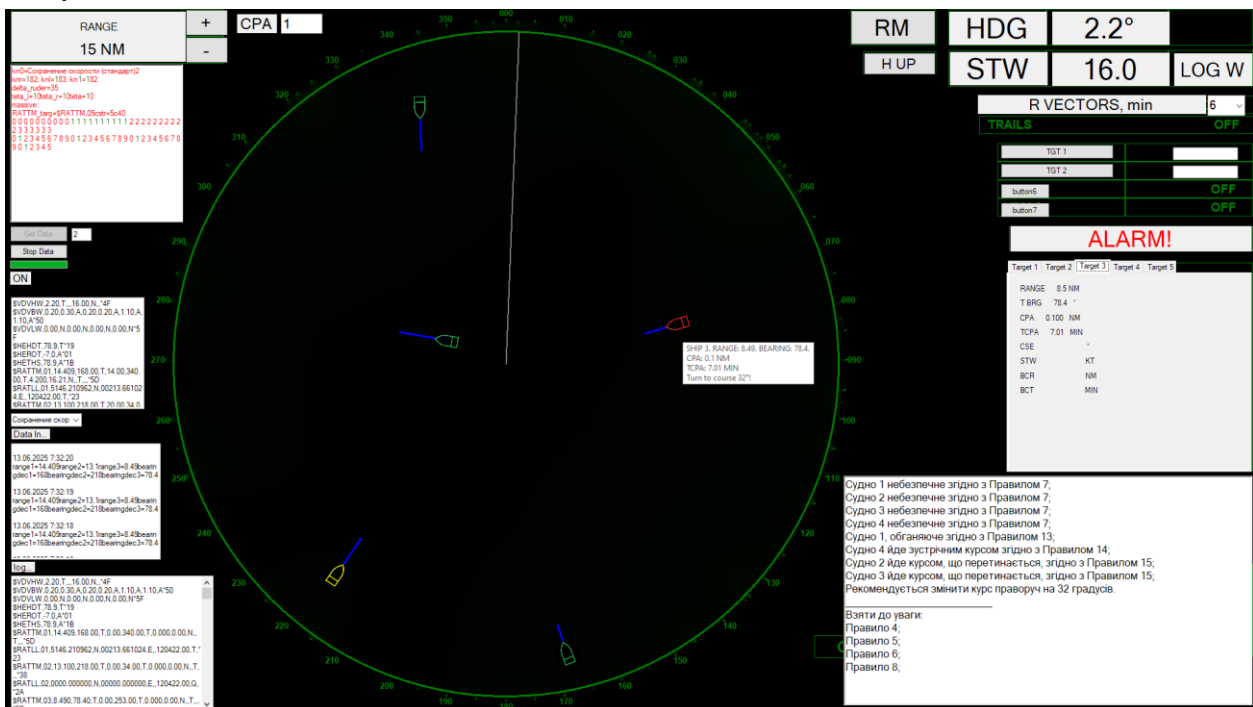


Рисунок 3 – Етап надання рекомендацій щодо розходження з суднами цілями з урахуванням правил МПЗЗС-72 та маркування суден-цілей відповідно до рівня їх небезпеки

Слід окремо зазначити, що поточна версія СППР судноводія не аналізує навігаційні небезпеки щодо мілини, берегової лінії чи плавання у вузькостях (Правила 9,10 МПЗЗС), тому навігаційні вправи слід проводити лише у відкритих водних просторах.

**Висновки.** Визначено пріоритетні напрями наукових досліджень у напрямку практичного застосування правил МПЗЗС-72 у СППР судноводія, автоматизованих системах управління рухом судна та навігаційними тренажерами. У підсумку з'ясовано, що важливими аспектами успішного застосування МПЗЗС-72 у судноводінні є не лише створення їх адекватних формальних моделей, адаптованих до застосування в технічних системах керування рухом суден, а й розвиток тренажерних систем підготовки морських фахівців із метою підвищення їх компетентності в галузі практичних навичок застосування правил під час несення вахти на навігаційному містку. Розроблено класифікацію навігаційних ситуацій,

що виникають у процесі розходження суден згідно з вимогами МПЗЗС-72 та метод оцінки рівня їх безпеки відповідно до параметрів руху суден. Здійснено практичну реалізацію запропонованої класифікації та методу оцінки рівня безпеки навігаційних ситуацій у СППР судноводія, яку інтегровано з навігаційним обладнанням тренажера Wartsila «Navi-Trainer Professional 5000». Створено програмні засоби для реалізації інформаційного обміну між СППР та навігаційним обладнанням тренажера у режимі реального часу, що дозволяє здійснювати постійний моніторинг процесу зміни навігаційних ситуацій. Практичне застосування СППР судноводія, що створена, дозволить підвищити якість тренажерної підготовки морських фахівців та визначити проблемні аспекти, які виникають у судноводіїв у процесі виконання вимог МПЗЗС-72 у різних навігаційних ситуаціях.

**Перспективи подальших досліджень.** Перспективним напрямком подальших досліджень є удосконалення СППР судноводія, що створена, шляхом розширення її функціональних можливостей для вивчення правил 9 та 10 МПЗЗС-72, які регламентують дії судноводія під час руху судна у вузькостях, прибережних ділянках та за системами розподілу руху. Також перспективним вбачається створення окремого програмного модуля для ведення статистичного аналізу успішності тренажерної підготовки фахівців, які проходять її на навігаційному тренажері, у розрізі визначення складнощів застосування окремих правил МПЗЗС-72 для різних типів навігаційних ситуацій та умов плавання.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Jesús A. G. M., Reyes P. A. COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis. *Ocean Engineering*, Volume 261, 2022, 112029, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112029>.
2. Kulakov M. A., Kozachenko A. Yu. and Stepanenko V. V. Hybrid control system by cooperation of vessels in situation of their dangerous rapprochement. “Судноводіння / Shipping & Navigation (28) <https://doi.org/10.31653/2306-5761.27.2018.103-108>.
3. Lee C., Park J., and Kim J. “Efficient COLREGs-Compliant Collision Avoidance using Turning Circle-based Control Barrier Function,” arXiv preprint arXiv:2504.19247, 2025.
4. Mohovic D., Mohovic R., Baric M. Deficiencies in Learning COLREGs and New Teaching Methodology for Nautical Engineering Students and Seafarers in Lifelong Learning Programs. *Journal of Navigation*. 2016; 69(4):765–776. <https://doi.org/10.1017/S037346331500096X>.
5. Ahmed Y. A., Hannan M. A., Oraby M. Y., & Maimun A. COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(8), 790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>.
6. Zhong S., Wen Y., Huang Y., Cheng X., and Huang L. “Ontological Ship Behavior Modeling Based on COLREGs for Knowledge Reasoning,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 2, p. 203, 2022. <https://doi.org/10.3390/jmse10020203>.
7. Barbara Stępień. Towards a New Horizon: 1972 COLREG in the Era of Autonomous Ships, *Ocean Development & International Law*, 2024, 55:1–2, 170–184, <https://doi.org/10.1080/00908320.2024.2359908>.
8. Ergun D., and Dinçer B. The Further Studies On The COLREGs (Collision Regulations). *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2015. 9. P. 17–22. <https://doi.org/10.12716/1001.09.01.02>.
9. Kreutzmann, A., Wolter, D., Dylla, F., and Lee, J. H. “Towards Safe Navigation by Formalizing Navigation Rules,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 7, no. 2, pp. 161–168, 2013, <https://doi.org/10.12716/1001.07.02.01>.

10. IMO. Convention on the international regulations for preventing collisions at Sea, 1972 (COLREGs).
11. Aylward K., Weber R., Lundh M., MacKinnon S. N., Dahlman J. Navigators' views of a collision avoidance decision support system for maritime navigation. *The Journal of Navigation* 75: 5, 2022. 1035–1048. <https://doi.org/10.1017/S0373463322000510>.
12. Ahmed Y. A., Hannan M. A., Oraby M. Y., Maimun A. COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>.
13. Zhong S., Wen Y., Huang Y., Cheng X., Huang L. Ontological Ship Behavior Modeling Based on COLREGs for Knowledge Reasoning. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 203. <https://doi.org/10.3390/jmse10020203>.
14. Kreuzmann A., Wolter D., Dylla F. & Lee J. H. Towards Safe Navigation by Formalizing Navigation Rules. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2013. Vol. 7, № 2. P. 161–168. [10.12716/1001.07.02.01](https://doi.org/10.12716/1001.07.02.01).
15. Nosov P. S., Zinchenko S. M., Ben A. P., Nahrybelnyi Ya. A., Dudchenko O. M. Models of decision making by a navigator under implicit agreements with colreg rules. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2019. №1 (20). С. 31–38. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2019.1.20.031039>.
16. Hansen, Peter & Papageorgiou, Dimitrios & Blanke, Mogens & Galeazzi, Roberto & Lützen, Marie & Mogensen, John & Bennedsen, Mette & Hansen, Dorte. (2020). COLREGs-based Situation Awareness for Marine Vessels – a Discrete Event Systems Approach. *IFAC-PapersOnLine*. 53. 14501–14508. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1453>.
17. Demirel E. & Bayer D. Further Studies On The COLREGs (Collision Regulations). *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2015. Vol. 9, № 1. P. 17–23. <https://doi.org/10.12716/1001.09.01.02>.
18. Бень А. П. Системи підтримки прийняття рішень в судноводінні: сучасний стан та перспективи подальшого розвитку. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2024. № 1 (28). С. 152–162. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.152-162>.
19. Бень А. П., Мальцев А. С. Системи підтримки прийняття рішень щодо управління рухом судна // Монографія. Херсон : Видавництво ХДМА, 2019. 244 с.
20. Pietrzykowski Z., Wołjsza P., Borkowski P. Decision support in collision situations at sea. *J. Navig.* 2017. Vol. 70. P. 447–464. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000746>.

## REFERENCES

1. Jesús, A. G. M., Reyes, P. A. (2022). COLREGs and their application in collision avoidance algorithms: A critical analysis. *Ocean Engineering*, Volume 261, 112029, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112029>.
2. Kulakov, M. A., Kozachenko, A. Yu. and Stepanenko, V. V. (2018). Hybrid control system by cooperation of vessels in situation of their dangerous rapprochement. “Судноводіння / Shipping & Navigation (28) <https://doi.org/10.31653/2306-5761.27.2018.103-108>.”
3. Lee, C., Park, J., and Kim, J. (2025). “Efficient COLREGs-Compliant Collision Avoidance using Turning Circle-based Control Barrier Function,” arXiv preprint [arXiv:2504.19247](https://arxiv.org/abs/2504.19247), 2025.
4. Mohovic, D., Mohovic, R., Baric, M. (2016). Deficiencies in Learning COLREGs and New Teaching Methodology for Nautical Engineering Students and Seafarers in Lifelong Learning Programs. *Journal of Navigation*. 69(4):765–776. <https://doi.org/10.1017/S037346331500096X>.

5. Ahmed, Y. A., Hannan, M. A., Oraby, M. Y., & Maimun, A. (2021). COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>.
6. Zhong, S., Wen, Y., Huang, Y., Cheng, X., and Huang, L. (2022). “Ontological Ship Behavior Modeling Based on COLREGs for Knowledge Reasoning,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 2, p. 203, <https://doi.org/10.3390/jmse10020203>.
7. Barbara, Stępień (2024). Towards a New Horizon: 1972 COLREG in the Era of Autonomous Ships, *Ocean Development & International Law*, 55:1–2, 170–184, <https://doi.org/10.1080/00908320.2024.2359908>.
8. Ergun, D., and Dinçer, B. (2015). The Further Studies On The COLREGs (Collision Regulations). *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 9. P. 17–22. <https://doi.org/10.12716/1001.09.01.02>.
9. Kreutzmann, A., Wolter, D., Dylla, F., and Lee, J. H. (2013). “Towards Safe Navigation by Formalizing Navigation Rules,” *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 7, no. 2, pp. 161–168, <https://doi.org/10.12716/1001.07.02.01>.
10. IMO. Convention on the international regulations for preventing collisions at Sea, 1972 (COLREGs).
11. Aylward, K., Weber, R., Lundh, M., MacKinnon, S. N., Dahlman, J. (2022). Navigators’ views of a collision avoidance decision support system for maritime navigation. *The Journal of Navigation* 75: 5, 2022. 1035–1048. <https://doi.org/10.1017/S0373463322000510>.
12. Ahmed, Y. A., Hannan, M. A., Oraby, M. Y., Maimun, A. (2021). COLREGs Compliant Fuzzy-Based Collision Avoidance System for Multiple Ship Encounters. *J. Mar. Sci. Eng.* 9, 790. <https://doi.org/10.3390/jmse9080790>.
13. Zhong, S., Wen, Y., Huang, Y., Cheng, X., Huang, L. (2022). Ontological Ship Behavior Modeling Based on COLREGs for Knowledge Reasoning. *J. Mar. Sci. Eng.* 10, 203. <https://doi.org/10.3390/jmse10020203>.
14. Kreutzmann, A., Wolter, D., Dylla, F. & Lee, J. H. (2013). Towards Safe Navigation by Formalizing Navigation Rules. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2013. Vol. 7, № 2. P. 161–168. [10.12716/1001.07.02.01](https://doi.org/10.12716/1001.07.02.01).
15. Nosov, P. S., Zinchenko, S. M., Ben, A. P., Nahrybelnyi, Ya. A., Dudchenko, O. M. (2019). Models of decision making by a navigator under implicit agreements with colreg rules. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. №1 (20). С. 31–38. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2019.1.20.031039>.
16. Hansen, Peter & Papageorgiou, Dimitrios & Blanke, Mogens & Galeazzi, Roberto & Lützen, Marie & Mogensen, John & Bennedsen, Mette & Hansen, Dorte (2020). COLREGs-based Situation Awareness for Marine Vessels – a Discrete Event Systems Approach. *IFAC-PapersOnLine*. 53. 14501–14508. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.1453>.
17. Demirel, E. & Bayer, D. (2015). Further Studies On The COLREGs (Collision Regulations). *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 9, № 1. P. 17–23. <https://doi.org/10.12716/1001.09.01.02>.
18. Ben, A. P. (2024). Systemy pidtrymky pryiniattia rishen v sudnovodinni: suchasnyi stan ta perspektyvy podalshoho rozvytku. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. № 1 (28). S. 152–162. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.152-162>.
19. Ben, A. P., Maltsev, A. S. (2019). Systemy pidtrymky pryiniattia rishen shchodo upravlinnia rukhom sudna // *Monohrafiia. Kherson* : Vydavnytstvo KhDMA. 244 s.
20. Pietrzykowski, Z., Wołęjsza, P., Borkowski, P. (2017). Decision support in collision situations at sea. *J. Navig.* Vol. 70. P. 447–464. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000746>.

**Ben A. P., Mateichuk V. M. DECISION SUPPORT SYSTEM FOR SELECTING A VESSEL MANEUVER ACCORDING TO THE REQUIREMENTS OF THE COLREG-72**

*The article is devoted to the issues of application of the Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at sea, 1972 (COLREG-72) in decision support systems (DSS) of the ship navigator. The analysis of research in the field of creation of formal models of COLREG-72 and their practical application in vessel traffic control systems is carried out. It was revealed that at the current time a promising direction of scientific research is the creation of methods for assessing the level of danger of navigational situations in accordance with the requirements of COLREG-72, adapted for use in DSS of the ship navigator. It has been proven that an important aspect of the successful application of COLREG-72 in navigation is not only the creation of their adequate formal models adapted to the use of the ship's DSS and automated vessel traffic control systems, but also the development of training systems for training marine specialists in order to increase their competence in the field of practical skills in applying rules while keeping watch on the navigation bridge. A classification of navigation situations that arise in the process of vessels diverging in accordance with the requirements of COLREG-72 and a method for assessing the level of their danger in accordance with the parameters of vessel movement have been developed. The proposed classification and method for assessing the level of danger of navigation situations have been implemented in the ship navigator's DSS, which is integrated with the navigation equipment of the Wartsila "Navi-Trainer Professional 5000" simulator. Software tools have been created to implement information exchange between the DSS and the simulator's navigation equipment in real time, which allows for constant monitoring of the process of changing navigation situations. The priority area of practical application of the created DSS is to provide simulator training for marine specialists in order to obtain practical skills in using COLREG-72 on the ship's navigation bridge. A promising area of further research is the development of a separate DSS software module for conducting statistical analysis of the success of simulator training of specialists who undergo it on a navigation simulator, in terms of determining the difficulties of applying individual rules of COLREG-72 for different types of navigation situations and sailing conditions.*

**Key words:** navigation; decision support systems; COLREG-72; navigation situation; ship control; navigation simulator; simulator training; maritime safety.

© Бень А. П., Матейчук В. М.

Статтю прийнято до редакції 17.06.2025

## СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗАПОБІГАННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В УПРАВЛІННІ АВТОНОМНИМИ СУДНАМИ

**Бень А. П.**, к.т.н., професор, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a\_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489;

**Пелихівський Л. О.**, аспірант Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: leonid.pelykhivskiy@gmail.com, ORCID: 0009-0004-1226-3091;

**Соловей О. С.**, к.т.н., доцент кафедри управління судном Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: oleksandr\_79@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2605-6788.

*Стаття присвячена питанням застосування методів запобігання зіткнень суден у процесах управління безкіпажними автономними суднами (БАС). Окреслено коло важливих питань сучасного стану розвитку індустрії автономних та безкіпажних суден. Проведено порівняльний аналіз наявних методів запобігання зіткнення суден. Визначено недоліки та переваги кожного методу, а також особливості їх практичного застосування при управлінні БАС. Наведено структуру та зазначено відмінні риси процесу управління рухом автономних та безкіпажних суден у порівнянні із суднами, якими здійснює управління судноводій. З'ясовано особливості процесу управління БАС та визначено коло методів, які мають бути застосовані для його реалізації. Розглянуто методи управління БАС та запропонована архітектура системи управління, що базується на комбінованому використанні методів нечіткої логіки, прогнозного керування та пояснюваного штучного інтелекту. Доведено, що поєднання різних методів обробки навігаційної інформації та прийняття рішень, дозволяє забезпечити якісне управління рухом БАС у режимі реального часу, за умов наявності похибок та неповноти навігаційних даних. Визначено шляхи практичної реалізації запропонованої архітектури системи управління БАС та перспективні напрямки подальших наукових досліджень у зазначеному напрямку.*

**Ключові слова:** судноводіння; методи уникнення зіткнень; системи керування; управління судном; безкіпажні судна; автономні судна; штучний інтелект; безпека мореплавства.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.145-156**

**Вступ.** У сучасних умовах глобальної трансформації морської галузі, пов'язаної з цифровізацією, автоматизацією та підвищенням вимог до безпеки судноплавства, ефективності та екологічності морських перевезень, дедалі більшого значення набуває застосування безкіпажних автономних суден (БАС, автономне судно). Зазначені судна здатні функціонувати без постійної участі людини, що відкриває нові можливості для виконання завдань у віддалених або небезпечних зонах, зменшує вплив людського фактора на процеси навігації та знижує експлуатаційні витрати. У поєднанні із розвитком штучного інтелекту (ШІ), системами дистанційного моніторингу стану та технологіями супутникової навігації, застосування БАС дозволяє істотно підвищити ефективність морських перевезень, а також рівень безпеки на водних шляхах.

Важливість індустрії автономних та безкіпажних суден вже визнана і на міжнародному рівні. Так, починаючи з 2017 року, Міжнародна морська організація (ІМО) активно досліджує правовий статус та експлуатаційні аспекти БАС у межах нормативного аналізу (Regulatory Scoping Exercise) щодо застосування наявних конвенцій до автономного судноплавства. У 2021 році ІМО визначила чотири рівні автономності (від дистанційного управління до повністю автономного режиму) та заклала основу для майбутнього правового регулювання практичного застосування БАС [1].

Крім того, ІМО визнає, що наявні міжнародні нормативно-правові документи, зокрема Міжнародні правила запобігання зіткненням суден у морі COLREG 72, а також конвенції SOLAS, MARPOL та STCW, потребують адаптації для врахування специфіки експлуатації БАС [2]. На сучасному етапі формуються рекомендації для інтеграції таких суден у наявну інфраструктуру, з дотриманням принципів безпеки, охорони навколишнього середовища та відповідальності судновласників.

Особливої значущості на поточний момент часу набуває використання БАС у сфері вантажних перевезень, океанографічних досліджень, екологічного моніторингу та реагування на надзвичайні ситуації.

Водночас слід зазначити, що розвиток галузі БАС ставить перед науковцями і низку складних викликів, зокрема в частині забезпечення їх автономності, здатності до прийняття рішень у реальному часі та інтеграції в наявну морську інфраструктуру. Саме тому дослідження наявних методів управління БАС, їх подальший розвиток та вдосконалення є важливою науково практичною задачею сьогодення.

**Актуальність досліджень.** Дослідження методів керування БАС обґрунтовано привертають інтерес дослідників по всьому світу [3–5], що обумовлено кількома обставинами. По-перше, світова морська індустрія дедалі активніше впроваджує інтелектуальні системи управління для підвищення ефективності, зниження витрат та мінімізації впливу людського фактора, який досі є однією з основних причин морських інцидентів. По-друге, стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту, сенсорики, комп'ютерного зору та цифрових комунікацій створює передумови для появи нових класів суден, здатних самостійно приймати рішення та адаптуватися до змінних умов зовнішнього середовища.

Зазначена тематика також набуває важливого значення в контексті забезпечення безпеки навігації в умовах обмеженої видимості, високої щільності руху або нестандартних ситуацій, де класичні автоматизовані системи можуть виявитись недостатньо гнучкими. Крім того, сучасне міжнародне право й регуляторна база вимагають від розробників автономних суден гарантування передбачуваної поведінки та високої надійності систем керування, що потребує нових підходів до моделювання, верифікації та тестування таких систем. Дослідження методів управління БАС є важливою складовою для формування стандартів, практик і технологічних рішень, що будуть забезпечувати безпечну інтеграцію автономних платформ у глобальну морську транспортну систему [6, 7].

Враховуючи вищенаведені обставини, особливої уваги потребує дослідження методів управління БАС при вирішенні задач маневрування та уникнення зіткнень, а також визначення шляхів їх подальшої практичної реалізації, що й обумовило вибір мети та основних задач дослідження.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу наявних методів запобігання зіткнень суден та визначення особливостей їх подальшого практичного застосування у вирішенні задач управління рухом автономними та безекіпажними суднами.

Об'єкт дослідження: процес управління рухом автономного судна.

Предмет дослідження: методи уникнення зіткнень та управління рухом автономних та безекіпажних суден.

Досягнення поставленої мети дослідження передбачає вирішення наступних задач:

1. Провести порівняльний аналіз наявних методів запобігання зіткнень морських суден, визначити їх найбільш істотні переваги, недоліки та особливості практичного застосування.

2. Визначити структуру та відмінні риси процесу управління рухом автономних та безекіпажних суден у порівнянні із суднами, якими здійснює управління судноводій.

3. Визначити методи, які мають бути застосовані для здійснення ефективного та безпечного управління рухом безекіпажних суден.

4. Розробити архітектуру системи управління автономним судном та визначити шляхи її подальшої практичної реалізації.

**Основна частина.** Під поняттям «запобігання зіткнень» у судноводінні визначають процес, в якому власне судно (автономне, або кероване судноводієм) відхиляється від запланованої траєкторії руху з метою запобігання потенційного небажаного фізичного контакту з іншим судном або навігаційною перешкодою [7]. Виходячи із вищезазначеного, можна зробити висновок, що вирішення проблеми уникнення зіткнень суден полягає у

необхідності одночасного вирішення двох взаємопов'язаних задач: ідентифікації навігаційних небезпек та прийняття рішень з управління рухом судна, спрямованих на уникнення можливих зіткнень.

Розглядаючи процеси управління рухом екіпажного та автономного судна (рис. 1), необхідно звернути увагу на певні відмінні риси, які надалі мають істотний вплив на вибір найбільш ефективних методів управління.

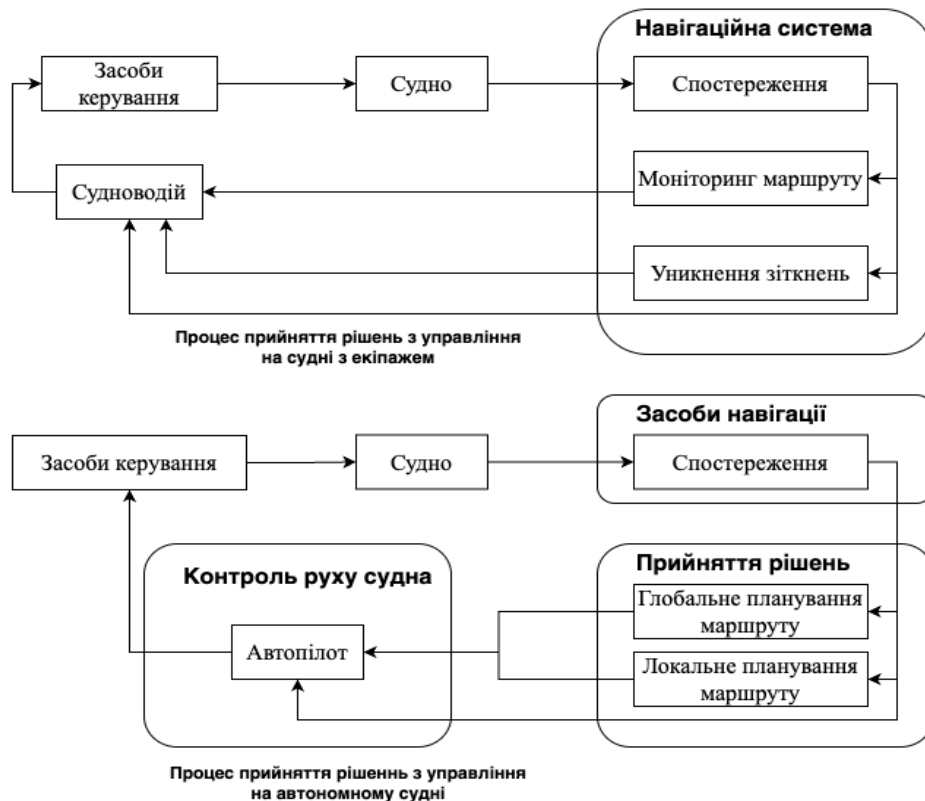


Рисунок 1 – Процеси управління рухом екіпажного та автономного судна

Так, для управління рухом екіпажного судна, застосовується інтегрована навігаційно-інформаційна система ходового містка, призначена для уникнення зіткнень переважно на етапі ідентифікації небезпек, і як наслідок, ключова роль у процесі прийняття рішень з управління судном покладається безпосередньо на судноводія.

Для автономного судна процес управління є повністю автоматизованим і здійснюється єдиною навігаційно-керуючою системою, в якій одночасно функціонує кілька контурів управління рухом, як на оперативному, так і на загальному (стратегічному) рівні.

Беручи до уваги наведену на рис. 1 структуру процесу управління рухом автономного судна, можна визначити його ключові особливості, а саме:

- необхідність забезпечення належного рівня швидкодії окремих модулів та виконавчих пристроїв системи керування для забезпечення постійного управління його рухом у режимі реального часу;
- наявність факторів неповноти та неточності вхідних навігаційних даних, які істотним чином залежать від кількості, поточного технічного стану та умов функціонування бортових навігаційних приладів та засобів зв'язку;
- високий рівень відповідальності стосовно вірності та своєчасності прийнятих рішень, у зв'язку із відсутністю людини-оператора (судноводія) як корегуючої ланки в процесі управління рухом судна;
- потреба забезпечення високого рівня надійності функціонування та збереження (хоча б і в обмеженому функціоналі) можливостей управління рухом автономного судна у випадках технічної відмови окремих навігаційних та виконавчих пристроїв або каналів зв'язку.

Слід зазначити, що розв'язання проблеми уникнення зіткнень, як екіпажних, так і автономних суден, привертає інтерес багатьох дослідників з усього світу і характеризується розмаїттям математичних моделей, методів, апаратних та програмних засобів, що застосовуються у процесі її вирішення.

Так, у роботі [7] описано застосування методів уникнення зіткнень суден із застосуванням правил COLREG 72 у поєднанні з математичними моделями на основі нечіткої логіки та мереж Байєса. Система застосовує сценарний підхід у процесі формування рішень, якій дозволяє додатково враховувати принципи «доброї морської практики». Недоліком системи є те, що база сценаріїв щодо можливих дій не є вичерпною, що не гарантує отримання необхідного рішення з управління судном для будь-якої навігаційної ситуації.

Роботи [8, 9] присвячено питанням застосування методів уникнення зіткнень на основі віртуальних векторів руху суден цілей. Так, у дослідженні [8], описано алгоритм методу штучного поля потенціалів (Artificial Potential Field, APF), згідно з яким формується поле потенціалів, в якому наявні відштовхувальні потенціали навколо перешкод руху судна, і, навпаки, потенціал, що притягує – у кінцевій точці маршруту. Сума потенціалів у різних точках визначає результуючу віртуальну силу, яка керує рухом судна. Ранні версії алгоритму не забезпечували уникнення зіткнень та не були пристосовані до навігаційних ситуацій, що зазнають динамічних змін, а лише вказували рекомендований напрямок руху. З метою можливості уникнення зіткнень у динамічному середовищі, дослідники вдосконалили базовий алгоритм, враховуючи два фактори: швидкість руху перешкод і максимальне гальмування судна. У роботі [9] досліджено метод обмеженого циклу (Limited Cycle Method, LCM), який використовує для планування руху судна в умовах бурхливого моря еліпсоподібні траєкторії. Обидва методи, APF і LCM, зазвичай ігнорують під час планування руху динаміку судна. Слід зазначити, що метод APF може в процесі пошуку рішень «застрягти в локальному мінімумі», а метод LCM розглядає лише одну перешкоду або одну групу перешкод за одну ітерацію, за умов, що перешкоди повинні бути статичними або мати низьку швидкість. Проте виявлено, що цей метод ефективно працює зі статичними перешкодами в умовах бурхливого моря [10]. Також методи APF і LCM формують лише одне рішення, яке не обов'язково є оптимальним.

Методи дискретного керування рухом судна у просторі рішень, які розглянуто у публікаціях [10–14], ґрунтуються на послідовній перевірці кожної потенційної траєкторії руху на можливість зіткнення, після чого з усіх безпечних варіантів обирається найкращий. Зазначені методи передбачають, що модель руху судна заздалегідь відома, а фактори впливу зовнішнього середовища тимчасово ігноруються. До вказаної групи належать методи: диску рішень (Decision Disc, DD), динамічного вікна (Dynamic Window, DW), дискретної оптимізації (Discrete Inputs Optimization, DIO), пошуку на основі решіток (Lattice-based Search, LBS) та повного перебору (Brute-force Search, BFS).

Згідно з методом DD здійснюється постійна перевірка безпеки траєкторії руху за умов незмінності керуючих дій. Метод DW використовує в якості вихідних даних лінійну та кутову швидкості судна, далі враховуються фізичні обмеження на рух судна, і простір пошуку рішень (діапазони швидкостей) звужується шляхом збереження лише тих пар швидкостей, які гарантують, що судно може зупинитися до зіткнення з перешкодою. Збережені пари швидкостей формують динамічне вікно, в якому і здійснюється вибір остаточного рішення з керування. Істотним недоліком методу є його сприйнятливість до знаходження локальних мінімумів.

Метод дискретної оптимізації DIO базується на застосуванні цільових функцій траєкторій руху, які мають більш високі значення, якщо траєкторії руху проходять ближче до навігаційних перешкод. Відповідно, мінімізація таких функцій дозволяє обрати більш безпечні маршрути судна.

Метод пошуку на основі решіток LBS будує граф з усіх можливих керувань на кожному кроці, що дозволяє забезпечити високу точність та надійність керування. Але цей

метод є вельми затратним із точки обсягів обчислень та, відповідно, часу, необхідного для виконання розрахунків. Метод повного перебору BFS здійснює порівняльну оцінку усіх можливих варіантів керувань, однак через високу складність також потребує введення спрощень опису навігаційних ситуацій. Зважаючи на високу ресурсомісткість, два останні методи можуть бути застосовані на практиці лише за умов введення певних додаткових обмежень щодо вихідних даних та областей пошуку рішень.

У роботах [15–18] розглянуто методи пошуку рішень з управління рухом судна у неперервному просторі керувань, які спрямовані на знаходження безпечних (без можливих зіткнень) траєкторій. До вказаної групи методів слід віднести наступні: метод пошуку швидкісних перешкод (Velocity Obstacle, VO) та його модифікації (Nonlinear Velocity Obstacle, NVO) та (Generalized Velocity Obstacle, GVO), а також метод конусів огляду (Vision Cone, VC) та прогнозного керування (Model Predictive Control, MPC).

Згідно з методами VO, NVO та GVO відбувається визначення небезпечних зон руху залежно від швидкостей та напрямків руху суден цілей, далі обирається траєкторія руху власного судна, яка оминає небезпечні ділянки. До недоліків зазначених методів слід віднести наявність припущень стосовно сталості швидкостей суден цілей, неврахування (повне або часткове) обмежень руху власного судна та суден цілей, а також фіксована форма опису небезпечної ділянки, яка вважається опуклою (коло, еліпс тощо).

Метод VC передбачає введення обмежень на область руху власного судна у вигляді конуса (конуса безпеки руху). Недоліком методу є те, що він не надає можливості враховувати рух кількох суден цілей одночасно і передбачає, що швидкість власного судна є більшою за швидкість судна цілі.

Метод MPC дозволяє обрати безпечну траєкторію руху судна у дискретному часі з урахуванням динамічних обмежень. Недоліком методу є його чутливість до знаходження локальних мінімумів цільової функції і необхідності проведення верифікації отриманих рішень.

У роботах [19, 20] розглянуто методи формування безпечної траєкторії руху суден на основі перепланування маршруту. Процес перепланування траєкторії руху починається з того моменту часу, коли ризик можливого зіткнення перевищує певний поріг. Методи перепланування можна поділяти на дві групи: ті, які застосовують методи пошуку з використанням графів (Graph Search, GS), та інші. У першому випадку формується «карта вартостей», згідно з якою зона навколо перешкод має високу «ціну», а потім здійснюється пошук найменш витратного шляху за допомогою допоміжних методів, таких, як метод швидкого розповсюдження, відпалу або оптимізації рою часток.

Інша група застосовує еволюційні алгоритми, які не вимагають побудови графу. Це, зокрема, алгоритм мурашиної колонії, генетичні алгоритми та еволюційні методи пошуку рішень (Evolutionary algorithm, EA). Перевагою методів перепланування маршруту є універсальність та гнучкість застосування, проте їх істотним недоліком є висока обчислювальна складність.

Наявні переваги та недоліки кожної з вищевказаних груп методів спонукають дослідників до одночасного застосування для вирішення проблеми уникнення зіткнень кількох методів із різних груп. Так, у роботі [21] автори використали алгоритм множини швидкісних перешкод разом із правилами COLREG 72 для виключення швидкостей, які призводять до зіткнень або порушують правила руху суден. У дослідженні [8] використано метод, заснований на правилах у поєднанні з методом штучного потенційного поля для керування БАС.

Таким чином, проведений ґрунтовний аналіз низки робіт із зазначеної тематики [6–21], дозволив виділити наступні ключові групи методів, які можуть бути використані для вирішення проблеми уникнення зіткнень.

1. Методи на основі правил, що передбачають застосування продукційних правил логічного висновку типу “якщо-то” для прийняття рішень з управління рухом суден з метою уникнення зіткнень.

2. Методи, які засновані на формуванні віртуального векторного поля руху суден, що дозволяє оцінити наявну навігаційну ситуацію в цілому та вибрати найбільш безпечну траєкторію.

3. Методи дискретного управління рухом судна та пошуку рішень у дискретному просторі керуючих впливів, залежно від навігаційної ситуації, що має місце.

4. Методи адаптивного неперервного управління судном з урахуванням наявних обмежень його руху.

5. Методи перепланування траєкторій руху судна.

6. Гібридні методи, які є за своєю сутністю поєднанням двох або більше з вищезазначених методів із метою більш ефективного та якісного пошуку рішень.

Серед математичних моделей, які використовуються для опису рух суден цілей та власного судна застосовуються кінематичні [10], динамічні [13, 14] та геометричні [15] моделі.

Підсумки проведеного аналізу математичних моделей та методів, що застосовуються для вирішення питань уникнення зіткнень, наведено у таблиці 1, у якій зазначено ключові характеристики кожного методу, його переваги та недоліки, а також особливості практичного застосування.

Таблиця 1 – Порівняння наявних методів запобігання зіткнень суден

№	Назва методу	Скорочена абревіатура назви методу	Модель руху судна	Кількість суден цілей	Результат розв'язку (дії з управління рухом)	Гарантована Оптимальність управління	Опис (особливості практичного застосування, переваги та недоліки), джерело
1	Логічні правила	Single-rule	–	Одне	Маневр судна	Ні	Простий з точки зору практичної реалізації, але має певні обмеження у застосуванні (лише відкрите море) [6]
2		Multiple-rule	–	Одне	Маневр судна (швидкість, курс)	Ні	Простий з точки зору практичної реалізації, не забезпечує можливість врахування усіх можливих сценаріїв керувань [7]
3	Віртуальні вектори руху	APF	–	Кілька	Маневр судна (курс)	Ні	Простий з точки зору практичної реалізації. Схильний до потрапляння в локальний мінімум. Непридатний для керування в навігаційних ситуаціях, що динамічно змінюються [8]
4		LCM	–	Одне	Траєкторія руху	Ні	Простий з точки зору практичної реалізації. Аналізує рух лише однієї швидкісної перешкоди. Непридатний для керування в навігаційних ситуаціях, що динамічно змінюються [9]
5	Дискретне управління рухом	DW	Кінематична/ Динамічна	Кілька	Маневр судна (швидкість, кутова швидкість)	Так	Має широкий спектр застосувань, здатний формувати альтернативні рішення. Непридатний для керування в навігаційних ситуаціях, що динамічно змінюються. Припинення розрахунків може призвести до зіткнення [10]

Продовження таблиці 1

6		DD	Геометрична	Кілька	Маневр судна (швидкість, курс)	Так	Пропонує альтернативні рішення, але не враховує динаміку судна [11]
7		DIO	Геометрична/Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Так	Пропонує альтернативні рішення, складний із точки зору практичної реалізації [12]
8		LBS	Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Так	Точний, але має високу ресурсомісткість і тривалий час пошуку рішень [13]
9		BFS	Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Ні	Точний, але має високу ресурсомісткість і тривалий час пошуку рішень [14]
10	Постійне адаптивне управління рухом	VO	Геометрична	Кілька	Маневр судна	Так	Простий, ефективний у застосуванні. Пропонує альтернативні рішення, але не враховує динаміку судна [15]
11		GVO	Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Так	Враховує динамічні обмеження та формує альтернативні рішення, проте має певні похибки внаслідок застосування лінеаризації [16]
12		VC	Динамічна	Одне	Траєкторія, керуючі дії	Так	Простий і ефективний, але має обмеження щодо застосування (уникнення зіткнень лише з однією перешкодою, що має швидкість, менше ніж власне судно) [17]
13		MPC-SA	Динамічна	Кілька	Траєкторія, керуючі дії	Так	Дозволяє враховувати динамічні обмеження. Чутливий до знаходження локальних мінімумів цільової функції, є необхідність проведення верифікації рішень, які отримані [18]
14	Пере-планування маршруту	GS	–	Кілька	Траєкторія руху	Так	Універсальність застосування, висока ресурсомісткість та обчислювальна складність [19]
15		EA	–	Кілька	Траєкторія руху	Так	Універсальність застосування, висока ресурсомісткість та обчислювальна складність [20]

Розглядаючи наведені методи уникнення зіткнень із позицій їх подальшого застосування у БАС, та беручи до уваги структуру процесу управління рухом автономного судна (рис. 1) і його особливості, можна дійти до висновку, що для різних контурів обробки інформації з управління БАС, необхідно застосовувати різні методи управління. Так, на стратегічному рівні керування БАС, доцільно застосовувати методи перепланування маршруту та дискретного управління рухом, тоді як на рівні оперативного управління слід застосовувати поєднання методів логічних правил та віртуальних векторів руху.

Також, відповідно до задач дослідження, було визначено коло методів управління судновими системами, які доцільно застосовувати в БАС. Методи управління судновими

системами та пристроями можуть бути розподілені на шість основних груп: класичні PID-регулятори, адаптивні, робастні, нечіткої логіки, моделі прогнозованого керування та методи ШІ. Кожна група методів має свої переваги та недоліки залежно від умов практичного застосування, а також вимог до точності та наявних обчислювальних ресурсів [5].

1. Класичні PID-регулятори – найпростіші та найбільш поширені методи керування в умовах наявності незначних зовнішніх впливів.

2. Адаптивні методи, дозволяють автоматично змінювати параметри залежно від зміни характеристик системи керування або зовнішніх умов.

3. Робастні методи ( $H_{\infty}$ -керування) забезпечують високу стійкість до невизначеності та неповноти вихідних даних, проте мають високу обчислювальну складність, що утруднює їх практичне застосування для здійснення управління судном у режимі реального часу.

4. Методи нечіткої логіки ефективні для моделювання складних систем без точного математичного опису, зокрема при маневруванні в умовах обмеженої видимості або при уникненні зіткнень.

5. Моделі прогнозованого керування забезпечують високу точність руху при складних траєкторіях, але вимагають значних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх використання.

6. Методи ШІ та гібридні методи керування. Дозволяють поєднати ефективність точного контролю з гнучкістю практичного застосування, але є також доволі вибагливими до задіяних апаратних і програмних ресурсів.

Гібридні підходи є найбільш перспективними для майбутніх систем автономного судноплавства, оскільки дозволяють поєднувати сильні сторони кількох методів керування високу точність, адаптивність до змін середовища та стійкість до зовнішніх збурень. Інтеграція засобів ШІ [22, 23] у системи керування дозволяє істотно підвищити якість та надійність таких процесів для БАС. Вищезазначене особливо актуальне у випадках наявності збурень зовнішнього середовища, маневрування суден в обмеженому просторі, неповноти навігаційних даних, за умов обмежень часу на прийняття рішень та критичних ситуаціях.

У результаті проведеного дослідження сучасних методів керування встановлено, що жоден із класичних підходів – PID-регулювання або методи оптимального (робастного) керування не здатні повною мірою задовольнити вимоги до адаптивності, стійкості та пояснюваності рішень в умовах динамічних навігаційних ситуацій та наявності зовнішніх впливів. Методи побудовані на нечіткій логіці, машинному навчанні або МРС, мають окремі сильні сторони, але водночас обмежені при застосуванні у реальних сценаріях через складність налаштування, чутливість до зміни параметрів зовнішнього середовища або недостатню прозорість дій.

Виходячи з вищенаведеного, вбачаємо доцільним застосування багаторівневої архітектури системи керування БАС, що передбачає застосування декількох методів, таких як: нечітка логіка, моделі прогнозованого керування та пояснюваний ШІ. З урахуванням вищезазначеного, була розроблена архітектура системи керування БАС, яка наведена на рис. 2.

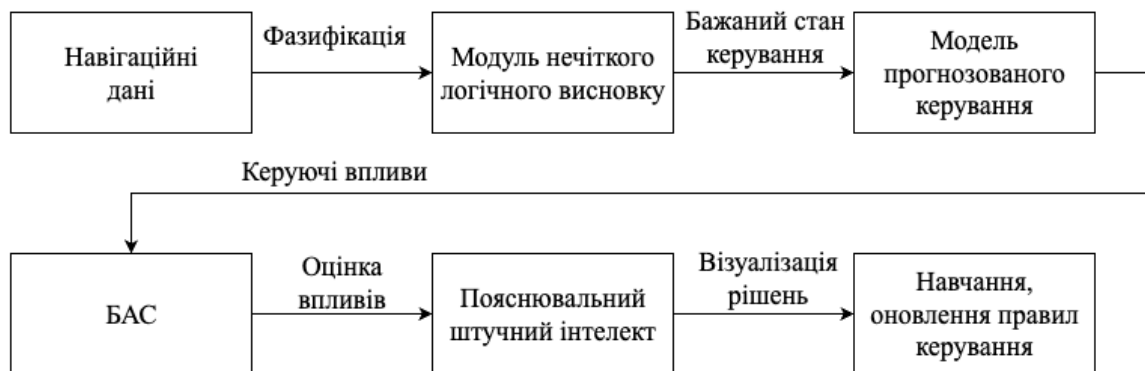


Рисунок 2 – Архітектура системи управління рухом БАС

Процес обробки навігаційних даних та управління БАС згідно з представленою архітектурою здійснюється наступним чином. На початковому етапі виконується попередня обробка навігаційних даних та переведення їх до формату, придатному до обробки у модулі нечіткого логічного висновку. Далі визначаються необхідні керування рухом БАС на основі наявного відхилення від планованого маршруту, оцінки наявних навігаційних ризиків (перешкоди, вітер, течії) та бажаної майбутньої позиції БАС. Модель прогнозованого керування розв'язує оптимізаційну задачу управління рухом БАС, використовуючи поточний курс та швидкість як базову траєкторію та враховує наявні параметри стану та обмеження руху: позиція, швидкість, прискорення, кутова швидкість, припустимі діапазони змін параметрів керування. Отриманий результат надходить до технічних засобів управління БАС та здійснює зміни траєкторії руху БАС, після чого система управління оцінює успішність здійсненого керування (точність дотримання заданої траєкторії руху за умов не перевищення завданого порогу ризику зіткнення). Модуль пояснюваного ШІ інтерпретує, які саме нечіткі правила були активовані, і зміна яких саме параметрів руху мала найбільший вплив, та, за потребою, здійснює візуалізацію маневру БАС оператору, якій може дистанційно спостерігати рух БАС. У випадку успішного виконання маневру, відбувається оновлення бази правил системи керування для їх застосування надалі у навігаційних ситуаціях, подібних до поточної.

**Висновки.** Розглянута структура та виявлені відмінні риси процесу управління рухом автономних та БАС у порівнянні із суднами, якими здійснює управління судноводій, дозволяють зробити висновок стосовно наявності у системах управління такими суднами кількох контурів керування, що, в свою чергу, обумовлює необхідність комбінованого застосування різних методів керування рухом.

Проведений порівняльний аналіз наявних методів запобігання зіткнень морських суден дозволив визначити їх найбільш істотні переваги, недоліки та особливості практичного застосування. Визначена перспективність застосування гібридних методів, які базуються на застосуванні кількох підходів: нечітка логіка, прогнозоване керування, пояснюваний ШІ тощо. Поєднання різних методів обробки навігаційної інформації та прийняття рішень дозволяє забезпечити якісне управління рухом БАС у режимі реального часу за умов наявності похибок та неповноти навігаційних даних.

Перспективним напрямком подальших наукових досліджень є розробка відповідних програмних та апаратних засобів керування БАС, які дозволять реалізувати запропоновану архітектуру системи керування на рівні практичних розробок.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. IMO. Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS) – MSC.1-Circ.1638, London, UK. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MASSRSE2021.aspx>.
2. IMO. Autonomous shipping – International Maritime Organization. MSC.1-Circ.1605, London, UK. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>.
3. A. Q. Ansari, Department of Elect. Engg., Faculty of Engg. and Technology, Jamia Millia Islamia, New Delhi-110025, India. The Basics of Fuzzy Logic: A Tutorial Review. [https://www.researchgate.net/publication/278031775\\_The\\_Basics\\_of\\_Fuzzy\\_Logic\\_A\\_Tutorial\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/278031775_The_Basics_of_Fuzzy_Logic_A_Tutorial_Review).
4. Eriksen B.-O. H., Breivik M., Wilthil E. F., Flåten A. L., Brekke E. F. The branching-course model predictive control algorithm for maritime collision avoidance. J. Field Robotics. 2019;36:1222–1249. <https://doi.org/10.1002/rob.21900>.
5. Yujian Wang, Chao Shen, Jiahui Huang & Hua Chen Model-free adaptive control for unmanned surface vessels: a literature review. <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2316170>.

6. Fang M.-C., Tsai K.-Y. & Fang C.-C. A Simplified Simulation Model of Ship Navigation for Safety and Collision Avoidance in Heavy Traffic Areas. *Journal of Navigation*, 71(04), 837–860. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000923>.
7. Perera L. P., Carvalho J. P. & Soares C. G. (2012). Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy-Bayesian Decision/Action Formulation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(2), 204–219. <https://doi.org/10.1109/Joe.2012.2184949>.
8. Lyu H. & Yin Y. (2018). COLREGS-Constrained Real-time Path Planning for Autonomous Ships Using Modified Artificial Potential Fields. *Journal of Navigation*, 72(3), 588–608. <https://doi.org/10.1017/s0373463318000796>.
9. Mahini F., DiWilliams L., Burke K. & Ashrafiuon H. An experimental setup for autonomous operation of surface vessels in rough seas. *Robotica*, 31(05), 703–715. <https://doi.org/10.1017/S0263574712000720>.
10. Serigstad E. Hybrid Collision Avoidance for Autonomous Surface Vessels. NTNU. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.460>.
11. Szlapczynski R. & Krata P. Determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in severe weather conditions. *Ocean Engineering*, 158, 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.092>.
12. Li S., Liu J., Cao X. & Zhang Y. A Novel Method for Solving Collision Avoidance Problem in Multiple Ships Encounter Situations. 11184, 47–66. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00898-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00898-7_4).
13. Shah B. C., Švec P., Bertaska I. R., Sinisterra A. J., Klinger W., von Ellenrieder K., Gupta S. K. Resolution-adaptive risk-aware trajectory planning for surface vehicles operating in congested civilian traffic. *Autonomous Robots*, 40(7), 1139–1163. <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9529-x>.
14. Zhang W. B., Goerlandt F., Montewka J. & Kujala P. A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 107, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.046>.
15. Zhuang J. Y., Zhang L., Zhao S. Q., Cao J., Wang B. & Sun H. B. Radar-based collision avoidance for unmanned surface vehicles. *China Ocean Engineering*, 30(6), 867–883. <https://doi.org/10.1007/s13344-016-0056-0>.
16. Chen P., Huang Y., Mou J. & van Gelder P. H. A. J. M. Ship collision candidate detection method: A velocity obstacle approach. *Ocean Engineering*, 170, 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.023>.
17. Wiig M. S., Pettersen K. Y. & Savkin A. V. A Reactive Collision Avoidance Algorithm for Nonholonomic Vehicles. 2017 Ieee Conference on Control Technology and Applications (Ccta 2017), 1776-1783. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.345>.
18. Abdelaal M., Franzle M. & Hahn A. Nonlinear Model Predictive Control for trajectory tracking and collision avoidance of underactuated vessels with disturbances. *Ocean Engineering*, 160, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.026>.
19. Lazarowska A. A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, 71, 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.11.005>.
20. Lazarowska A. Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation. *Journal of Navigation*, 68(02), 291–307. <https://doi.org/10.1017/s0373463314000708>.
21. Kuwata Y., Wolf M. T., Zarzhitsky D. & Huntsberger T. L. Safe Maritime Autonomous Navigation With COLREGS, Using Velocity Obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 110–119. <https://doi.org/10.1109/Joe.2013.2254214>.
22. Saurav Sarkar, Soma Das, Ananya Chanda, Sayan Biswas, Classify Chronic Wounds, Explainable and Responsible Artificial Intelligence in Healthcare, <https://doi.org/10.1002/9781394302444.ch12>, (297–322), (2025).

23. Angelov P. P., Soares E. A., Jiang R., Arnold N. I. & Atkinson P. M. Explainable artificial intelligence: an analytical review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 11(5), e1424. <https://doi.org/10.1002/widm.1424>.

## REFERENCES

1. IMO. (2021). Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS) – MSC.1-Circ.1638, London, UK. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MASSRSE2021.aspx>.
2. IMO. (2019) Autonomous shipping – International Maritime Organization. MSC.1-Circ.1605, London, UK. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Autonomous-shipping.aspx>.
3. A. Q. Ansari, Department of Elect. Engg., Faculty of Engg. and Technology, Jamia Millia Islamia, New Delhi-110025, India. The Basics of Fuzzy Logic: A Tutorial Review. [https://www.researchgate.net/publication/278031775\\_The\\_Basics\\_of\\_Fuzzy\\_Logic\\_A\\_Tutorial\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/278031775_The_Basics_of_Fuzzy_Logic_A_Tutorial_Review).
4. Eriksen, B.-O. H., Breivik, M., Wilthil, E. F., Flåten, A. L., Brekke, E. F. (2019). The branching-course model predictive control algorithm for maritime collision avoidance. *J. Field Robotics*. 2019;36:1222–1249. <https://doi.org/10.1002/rob.21900>.
5. Yujuan Wang, Chao Shen, Jiahui Huang & Hua Chen (2024). Model-free adaptive control for unmanned surface vessels: a literature review. <https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2316170>.
6. Fang, M.-C., Tsai, K.-Y., & Fang, C.-C. (2017). A Simplified Simulation Model of Ship Navigation for Safety and Collision Avoidance in Heavy Traffic Areas. *Journal of Navigation*, 71(04), 837–860. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000923>.
7. Perera, L. P., Carvalho, J. P., & Soares, C. G. (2012). Intelligent Ocean Navigation and Fuzzy-Bayesian Decision/Action Formulation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 37(2), 204–219. <https://doi.org/10.1109/Joe.2012.2184949>.
8. Lyu, H., & Yin, Y. (2018). COLREGS-Constrained Real-time Path Planning for Autonomous Ships Using Modified Artificial Potential Fields. *Journal of Navigation*, 72(3), 588–608. <https://doi.org/10.1017/s0373463318000796>.
9. Mahini, F., DiWilliams, L., Burke, K., & Ashrafiuon, H. (2013). An experimental setup for autonomous operation of surface vessels in rough seas. *Robotica*, 31(05), 703–715. <https://doi.org/10.1017/S0263574712000720>.
10. Serigstad, E. (2017). Hybrid Collision Avoidance for Autonomous Surface Vessels. NTNU. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.460>.
11. Szlapczynski, R., & Krata, P. (2018). Determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in severe weather conditions. *Ocean Engineering*, 158, 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.092>.
12. Li, S., Liu, J., Cao, X., & Zhang, Y. (2018). A Novel Method for Solving Collision Avoidance Problem in Multiple Ships Encounter Situations. 11184, 47–66. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00898-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00898-7_4).
13. Shah, B. C., Švec, P., Bertaska, I. R., Sinisterra, A. J., Klinger, W., von Ellenrieder, K., Gupta, S. K. (2015). Resolution-adaptive risk-aware trajectory planning for surface vehicles operating in congested civilian traffic. *Autonomous Robots*, 40(7), 1139–1163. <https://doi.org/10.1007/s10514-015-9529-x>.
14. Zhang, W. B., Goerlandt, F., Montewka, J., & Kujala, P. (2015). A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 107, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.046>.
15. Zhuang, J. Y., Zhang, L., Zhao, S. Q., Cao, J., Wang, B., & Sun, H. B. (2016). Radar-based collision avoidance for unmanned surface vehicles. *China Ocean Engineering*, 30(6), 867–883. <https://doi.org/10.1007/s13344-016-0056-0>.

16. Chen, P., Huang, Y., Mou, J., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2018). Ship collision candidate detection method: A velocity obstacle approach. *Ocean Engineering*, 170, 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.023>.
17. Wiig, M. S., Pettersen, K. Y., & Savkin, A. V. (2017). A Reactive Collision Avoidance Algorithm for Nonholonomic Vehicles. 2017 Ieee Conference on Control Technology and Applications (Ccta 2017), 1776–1783. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.345>.
18. Abdelaal, M., Franzle, M., & Hahn, A. (2018). Nonlinear Model Predictive Control for trajectory tracking and collision avoidance of underactuated vessels with disturbances. *Ocean Engineering*, 160, 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.04.026>.
19. Lazarowska, A. (2017). A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, 71, 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.11.005>.
20. Lazarowska, A. (2014). Ship's Trajectory Planning for Collision Avoidance at Sea Based on Ant Colony Optimisation. *Journal of Navigation*, 68(02), 291–307. <https://doi.org/10.1017/s0373463314000708>.
21. Kuwata, Y., Wolf, M. T., Zarzhitsky, D., & Huntsberger, T. L. (2014). Safe Maritime Autonomous Navigation With COLREGS, Using Velocity Obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 110-119. <https://doi.org/10.1109/Joe.2013.2254214>.
22. Saurav Sarkar, Soma Das, Ananya Chanda, Sayan Biswas, Classify Chronic Wounds, Explainable and Responsible Artificial Intelligence in Healthcare, <https://doi.org/10.1002/9781394302444.ch12>, (297-322), (2025).
23. Angelov, P. P., Soares, E. A., Jiang, R., Arnold, N. I., & Atkinson, P. M. (2021). Explainable artificial intelligence: an analytical review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 11(5), e1424. <https://doi.org/10.1002/widm.1424>.

**Ben A. P., Pelykhivskiy L. O., Solovey O. S. MODERN METHODS OF PREVENTING SHIP COLLISIONS AND THEIR APPLICATION IN CONTROLLING AUTONOMOUS SHIPS**

*The article is devoted to the issues of applying methods for preventing ship collisions in the processes of controlling unmanned autonomous vessels (UAVs). A range of important issues of the current state of development of the autonomous and unmanned vessel industry is outlined. A comparative analysis of existing methods for preventing ship collisions is conducted. The disadvantages and advantages of each method are identified, as well as the features of their practical application in UAV control. The structure and distinctive features of the process of controlling the movement of autonomous and unmanned vessels in comparison with vessels controlled by a navigator are presented. The peculiarities of the UAV control process are clarified and a range of methods that should be applied for its implementation is determined. The UAV control methods are considered and the architecture of the control system is proposed, which is based on the combined use of fuzzy logic methods, predictive control and explained artificial intelligence. It has been proven that the combination of various methods of processing navigation information and decision-making allows for high-quality control of UAV movement in real time, in the presence of errors and incompleteness of navigation data. Ways of practical implementation of the proposed architecture of the UAV control system and promising directions of further scientific research in this direction are identified.*

**Key words:** navigation; collision avoidance methods; control systems; ship control; unmanned vessels; autonomous vessels; artificial intelligence; maritime safety.

© Бень А. П., Пелихівський Л. О., Соловей О. С.

Статтю прийнято до редакції 16.06.2025

***ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ***  
***TRANSPORT TECHNOLOGIES***

## DETERMINING THE IMPACT OF THE HUMAN OPERATOR FACTOR USING A NAVIGATION SIMULATOR

**Kochubei P.**, Graduate student, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: [pavlo.kochubei@ksma.ks.ua](mailto:pavlo.kochubei@ksma.ks.ua);

**Nosov P.**, Ph.D., Associate Professor, Department of ship computer systems and networks, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: [pason@ukr.net](mailto:pason@ukr.net), ORCID: 0000-0002-5067-9766.

*As maritime operations become increasingly complex, there is a growing need for objective, scalable methods to evaluate seafarer competence beyond traditional instructor-based assessments. This study presents a comprehensive, data-driven framework for analyzing cadet performance in maritime simulator exercises, utilizing state-of-the-art unsupervised learning and explainable AI. The research draws on multivariate time-series data from navigational simulations, capturing vessel dynamics, control actions, and environmental parameters across dozens of features. A rigorous preprocessing pipeline was applied, combining statistical feature aggregation and redundancy reduction through Pearson correlation and Mutual Information. This yielded a compact, yet informative feature set encompassing control inputs, navigational states, and vessel motions. To offset limited number of sessions small in the dataset, each simulation was split into meaningful intervals by applying rolling window statistics. Each window was then encoded as a summary vector, reflecting both central tendencies and temporal variability. The analysis employed the HDBSCAN clustering algorithm, which excels in detecting groups of variable density and naturally identifies outlier behaviors—critical in the context of training evaluation. The resulting clusters were projected into lower-dimensional space via t-SNE, providing interpretable visualizations of cadet performance patterns. To further elicit the distinguishing characteristics of each group, a linear Support Vector Machine was trained to predict cluster membership, with SHapley Additive exPlanations (SHAP) attributing each decision to underlying features. Key findings reveal that clusters align with distinct navigational strategies: stable, conservative approaches are differentiated from more dynamic or risk-prone styles by features such as roll velocity, yaw rate, and engine RPM. Sessions flagged as outliers typically exhibited abrupt maneuvers or inconsistent control usage, highlighting potential skill gaps. The SHAP-based interpretability layer transforms complex model outputs into actionable instructional feedback, enabling targeted interventions and tailored training. Overall, this automated approach has potential to become a transparent, scalable alternative to subjective grading in maritime education, with significant implications for enhancing safety and developing individualized learning pathways. The proposed system demonstrates strong potential for integration into real-world training environments and continuous improvement as more operational data becomes available.*

**Key words:** water transport; operation of transport facilities; navigation safety; human factor; automation; risk; intelligent systems; LAD.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.158-170**

**Introduction.** Despite technological advances in the maritime industry – ship design, navigational systems, and sensor technologies – human error remains a primary contributing factor to naval accidents, accounting for more than 85% of all accidents [1]. The International Maritime Organization (IMO) continues to emphasize the critical role of human factors in maritime safety, especially in complex navigational contexts such as port approaches and congested sea lanes [2].

Advancements in sensor technologies, such as ECG, eye tracking, etc., increased connectivity of ships, a surge in computational and data collection capabilities, and popularization of machine learning techniques have expanded existing and allowed new capabilities in monitoring and assisting humans in the maritime context [3]. These technological improvements allowed advancements in navigator fatigue detection, advanced trajectory prediction, anomaly detection in AIS data, and many other use cases [4–6].

In parallel, a shortage of qualified training professionals in the maritime labor market causes accelerated promotion of marine professionals. Therefore, cadets have less time to develop necessary seafaring skills. According to a 2021 report by the Baltic and International Maritime Council (BIMCO) and the International Chamber of Shipping (ICS), the global merchant fleet is expected to keep expanding, maintaining a high demand for skilled maritime professionals. Nevertheless, the industry continues to face a shortage of qualified personnel. Projections estimate

that an additional 17,902 officers will be needed annually through 2026 to meet the operational needs of the global merchant fleet [7].

Vocational education must ensure individuals develop the essential knowledge, skills, and competencies required for professional success [8]. Therefore, it's necessary to create effective and sound methods of preparing maritime staff. The maritime industry has long been relying on simulator training to optimize education. However, assessment methods in simulation training are predominantly subjective, relying primarily on the judgment and experience of instructors. This introduces variability and potential bias in the evaluation of navigation competencies.

To address these challenges, the application of machine learning to maritime simulator log data offers a promising opportunity. Learning Analytics Dashboards (LADs) have demonstrated value in educational technology domains, offering a framework for integrating objective, data-driven insights into maritime training. Together with predictive models, LADs can improve the feedback for trainees and instructors and serve as an early-warning system for suboptimal performance [9].

**Research Purpose and Objectives.** The purpose of this study is to develop a method for identifying and evaluating cadet navigational behavior and decision-making strategies in maritime simulator training environments using intelligent, data-driven approaches. The study aims to enhance the objectivity and precision of performance assessment, reduce dependence on instructor subjectivity, and enable early detection of potentially unsafe operational patterns. To achieve this, the following research objectives are formulated:

1. To propose an approach for the automated analysis of navigational and control data recorded during maritime simulation exercises, with a focus on identifying behavioral patterns relevant to operator performance.

2. To establish a framework for classifying and assessing navigational and control strategies, enabling the recognition of outlier behaviors indicative of suboptimal decisions, skill gaps, or elevated operational risk.

3. To examine the potential of unsupervised learning methods for segmenting and evaluating cadet performance to inform adaptive training, targeted feedback, and early-risk intervention strategies in simulator-based education.

**Primary Research Material.** To achieve the outlined objective, a dataset was prepared that comprises time-series simulation data from 13 independent navigational exercises performed by different cadets using model Navi Trainer Professional 5000 [10] simulator conducting a passage through the Bosphorus strait. The extracted dataset (Fig. 1) captures vessel dynamics and environmental conditions across 44 parameters valid for the exercise under discussion and selected vessel type.

	pos_east	pos_north	yaw	heave	pitch	roll	surge	u_speed	v_speed	rpm_mid	rud_mid	rpm_mid_cmd
0	4.62	13.49	0.000	0.000	0.183	0.000	0.000	0.002	-0.004	0	0	0
1	4.62	13.49	-0.000	-0.001	0.181	0.040	0.001	0.003	-0.004	0	0	0
2	4.62	13.49	0.000	-0.003	0.174	0.032	0.000	0.003	-0.004	0	0	0
3	4.62	13.49	0.000	-0.015	0.166	0.022	0.000	0.003	-0.004	0	0	0
4	4.62	13.49	0.001	-0.011	0.157	0.014	-0.001	0.003	-0.004	0	0	0
5	4.62	13.49	0.001	-0.005	0.150	0.007	-0.000	0.003	-0.004	0	0	0
6	4.62	13.49	0.002	-0.007	0.147	0.002	0.000	0.003	-0.005	0	0	0
7	4.62	13.49	0.003	-0.001	0.147	-0.002	0.001	0.003	-0.005	0	0	0
8	4.62	13.49	0.004	-0.002	0.149	-0.005	0.000	0.003	-0.005	0	0	0
9	4.62	13.49	0.005	0.001	0.154	-0.007	-0.000	0.003	-0.005	0	0	0

Figure 1 – Fragment of data extracted from TRANSAS NTPRO 5000

Here’s brief description of the features provided: *pos\_east*, *pos\_north* are position relative to the starting point of the exercise; *roll* is the tilting motion of a ship from side to side; *pitch* is the up-and-down tilting motion of the ship; *yaw* is side-to-side motion of the ship about its vertical axis; *surge* is the forward and backward motion of the ship along its longitudinal axis; *sway* is the side-to-side motion of the ship along its transverse axis; *heave* is vertical motion of the ship along its vertical axis. *u\_speed* forward surge velocity speed, *v\_speed* sideways sway velocity, *rpm\_mid* indicates Revolutions Per Minute (RPM) of a main propulsion unit; *rud\_mid* shows rudder angel and *rpm\_mid\_cmd* commanded but potentially not yet achieved main engine RPM value.

Upon conducting Exploratory Data Analysis (EDA) [11], the list of meaningful features was reduced to 33 by eliminating non-relevant columns for this vessel type, columns with few values, e.g., the autopilot was turned off for all exercises and therefore had only one value.

Additionally, a set of similarity metrics was computed to avoid supplying duplicate information to the model and further decrease redundant computations – the Pearson Correlation Coefficient [12], which measures the linear similarity between two variables (1).

$$r_{X,Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

where:  $x_i, y_i$ : individual sample points;

$\bar{x}, \bar{y}$ : sample means;

$n$ : number of observations.

A correlation value close to +1 or -1 indicates a strong linear relationship, while a value near 0 suggests no linear correlation. To minimize redundant input information to the model and reduce the dimensionality of the feature space, features with correlation of  $|r| > 0.8$  were examined and closely and staged for elimination to the modeling step. Additionally, the corresponding matrix (Fig. 2) helped us eliminate perfectly correlated features that naturally could be foreshadowed by the constraints of the physical system. For example, it's logical that when the yaw rate of the ship increases, its velocity at the stern will also increase during the turn.

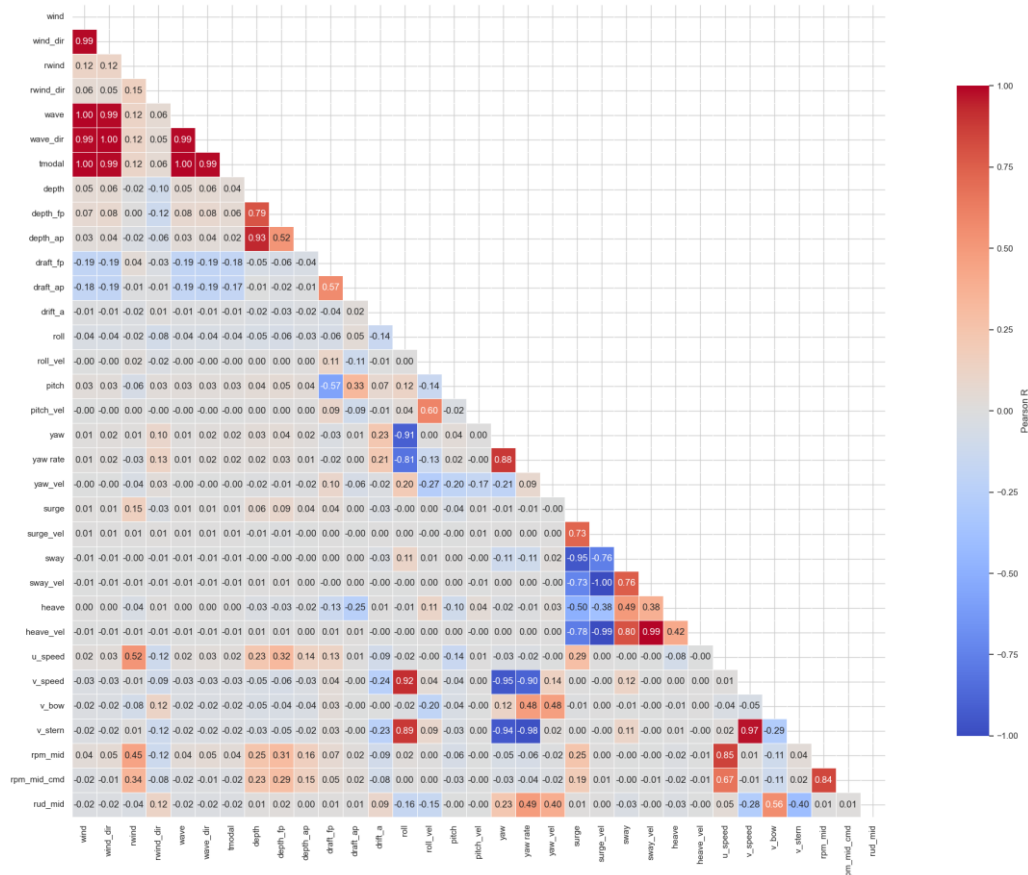


Figure 2 – Pearson R values calculated for features in the dataset

With the intention of conducting a thorough analysis, it's usually necessary to supplement the Pearson Coefficient with another measure of similarity, such as Spearman's rank or Mutual Information [14]. Since Pearson  $r$  assumes the underlying relationship is symmetric and homoscedastic, it can miss or underestimate important nonlinear or monotonic patterns. Mutual Information [13] metrics was used as another similarity measure. Overall, it quantifies the total dependency between variables, measures the information one variable contains about another, and captures both linear and nonlinear dependencies (2). By combining Pearson correlation with Mutual Information, one obtains a more holistic understanding of the structure and dependencies in the data [15].

$$I(X; Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log \left( \frac{p(x, y)}{p(x) p(y)} \right); \tag{2}$$

$$p(x, y) = \frac{\text{count}(X=x, Y=y)}{N}; \tag{3}$$

$$p(x) = \frac{\text{count}(X=x)}{N}; \tag{5}$$

$$p(y) = \frac{\text{count}(Y=y)}{N}, \tag{6}$$

where  $p(x, y)$ : joint probability distribution of X and Y (3);  
 $p(x), p(y)$ : marginal probability distributions (5, 6).

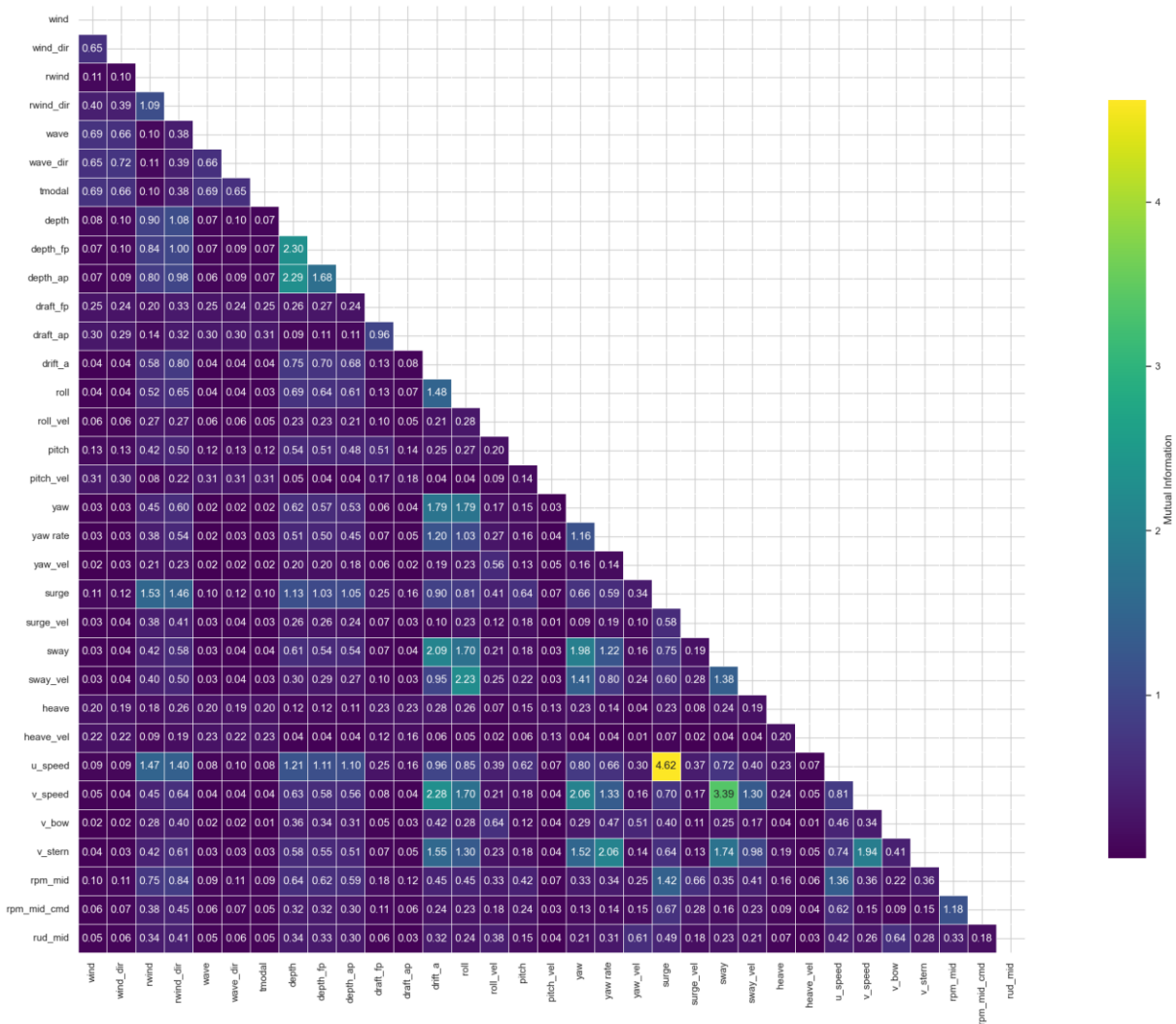


Figure 3 – Mutual Information values calculated for features in the dataset

Applying this technique helped us confirm correlated features from calculating the Pearson Coefficient and identify new naturally outcoming similarities. For example, MI coefficient between  $uw\_speed$  and  $u\_speed$  of 9.257 and  $uv\_speed$  and  $v\_speed$  of 8.065 indicated that given our dataset and for modeling purposes underwater vessel speed wouldn't represent meaningful information.

Following both procedures mentioned above, the list of meaningful features was reduced to a tight list that will provide meaningful information. The features of control such as current mid-engine RPM ( $rpm\_mid$ ), commanded mid-engine RPM ( $rpm\_mid\_cmd$ ), current rudder angle ( $rud\_mid$ ), commanded rudder angle ( $rud\_mid\_cmd$ ). The trajectory or directional features include the eastward position coordinate ( $pos\_east$ ) and northward position coordinate ( $pos\_north$ ). The motion features describe the ship's movement on the cartesian coordinate system, such as  $pitch$ ,  $roll$ ,  $yaw$ ,  $sway$ , and  $surge$ . Velocity features forward surge velocity ( $u\_speed$ ), sideways sway velocity ( $v\_speed$ ), velocity at the bow ( $v\_bow$ ) and velocity at the stern ( $v\_stern$ ). While it's acknowledged that weather-related features might trigger different behaviors of navigators, weather-related features were decided to be eliminated since the data in our experiment contained almost identical weather conditions.

**Modelling.** A novel unsupervised learning pipeline is proposed to facilitate actionable, interpretable feedback for cadets and instructors participating in maritime simulation exercises (Fig. 4). First, the multivariate time series data was preprocessed for each session using established time series feature engineering techniques. This includes calculating aggregate statistics (e.g., mean, standard deviation, minimum, maximum, skewness, and kurtosis) over rolling windows, as well as generating lagged features that capture recent trends and temporal dependencies in the navigational telemetry. The resulting set of fixed-length feature vectors represents each exercise session in a manner that preserves relevant temporal dynamics while remaining interpretable. These feature vectors are then clustered using a Gaussian Mixture Model (GMM), enabling the identification of groups of cadets exhibiting similar navigational behavior or performance patterns. To further enhance the interpretability of each cluster, an XGBoost classifier was trained [17] as a surrogate model to predict cluster membership based on the engineered features. The feature importances and decision logic of this model are subsequently analyzed using SHapley Additive exPlanations (SHAP) [18], providing domain-relevant, actionable insights into the behavioral characteristics defining each group. This integrated approach supports data-driven instructional feedback and personalized training interventions within maritime education. The resulting explanations enable instructors to target training interventions toward specific performance factors, ultimately supporting more effective and individualized learning pathways.



Figure 4 – Modeling pipeline overview

**Preprocessing.** A systematic feature engineering was performed on the raw navigational telemetry data to enable robust, session-level analysis and clustering. In order to mitigate small sample size of 13 sessions we decided to cluster navigator behavior on events within the session by partitioning each session into fixed-length windows of 10 minutes with 50% overlap, generating roughly 15–20 segments per session. The total number that our method generated was 201. For each segment, a set of global statistical descriptors was extracted from the original features to summarize temporal dynamics while reducing dimensionality.

Specifically, for each numeric telemetry feature, a suite of standard aggregate statistics was calculated – including the mean, standard deviation, minimum, and maximum values – across all timesteps within a session. Mathematically, for a feature  $x$  and session  $s$ , it was computed:

$$\text{Mean: } \mu_{x,s} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T x_{s,t}$$

$$\text{Standard deviation: } \sigma_{x,s} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (x_{s,t} - \mu_{x,s})^2},$$

Minimum:  $\min_{x,s} = \min_t x_{s,t}$ ,

Maximum:  $\max_{x,s} = \max_t x_{s,t}$ ,

where  $T$  denotes the number of timesteps in session  $s$ . This procedure was implemented by grouping the data by *series\_id* and slicing desired window interval, and applying the aggregation functions to each feature, resulting in a single summary vector per segment. The resulting feature matrix thus captures both central tendencies and variability for each navigational segment, laying the foundation for interpretable clustering and subsequent analysis (see Figure 4 for an overview of the preprocessing workflow).

**Clustering.** Given our aim to identify natural groupings within rolling-, several clustering algorithms was considered: KMeans [19], Gaussian Mixture Models (GMM) [20], DBSCAN [21], and HDBSCAN [22]. KMeans and GMMs are widely used centroid-based approaches that assume convex, isotropic structures and require the number of clusters  $k$  to be specified in advance. This poses significant limitations for our application, as the actual number of navigational behavior types is unknown, and the expected cluster shapes may be non-spherical and of varying density. Moreover, these algorithms are sensitive to noise and outliers, which might be problematic given our small sample size. DBSCAN addresses many of these challenges by defining clusters as dense regions of data points separated by areas of lower point density. However, DBSCAN is limited by its reliance on a global density threshold  $\epsilon$ , making it ill-suited to discover clusters of differing densities – a characteristic anticipated in our rolling-window aggregated representations.

To overcome these limitations, HDBSCAN (Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise), was selected, which generalizes DBSCAN by allowing the detection of clusters with variable densities and does not require the number of clusters to be specified. HDBSCAN is thus highly suitable for our experimental context, where data may exhibit clusters of widely varying density and shape and where noise and outliers are prevalent.

HDBSCAN adopts the core distance concept initially introduced in the DBSCAN and LOF literature. For a point  $x$ , the core distance concerning a parameter  $k$  is denoted as  $core_k(x)$  (7) and formally defined as the distance from  $x$  to its  $k$ -th nearest neighbor (inclusive):

$$core_k(x) = \text{distance to the } k\text{-th nearest neighbor of } x \quad (7)$$

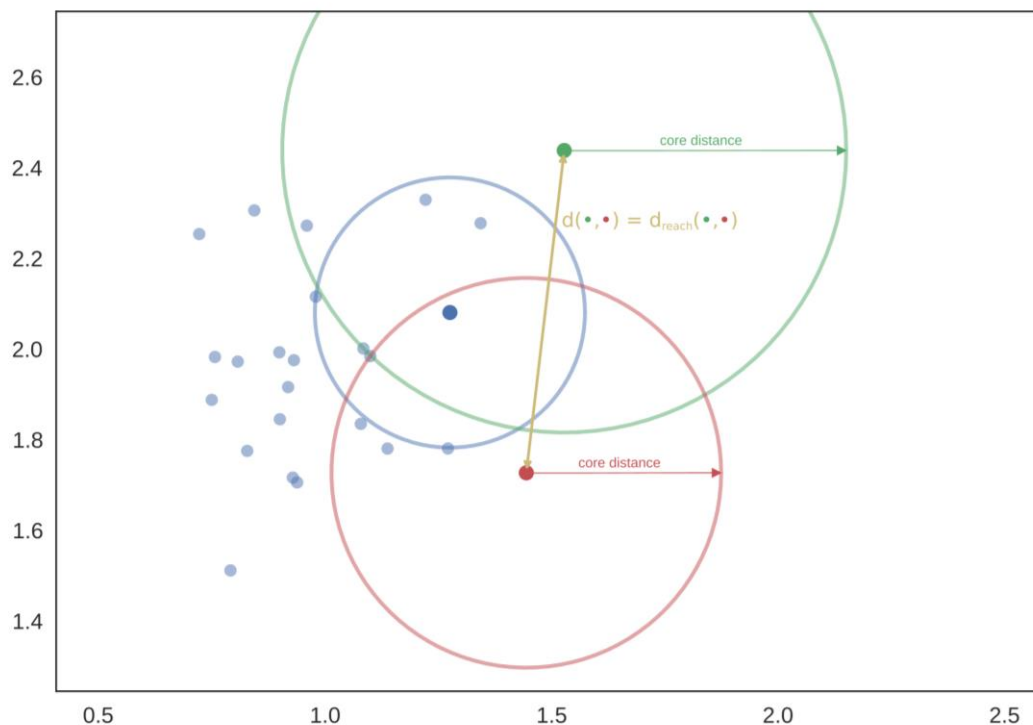


Figure 5 – HDBSCAN reachability distance

However, to effectively distinguish and separate points in sparse areas (with high core distance), HDSCAN introduces the mutual reachability distance (Fig. 5) between two points,  $a$  and  $b$ , denoted (8)

$$d_{mreach-k}(a, b) = \max\{core_k(a), core_k(b), d(a, b)\}, \quad (8)$$

where  $d(a, b)$  is the original metric (e.g., Euclidean) distance between  $a$  and  $b$ . The multiple different points are depicted with different colors. The next step is to build a Minimum Spanning Tree (MST) using Prim's algorithm – the tree is constructed one edge at a time, always adding the lowest weight edge that connects the current tree to a vertex not yet in the tree (Fig. 6).

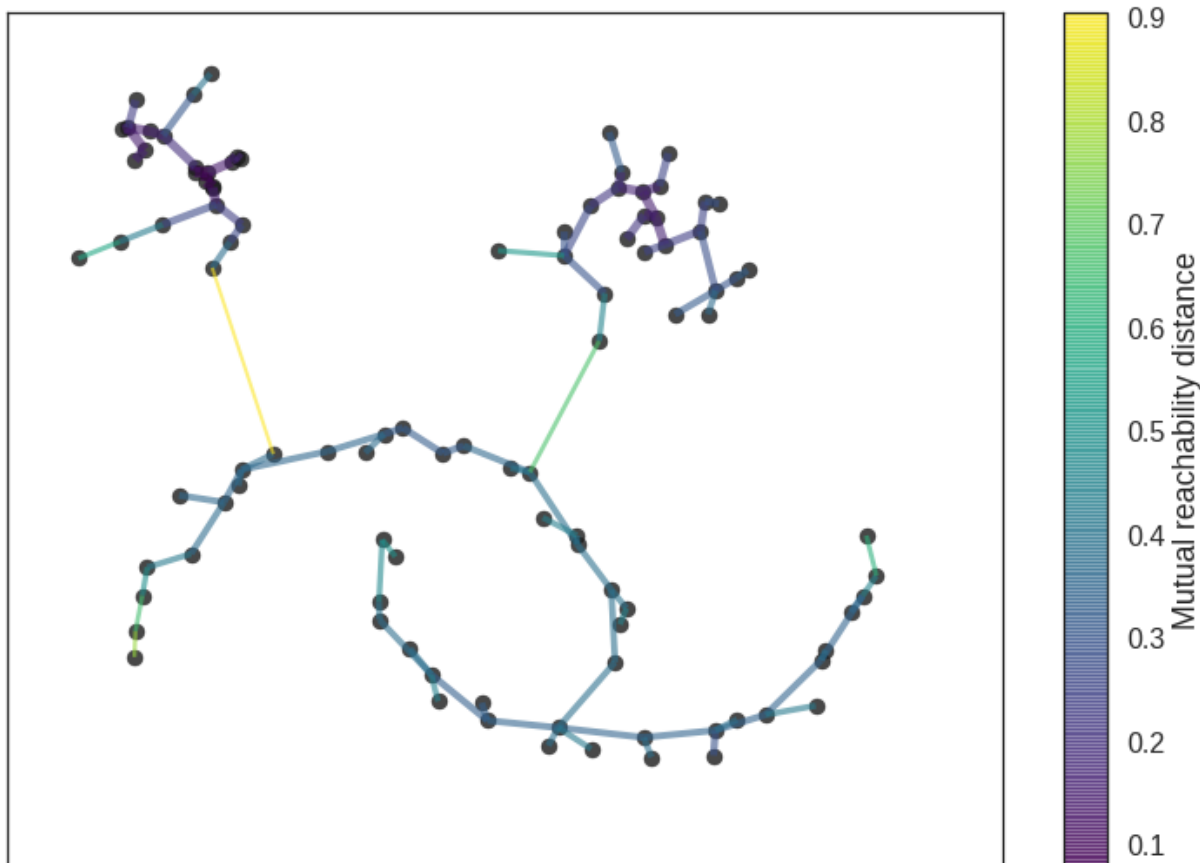


Figure 6 – HDBSCAN's Minimum Spanning Tree (MST)

After obtaining the MST, the conversion to a hierarchy of connected components takes place in reverse order by sorting the edges of the tree by distance and iterating over them using a union-find data structure. Subsequently, the algorithm condenses the hierarchy by eliminating clusters that persist over a small range of distance thresholds and retaining stable clusters over a wide range of thresholds (6). Stability is defined by:

$$\sum_{p \in \text{cluster}} (\lambda_p - \lambda_{\text{birth}}). \quad (9)$$

Finally, HDBSCAN extracts the most stable clusters from the condensed tree. Each data point is assigned to a cluster or noise. Given the performance characteristics, ease of use, and suitability for potential noise simulation data, the DBSCAN algorithm was preferred.

HDBSCAN clustering algorithm was applied to the aggregated session-level feature data, adjusting the *min\_cluster\_size* parameter to 8 and *min\_samples* to 1. t-distributed stochastic neighbors embedding (t-SNE) was employed to project the high-dimensional feature vectors onto the first two components to visualize the clustering structure in a reduced-dimensional space. Figure 7 presents the resulting clusters, with each point representing a navigational segment and colors denoting cluster membership.

Points labeled "-1" correspond to sessions that HDBSCAN could not confidently assign to any cluster, reflecting their outlier or ambiguous nature in the feature space. The visualization reveals that algorithm identified three distinct clusters labeled: "0", "1", and "2". While the amount of noise is noteworthy, the clusters still appear to be distinguishable. The amount of noise can be explained by the inherent discrepancies in real world data which occurs during educational simulation. For example, not all students started performing exercise immediately even though the session was already initiated. Interferences of this kind is inevitable and therefore, it's important to build systems that can understand those patterns and know how to distinguish them.

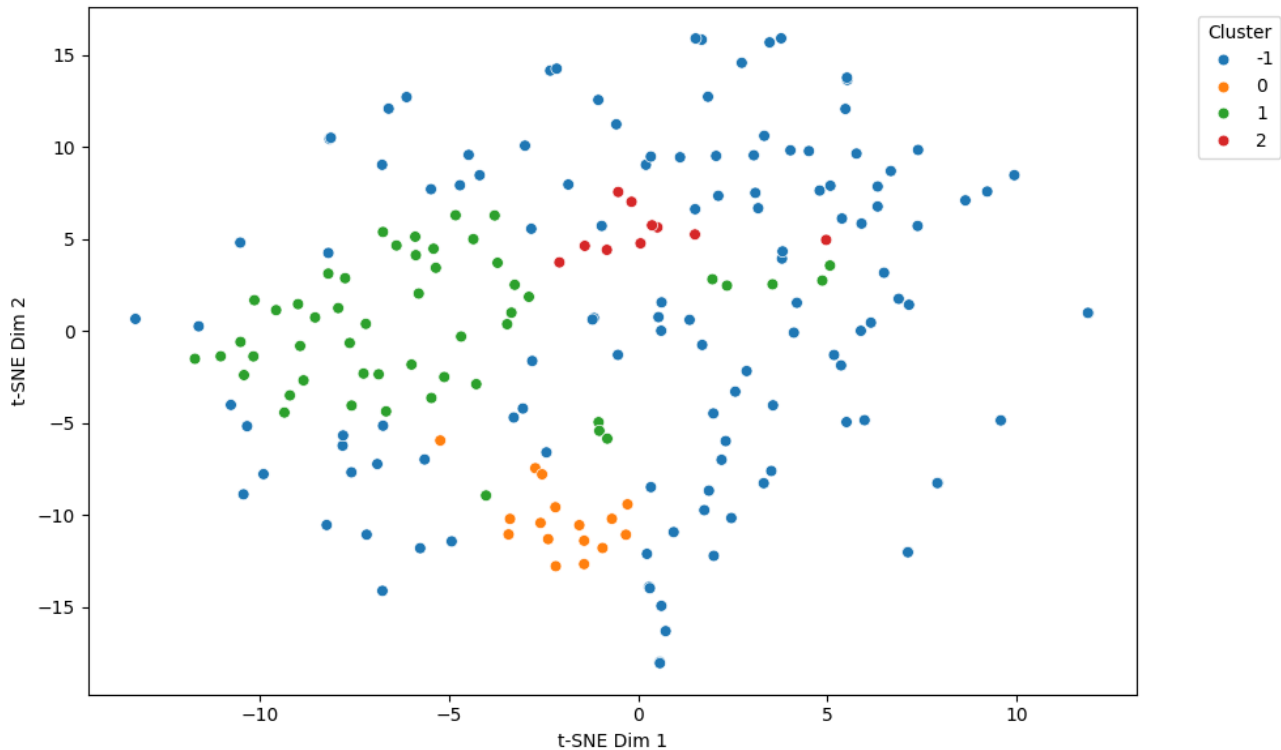


Figure 7 – HDBSCAN clusters visualized using t-SNE

Support Vector Machines SVM classifier was trained to interpret clustering results on the obtained cluster labels. SVMs are supervised learning models well-suited for classification tasks, particularly with small and high-dimensional datasets [23]. SVMs operate by identifying the optimal separating hyperplane in the feature space that maximally distinguishes between different classes. In its linear form, the SVM seeks the hyperplane defined by the equation (10):

$$w^T x + b = 0, \quad (10)$$

where  $w$  is the normal vector to the hyperplane and  $b$  is the intercept. The decision rule for class assignment is based on the sign of this function. The optimal hyperplane (11) finds the optimal by maximizing the margin – the distance between the hyperplane and the closest data points from each class (called support vectors):

$$\max_{w, b} \left( \frac{2}{|w|} \right); \quad (11)$$

$$\text{subject to } y_i(w^T x_i + b) \geq 1 \quad \forall i,$$

where  $y_i \in \{-1, 1\}$  are class labels (Fig. 8).

To handle nonlinear class boundaries, SVMs can employ the kernel trick, implicitly mapping data into a higher-dimensional feature space where linear separation is feasible [24]. However, in our application, a linear SVM was employed for maximum interpretability and computational efficiency, given the limited sample size.

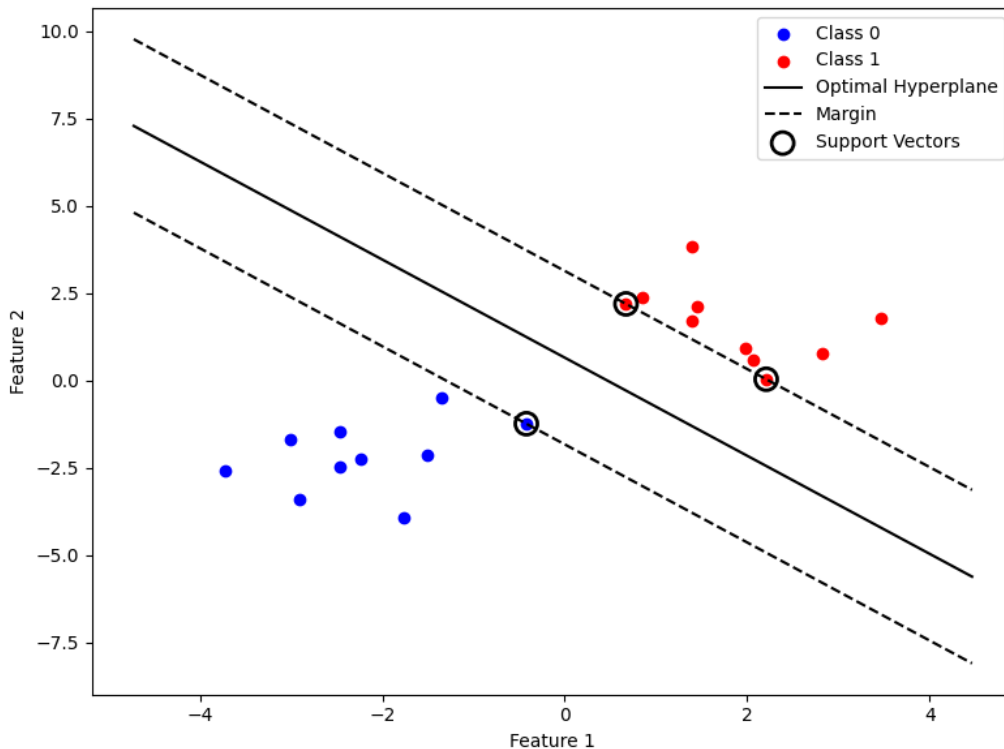


Figure 8 – Illustration of Linear SVM: Support Vectors and Margin

Support Vector Machines were chosen as the surrogate model for cluster explanation due to several compelling advantages in our experimental context. First, SVMs are particularly well-suited for small datasets because the support vectors determine their decision boundary. This helps mitigate the risk of overfitting and enhances robustness to limited sample sizes [25]. Moreover, in the linear case, SVMs are inherently interpretable, as the coefficients of the decision function  $w$  directly quantify the importance of each feature in distinguishing between clusters, providing transparent insight into the classification process [26].

SVMs also integrate effectively with SHAP (SHapley Additive exPlanations) [27], allowing us to quantify the contribution of individual features to each cluster assignment and thus facilitate nuanced, quantitative analysis of navigational behaviors, even in multi-class scenarios. Furthermore, SVMs are relatively robust to the curse of dimensionality and do not require extensive hyperparameter tuning, which is particularly advantageous given our small dataset and the engineered feature space. These properties make the SVM classifier an ideal and interpretable surrogate for elucidating which engineered features most influence the assignment of navigational sessions to each cluster, thereby bridging unsupervised clustering with actionable, human-understandable feedback for instructors and cadets.

**Interpretability.** To translate model predictions into actionable feedback for cadets and instructors, SHAP (SHapley Additive exPlanations) was utilized to attribute each cluster assignment to its underlying feature contributions. SHAP is a state-of-the-art, model-agnostic framework for explainable artificial intelligence [27]. It is grounded in cooperative game theory, specifically the concept of Shapley values, which allocate credit for a model's output among its input features. For each prediction, the SHAP value  $\phi_i$  (12) for feature  $j$  is computed as the average marginal contribution of that feature across all possible feature subsets:

$$\phi_j = \sum_{S \subseteq F \setminus \{j\}} \frac{|S|! (|F| - |S| - 1)!}{|F|!} [f_{S \cup \{j\}}(x_{S \cup \{j\}}) - f_S(x_S)], \quad (12)$$

where  $F$  is the set of all features,  $S$  is a subset of features not containing  $j$ , and  $f_S$  is the model trained on features in  $S$ . This formulation ensures that feature attributions are consistent, locally accurate, and add up to the difference between the model's prediction and its expected value [28].

For each session in our dataset, SHAP values were computed for all features attributing the factors underlying each cluster assignment. These attributions were visualized using SHAP summary and bar plots (Fig. 9), which rank features by their global importance and show both the magnitude and direction of their effect on cluster membership. This interpretability framework identifies the most influential navigational features across all cadets and supports actionable, individualized feedback by revealing which specific behaviors most contributed to a segment’s cluster assignment. The feedback can be traced to specific segment in the session and therefore can be traced back to the exact location of occurrence. As a result, SHAP bridges the gap between complex machine learning outputs and human-understandable instructional insights.

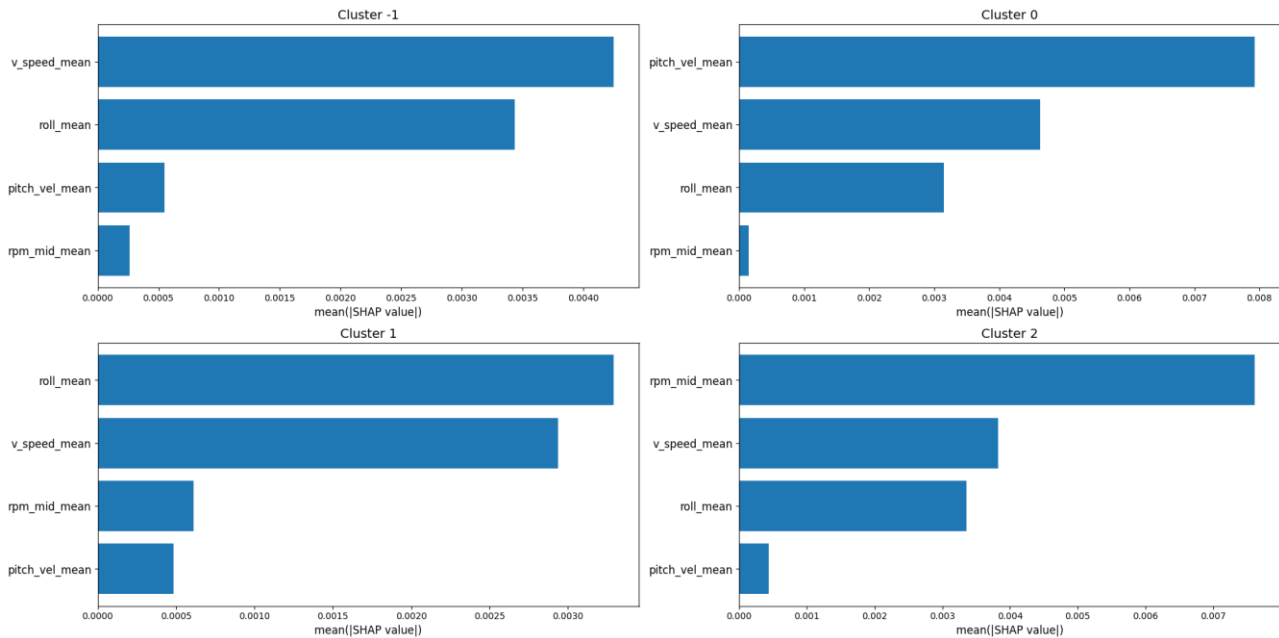


Figure 9 – Illustration of SHAP values for each identified cluster

The SHAP value analysis for each cluster – corresponding to distinct patterns of navigational performance, including noise/outlier sessions – reveals the features most influential in determining cluster assignments.

For sessions identified as outliers or noise (Cluster -1) and for sessions in Cluster 0, the mean vertical speed (*v\_speed\_mean*), average roll angle (*roll\_mean*), followed by average rate of change of pitch (*pitch\_vel\_mean*) and average mid-propeller RPM (*rpm\_mid\_mean*) are the top contributors to the cluster attribution. This combination of elevated lateral motion and vessel roll suggests instability – possibly due to corrections and rude steering. The lower value of propeller PRM in the Cluster 0 may indicate attempt to maneuver at lower speeds.

For Cluster 1, the mean roll velocity (*roll\_mean*), mean longitudinal speed (*v\_speed\_mean*), and average propeller RPM (*rpm\_mid\_mean*) are defining features. This perhaps could indicate stable vessel motion where cadets exhibit stable navigation with consistent lateral motion and propulsion given relatively moderate SHAP values across features and the fact that this corresponds to the largest cluster identified.

Segments in Cluster 2 show high importance of average propeller RPM (*rpm\_mid\_mean*), suggesting that cadets in this group rely heavily on propulsion power for navigation. This behavior may be required in certain contexts but might also lead to sharp or energy-inefficient maneuvers.

While those suggestions offer global patterns of behavior, the system can trace back the segment classified as certain cluster and provide detailed view on what was happening with the vessel and navigator at that time interval. This should greatly assist and quicken instructor’s ability to provide actionable feedback to cadets.

**Conclusion.** This study has demonstrated the feasibility and utility of applying unsupervised machine learning and explainable AI techniques to maritime simulator data for the automated assessment of cadet navigational performance. By engineering interpretable features from raw time-

series telemetry and leveraging advanced clustering algorithms such as HDBSCAN, the proposed pipeline effectively identifies meaningful patterns in cadet behaviors during simulation exercises. The integration of surrogate models and SHAP-based interpretability provides actionable feedback, enabling instructors to tailor training interventions to address specific performance gaps and reinforce safe navigational strategies. Notably, the results underline the pivotal role of key features—such as roll velocity, propeller RPM, and sideways velocity – in distinguishing between stable, dynamic, and anomalous navigational styles. These findings support the transition from subjective, instructor-driven assessments toward a more objective, data-driven approach in maritime education, with the potential to reduce human error and enhance overall maritime safety.

**Prospects for further research.** Despite promising results, several avenues remain open for future research. First, expanding the dataset to include a larger and more diverse sample of cadets and navigational scenarios will strengthen the generalizability and robustness of the findings. Future work may also focus on real-time deployment of the feedback system, enabling adaptive, in-situ guidance during simulation or actual vessel operation. Moreover, integrating the proposed method with fuzzy logic-based risk assessment frameworks may further enhance the system's capability to support decision-making under uncertainty. Finally, collaboration with maritime training institutions and stakeholders will be essential for validating the practical impact of automated feedback tools and for driving the evolution of competency-based, individualized maritime education.

## REFERENCES

1. Galieriková, A. (2019). The human factor and maritime safety. *Transportation Research Procedia*, 40, 1319–1326. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2019.07.183>.
2. International Maritime Organization. (n.d.). *The human element*. IMO. Retrieved May 24, 2025, from <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement>.
3. Munim, Z. H., Dushenko, M., Jimenez, V. J., Shakil, M. H., & Imset, M. (2020). Big data and artificial intelligence in the maritime industry: a bibliometric review and future research directions. *Maritime Policy & Management*, 47(5), 577–597. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1788731>.
4. Nguyen, D., Vadaine, R., Hajduch, G., Garello, R., & Fablet, R. (2021). GeoTrackNet-A Maritime Anomaly Detector using Probabilistic Neural Network Representation of AIS Tracks and A Contrario Detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3055614>.
5. Ana, Mateus Sant', Guoyuan Li, and Houxiang Zhang. "A Decentralized Sensor Fusion Approach to Human Fatigue Monitoring in Maritime Operations." *2019 IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA)*, July 1, 2019, 1569–74. <https://doi.org/10.1109/ICCA.2019.8899708>.
6. Xiao, Z., Fu, X., Zhang, L., Zhang, W., Liu, R. W., Liu, Z., & Goh, R. S. M. (2020). Big Data Driven Vessel Trajectory and Navigating State Prediction With Adaptive Learning, Motion Modeling, and Particle Filtering Techniques. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 1–14. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3040268>.
7. BIMCO/ICS, 2021. Seafarer Workforce Report: The global supply and demand for seafarers in 2021. Available at: <https://www.ics-shipping.org/publication/seafarer-workforce-report-2021-edition/>.
8. Eurydice (2021). Draft Law on the Organization and Integration of Vocational Training. Available at: [https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/content/national-reforms-vocational-education-andtraining-and-adult-learning-70\\_en](https://eacea.ec.europa.eu/national-policies/eurydice/content/national-reforms-vocational-education-andtraining-and-adult-learning-70_en).
9. Munim, Ziaul & Kim, Tae-eun. (2023). A Review of Learning Analytics Dashboard and a Novel Application in Maritime Simulator Training. 10.54941/ahfe1003158.
10. W. C. (2025). *Wärtsilä Navigation simulator NTPRO 5000*. Wärtsilä Navigation Simulator NTPRO 5000. Retrieved May 27, 2025, from

<https://www.wartsila.com/marine/products/simulation-and-training/navigational-simulators/navigation-simulator-ntpro-5000>.

11. Good, I. J. The Philosophy of Exploratory Data Analysis. *Philosophy of Science*. 1983;50(2):283–295. <https://doi.org/10.1086/289110>.
12. Benesty, J., Chen, J., Huang, Y., Cohen, I. (2009). Pearson Correlation Coefficient. In: *Noise Reduction in Speech Processing*. Springer Topics in Signal Processing, vol 2. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-00296-0\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-642-00296-0_5).
13. Veyrat-Charvillon, N., & Standaert, F. X. (2009). Mutual information analysis: how, when, and why?. In *International workshop on cryptographic hardware and embedded systems* (pp. 429–443). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
14. Martínez Vásquez, D. A., Posada-Quintero, H. F., Rivera Pinzón, D. M. (2023). Mutual Information between EDA and EEG in Multiple Cognitive Tasks and Sleep Deprivation Conditions. *Behavioral Sciences*. 2023; 13(9):707. <https://doi.org/10.3390/bs13090707>.
15. Kamalov, F., Sulieman, H., Alzaatreh, A., Emarly, M., Chamlal, H., Safaraliev, M. (2025). Mathematical Methods in Feature Selection: A Review. *Mathematics*. 2025; 13(6):996. <https://doi.org/10.3390/math13060996>.
16. Yong, Yu, Xiaosheng, Si, Changhua, Hu, Jianxun Zhang (2019). A Review of Recurrent Neural Networks: LSTM Cells and Network Architectures. *Neural Comput* 2019; 31 (7): 1235–1270. [https://doi.org/10.1162/neco\\_a\\_01199](https://doi.org/10.1162/neco_a_01199).
17. Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost. KDD '16: Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785–794. <https://doi.org/10.1145/2939672.2939785>.
18. LIME: Ribeiro, Marco Tulio, Sameer Singh, and Carlos Guestrin. "Why should I trust you?: Explaining the predictions of any classifier." Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. ACM, 2016.
19. Ahmed, M., Seraj, R. (2020). Islam SMS. The *K-means* Algorithm: A Comprehensive Survey and Performance Evaluation. *Electronics*; 9(8):1295. <https://doi.org/10.3390/electronics9081295>.
20. Wan, H., Wang, H., Scotney, B., and Liu, J. (2019). "A Novel Gaussian Mixture Model for Classification," *2019 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Bari, Italy, pp. 3298–3303, <https://doi.org/10.1109/SMC.2019.8914215>.
21. Khan, K., Rehman, S. U., Aziz, K., Fong, S. and Sarasvady, S. (2014). "DBSCAN: Past, present and future," *The Fifth International Conference on the Applications of Digital Information and Web Technologies (ICADIWT 2014)*, Bangalore, India, pp. 232–238, <https://doi.org/10.1109/ICADIWT.2014.6814687>.
22. Campello, R.J.G.B., Moulavi, D., Sander, J. (2013). Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates. In: Pei, J., Tseng, V.S., Cao, L., Motoda, H., Xu, G. (eds) *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. PAKDD 2013. Lecture Notes in Computer Science, vol 7819. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-37456-2\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-642-37456-2_14).
23. Cortes, C., Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Mach Learn* 20, 273–297, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>.
24. Cristianini, N., Shawe-Taylor, J. (2000). *An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-Based Learning Methods*. Cambridge University Press.
25. Hsu, C.-W., Chang, C.-C., & Lin, C.-J. (2016). *A Practical Guide to Support Vector Classification*.
26. Guyon, I., Weston, J., Barnhill, S., & Vapnik, V. (2002). *Gene Selection for Cancer Classification using Support Vector Machines*. *Machine Learning*, 46(1), 389–422.
27. Lundberg, S. M., & Lee, S.-I. (2017). *A Unified Approach to Interpreting Model Predictions*. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 4765–4774.
28. Strumbelj, Erik and Kononenko, Igor (2010). *An Efficient Explanation of Individual Classifications using Game Theory*. *J. Mach. Learn. Res.* 11 (3/1/2010), 1–18.

**Кочубей П., Носов П. ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ФАКТОРУ ОПЕРАТОРІВ-СУДНОВОДІЇВ ЗАСОБАМИ НАВІГАЦІЙНОГО ТРЕНАЖЕРУ**

У міру ускладнення морських операцій зростає потреба у впровадженні об'єктивних та масштабованих методів оцінювання компетентності моряків, що виходять за межі традиційних інструкторських підходів. У цьому дослідженні представлено комплексну, базовану на даних систему аналізу роботи курсантів у тренажерних вправах, яка використовує сучасні методи без наочного навчання та пояснюваного штучного інтелекту (AI). Для аналізу використовувалися багатовимірні часові ряди з навігаційних симуляцій, що охоплюють динаміку судна, дії екіпажу та параметри навколишнього середовища за десятками різних ознак. Було реалізовано ретельний етап попередньої обробки даних, який поєднує агрегування статистичних ознак та усунення надлишкової інформації за допомогою коефіцієнта кореляції Пірсона та взаємної інформації. Це дозволило сформувати компактний, але інформативний набір характеристик, який відображає як керуючі впливи, так і навігаційні стани та рух судна. Кожну сесію симуляції було закодовано у вигляді вектора, що фіксує середні значення та варіативність параметрів протягом виконання вправи. Для кластеризації було обрано алгоритм HDBSCAN, який особливо ефективний для виявлення груп із різною щільністю та автоматично виділяє аномальні випадки, що критично важливо для оцінки підготовки. Знайдені кластери візуалізували за допомогою T-розподіленого вкладення стохастичної близькості (t-SNE), що дозволило інтерпретувати патерни дій курсантів. Для пояснення особливостей кожної групи було навчено лінійну SVM-модель, а метод SHAP допоміг проаналізувати, які саме ознаки впливають на рішення моделі. Основні результати показали, що кластери відповідають різним стилям навігації: стабільні, обережні підходи відрізняються від динамічних чи ризикованих за такими характеристиками, як швидкість крену, кутовий рух (*yaw\_rate*) та оберти двигуна. Сесії, віднесені до аномалій, зазвичай характеризуються різкими маневрами чи нестійким керуванням, що може свідчити про наявність прогалин у навичках. Інтерпретовані SHAP-значення перетворюють складні висновки моделі на зрозумілі для інструкторів рекомендації, даючи можливість адресно працювати з недоліками кожного курсанта. Запропонований підхід може стати прозорою та масштабованою альтернативою суб'єктивному оцінюванню у морській освіті, з реальними перспективами для підвищення безпеки та персоналізації навчання. Система показує високий потенціал інтеграції в практичне середовище підготовки кадрів та подальшого розвитку з розширенням масиву доступних даних.

**Ключові слова:** водний транспорт; експлуатація засобів транспорту; безпека судноплавства; фактор людини; автоматизація; ризик; інтелектуальні системи; інформаційні панелі аналітики навчання (ІПАН).

© Kochubei P., Nosov P.

Статтю прийнято до редакції 16.06.2025

## MULTI-CRITERION OPTIMIZATION OF SITUATIONAL MANAGEMENT OF MARITIME TRANSPORTATION UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

**Sharko O.**, Sc.D., Professor, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: mvsharko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9025-7990;

**Stepanchikov D.**, Ph.D. Associate Professor, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: dmitro\_step75@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5027-2213;

**Sharko A.**, Ph.D., Technical University of Liberec, e-mail: artem.sharko@tul.cz, ORCID: 0000-0002-6350-7189;

**Movchan P.** Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: mvp01121988@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1004-6651.

*A methodology for multi-criteria optimization of maritime transport under conditions of uncertainty in the external environment is proposed. It is noted that in the practice of maritime transport management, complex manifestations of uncertainty are observed in the form of various specific situations, obscured by possible interactions and uncertainties of the external environment. It is shown that the most rational way to solve transport problems under conditions of uncertainty is multi-criteria optimization. Based on the consideration of real situations along the Turkey-Germany transport corridor, it is shown that reducing uncertainty in determining the conditions for navigating transport routes can be achieved both through the rational use of the vessel's operational parameters and by taking into account the external conditions of the route. The parameters for optimizing transport for a specific transport route are proposed and studied in detail. A transport matrix is formed, whose optimization parameters include vessel loading, delivery duration, transit speed, load on the main engine, fuel consumption, route deviation, and transportation cost. Practical cases of route passage are considered. The influence of external disturbances on the vessel's controlled operational parameters is established, which has allowed the development of recommendations for decision-making based on the ranking of priorities among the optimization parameters of transport matrix strategies, the convergence of various generalizing functions, and the possibility of predicting the consequences of decision-making on the selected optimal management strategy under specific conditions. The diversity of various manifestations of the external environment's influence on the functioning of transport facilities, global changes in the supply structure, evolving environmental requirements for waste disposal, and other causative factors that are not subject to strict regulation significantly complicate the information support necessary for decision-making under conditions of uncertainty. The adaptation of existing sea transportation technologies to changing operational conditions, driven by fluctuations in the external environment, constitutes the essence and direction of ongoing transformational changes aimed at modernizing the industry.*

**Key words:** maritime transportation; development trends; management; logistics; intellectualization; transport technologies.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.171-186**

**Introduction.** The problem of situational management of transport under conditions of uncertainty requires taking into account the quantitative and qualitative characteristics of maritime transport, knowledge of the ranges of their changes, orientation and effectiveness on the overall process of transport transition. Most of these characteristics are poorly formalized and poorly structured. In the general formulation, situational management belongs to the class of searching for optimal process characteristics in conditions of multi-criteria evaluations and uncertainty of judgments and expert conclusions.

Denoting the parameter of the process dynamics by  $t$ , and the set of its values by  $T$ , we have  $t \in T$ , where  $y = y(t)$ . The process of the system transition from a state with the value of the time parameter  $t_0$  to a state  $S$  with the value  $t > t_0$  is

$$S_{t_0^t}(y(t_0)) = y(t), y \in Y, t \in T. \quad (1)$$

Denoting by the controlling influence on the course of the transport process from the entire possible set of controls  $U$ , we have

$$S_{t_0^t}''(y(t, u)) = y(t, u), y \in Y, t \in T, u \in U. \quad (2)$$

To describe the variability of the process with an indication of the goal, it is necessary to introduce decision-making criteria. Then each individual management alternative can be evaluated by a certain number or value of the corresponding criterion and the comparison of alternatives will be reduced to comparing their corresponding numbers.

Optimization of management of the development of maritime transport in conditions of multi-criteria and uncertainty of input information is one of the unsolved problems of information theory, solid mechanics, and physical acoustics.

**Statement of the problem.** The functioning of maritime transport logistics and transportation is carried out under complex conditions in the external environment, involving multi-criteria and uncertainty of input information. The nature of such uncertainty lies in the fact that the parameters of uncertainty are not uniquely defined, their manifestations appear in specific situations, and it is necessary to make management decisions under conditions of risk. Modern transport systems face the need to simultaneously consider a set of factors when making management decisions while also satisfying various multi-criteria criteria. This is especially important in transport logistics, where it is necessary to balance the cost of transportation, delivery time and operational parameters.

Transport strategies are formed by taking into account the specifics of the cargo, transportation conditions, risks, and available resources. Within the framework of the multi-criteria approach, strategic transport parameters should be flexible and adaptable to different situations.

The solution to the scalar optimization problem is considered to be an element of a transport transition strategy that maximizes or minimizes the objective function. The integration of multi-criteria optimization methods into situational management allows for a significant increase in the efficiency of planning and implementation of transport operations. Real-time decisions can be based on algorithms that take into account the weighting coefficients of various criteria.

The most important advantages of multi-criteria optimization in the system management of maritime transport logistics are:

- stability of system characteristics, performance indicators and evaluation metrics;
- continuity of information flow;
- processing and aggregation of calculation results;
- integration of the multi-criteria optimization function of transportation into the system for monitoring the progress of cargo along the route.

Situational management determines the possibilities of adapting transport strategies to changing external and internal conditions. This approach is based on an operational assessment of the current situation and the selection of management influences that correspond to specific conditions. The use of situational management in transport logistics allows for flexibility in the event of failures, changes in demand or disruption of routes.

The main purpose of management decisions is to promptly detect deviations of controlled parameters from the values established by the regulations, identify and localize the vehicle's position on the route, and, if necessary, adjust the modes and technologies of operation.

An important issue for increasing the effectiveness of management decisions in conditions of uncertainty is the development of means, methods and techniques for obtaining and processing information about the state of vehicles during their operation, the search and implementation of organizational and technological tools and transportation parameters at any time and at any point in the transport process.

The purpose of the work is to search for alternatives to the management of sea transportation in the conditions of uncertainty with the use of multi-criteria optimization.

The tasks of the work are:

- construction of a transport matrix based on expert information;
- establishment of the necessary optimization parameters that determine the specific situation of the cargo on the route;
- determination of optimization criteria, necessary convolutions and limits of variation of the matrix parameters;

– performance of calculations and adoption of recommendations for the implementation of sea transportation according to the compiled situation.

#### **Analysis of recent research and publications.**

Situational traffic management has been developed in a number of fundamental works on situational awareness [1].

Considers the role of awareness in situational management of synchromodal transportation between different modes of transport in real time in dynamic and compressed situations [2]. Presents a situational awareness system of the road situation based on neural networks and cloud computing, integrated into peripheral roadside surveillance devices for automatic recognition of vehicles, their speed and license plates. Similar problems of intelligent vehicle tracking based on deep learning of traffic in different scenarios are considered in [3]. The Fractals Coati algorithm with bidirectional long-term memory is used.

A system for controlling, detecting, navigating, and locating aims for air transport objects using electronically scanned array radars to increase situational awareness with the integration of artificial intelligence and machine learning for routing and resource optimization is presented in [4]. In [5], the Frank-Wulf approach and neural networks are used to assess road conditions, detect potholes, and track road accidents. In [6], solutions to situational control problems are presented to ensure real-time situational awareness and optimize logistics systems with a combination of simulations and software components of digital twins of multimodal freight transportation. In the generalizing work on situational awareness and its use in maritime transport [7], great importance is attached to the analysis of the risk of collision of vessels, their spatial compactness, and scenarios of possible manifestations with tuning for maritime traffic segmentation.

Modern vehicle monitoring and control systems with route optimization, based on the transmission of information messages using discrete situational network devices for route information correction, are used in vehicle traffic management [8].

A separate cycle of work on situational management is represented by combinatorial optimization of operational management in simulation models of marine transport systems with alternative solutions for local resource selection [9], digital transformations [10], computer optimization of routes [11], intelligent situational awareness with temporal and spatial orientation [12].

In the development of situational transport management, it is worth noting the work [13], which presents a decision support system for situational awareness and discrete support using multi-objective evolutionary optimization. Increasing the situational awareness of ship operators, captains and senior engineers when interacting with shore organizations through the development of interfaces and transformations of control influences is described in [14].

In [15], monitoring of the evolution of the state of sliding bearings of turbochargers of ship power plants is presented, in which the features of the trajectory of the main diagnostic feature when the material approaches the state of degradation are selected as the optimization parameter. The modernization of this methodology for determining the residual resource of ship bearings during their operation is presented in [16, 17]. In [18], the main types of architecture for building support and decision-making systems based on the creation of prototypes are considered. In [19], models for optimizing expert evaluation and methods of subjective assessments are considered: based on ranking, pairwise comparison of direct assessments and sequential comparison. Methods for multi-criteria decision-making tasks under conditions of linguistic uncertainty and fuzziness are considered. Based on the analysis of recent achievements in the field of maritime transport logistics, trends and critical development problems such as information processing algorithms, adaptive strategies, and decision-making methods under conditions of uncertainty and risk are identified. In [20] typical solutions of the situation problem, group ordering of alternatives, decision-making methods in the presence of many criteria are considered. However, the proposed information does not have methodological unity and is some aspects that are used for different purposes. The complexity of choosing optimization criteria and the objective function lies in the fact that in practice, optimization and management tasks have to deal with a set of criteria that are most often

mutually contradictory. Since the studied management objects are constantly influenced by the external environment, which changes stochastically, the most acceptable method for implementing transport management tasks under conditions of uncertainty is multi-criteria optimization.

Decision-making on the choice of an alternative variant of a similar situation from a set of possible arsenals of a similar situation is carried out in conditions of multi-criteria input information, which takes into account both operational factors and navigational conditions of the route, including uncertain, unpredictable conditions of the external environment. Such input information is an additive set of multi-scale components localized in specific conditions of their possible manifestation. The main task of identifying and determining the necessary strategy for maritime transport in the existing and predicted conditions of their implementation is to analyze possible situations, adapt them to the conditions of the route and make adequate management decisions.

In known similar models, such a statement becomes possible when there is a database and a corresponding expert system. Uses complex signal processing and filtering algorithms. For multi-criteria optimization of situational management of maritime transport in conditions of uncertainty, it is necessary to develop new approaches to assessing operational parameters and parameters of the external environment with the development of appropriate mathematical models, which are based on the construction of physical and predictive models.

**Presentation of the main material.** The main operational parameters of the transport vessel and the conditions of the route transition were considered as research materials. Multi-criteria optimization methods were used as research methods.

The input information of the situational management optimization task under conditions of uncertainty caused by the influence of the external environment is the determination of optimization parameters, which include vessel loading, delivery duration, transition speed, main engine load, fuel consumption per day, transportation cost. Below are the optimal values of these parameters, which are tried to be observed throughout the voyage.

**Vessel loading.** A practical example of vessel loading is considered in the activities of the merchant vessel FULDATAL (IMO 996 2988) with a deadweight of 3804 t, which makes the transition from Turkey to Germany for three weeks. After deducting the weight of fuel and oil, the maximum volume of cargo carried is 3650 t. Recommended loads are 50–70% of the maximum value and determine the parameter of transportation restrictions in tons. Another limitation is the performance of transportation in miles. The maximum time the vessel can be in the open ocean is 40 days.

**Duration of delivery.** It is determined through the interaction of transport agents. This interaction involves the activities of the charterer, who acts as the customer for transportation, and the captain. The charterer's desire is explained by economic considerations to deliver the cargo as quickly as possible. The captain's actions take into account the real situation of the route, the capabilities of the vessel and the crew. After consensus is reached, the date of passage of the cargo and its passage to the destination is set, which determines the duration of delivery.

**Transition speed.** The estimated values of the transition speed in the normal operation of the vessel are 10 knots.

**Main engine load** optimal load on the main engine is considered to be a load that provides a vessel speed of up to 10 knots. This value is 75% of the maximum.

**Fuel consumption.** Fuel consumption is calculated from its use per day. At a load on the main engine of 75%, which provides a speed of 10 knots, this consumption is 3.5 tons per day.

**Deviation from the route.** This value is determined by the specific features of the cargo being transported. The cases considered concern the transportation of general cargo: bulk, bulk, container. However, there are frequent cases of sea transportation of specific cargoes that are easily ignited, that enter into chemical reactions with the metal of ship equipment, fuel and oils. This requires strict routing, taking into account the approach to ports that have such protective safety measures in accepting cargo. In the event of sudden changes in weather conditions with a full load

of the vessel and the influence of other factors that are difficult to take into account, a maximum deviation from the route of up to 500 miles is possible.

Transportation costs. When crossing in 21 days, the costs for fuel and lubricants are 3 thousand US dollars per day and 63 thousand US dollars for the crossing. Operating costs for the shipowner during transit are 7 thousand USD per day. The ship's crew receives an average of 165,095 USD per voyage. Thus, the cost of the transition during the analyzed period is 235,095 USD and may fluctuate depending on the specific conditions of the route and its activities.

The matrix of situational management of transport operations and information support of transportation technologies is presented in Table 1. Numerical values of the matrix, optimization parameters, situational characteristics are represented by real situations, operational and organizational parameters collected by one of the authors of the article during similar transport transitions of the ship and the experience of implementing situational transport transitions in difficult conditions. These results were discussed and published in [21].

Table 1 – Transport matrix of the vessel FULDATAL (IMO 996 2988)

<i>The current situation</i>	<i>Optimization parameters</i>						
	<i>vessel loading, tons</i>	<i>delivery time, day</i>	<i>transition speed, knots</i>	<i>load on the main engine, %</i>	<i>fuel consumption, t/day</i>	<i>deviation from route, miles</i>	<i>transportation cost, thousand USD</i>
S <sub>0</sub>	2920	20	13	95	5,8	200	228
S <sub>1</sub>	3420	19	10	80	3,6	300	222
S <sub>2</sub>	3150	19	11	60	4,2	400	230
S <sub>3</sub>	2555	19	11	70	3,5	150	230
S <sub>4</sub>	2555	19	11	85	4,1	350	235
S <sub>5</sub>	2400	20	10	70	3,6	400	230
S <sub>6</sub>	2220	20	10	70	4,1	350	240
S <sub>7</sub>	2372	20	10	65	5,0	500	240
S <sub>8</sub>	2485	19	11	60	4,1	200	220
S <sub>9</sub>	2015	20	11	55	3,6	200	220
S <sub>10</sub>	1825	19	12	50	3,5	300	238
S <sub>11</sub>	1930	19	11	60	4,1	100	220
S <sub>12</sub>	2900	20	12	80	5,6	150	222
S <sub>13</sub>	3650	19	10	75	3,5	200	220
S <sub>14</sub>	2935	19	12	80	5,6	100	218
S <sub>15</sub>	2190	20	13	80	5,7	400	232
S <sub>16</sub>	2140	21	12	80	5,6	350	235
S <sub>17</sub>	2120	20	12	85	5,4	350	232
S <sub>18</sub>	3650	19	10	70	3,4	250	220
S <sub>19</sub>	3245	21	10	50	4,1	500	238
S <sub>20</sub>	3300	20	11	60	4,3	450	226

The difficulty in determining the values of transport optimization parameters lies in their situational interaction when developing strategies for responding to disturbing influences.

Situation  $S_0$  is characterized by the intensity of the influence of navigation conditions on the route and the sharp unpredictability of the direction of hurricanes. This forces us to resort to extreme measures of increasing the load on the main engine to 95%, which requires fuel consumption of up to 5.8 tons/day and a speed of 13 knots. Vessel loading 2920 tons. In this case, the increase in the duration of cargo delivery increases to 20 days.

Situation  $S_1$  is characterized by some reduction in the vessel's load and a route duration of 19 days, but additional uncertain transportation characteristics appear, associated with the deviation of the route for incidental cargo, which is reflected in the cost of transportation of 222 thousand US dollars and in forcing the main engine to operate up to 80% at 60% with a load on the main engine of up to 80%.

Situation  $S_2$  is characterized by the approach of the load to the maximum permissible level and is 86 /3% of it, i.e. 3150 t. Since no serious navigational obstacles are expected during this time, this requires normal functioning of the operational parameters of the main engine load of 60%, fuel consumption of 4.2 t/day. However, since there is a reserve in loading to the maximum value, a course deviation of 400 miles for incidental cargo is possible. To maintain the planned arrival time, the route speed will have to be increased to 11 knots. Deviation from the route causes an additional increase in the cost of transportation up to 230 thousand USD.

Situation  $S_3$  is characterized by the fact that the cargo is transported below the permissible mark. Transportation conditions are normal. Taking into account favorable weather conditions, it is possible to increase the speed to 11 knots, reducing fuel consumption to 3.5 tons/day and arrive at the port of destination on time.

Situation  $S_4$  is characterized by a decrease in the tonnage of the cargo being transported, which has a favorable effect on the operational parameters of the vessel, but at the same time, strong headwinds are observed on some sections of the route and storms and hurricanes are expected. This forces an increase in the speed of passage of sections with normal functioning of the vessel parameters to 11 knots in order to compensate for difficult sections of the transitions and reach the planned estimated arrival time of 19 days.

Situation  $S_5$  is characterized by an incomplete loading of 2400 tons, which requires an additional call to other ports for passing cargo, an increase in the deviation from the route to 400 miles and an increase in the delivery time to 20 days.

Situation  $S_6$  is characterized by normal parameters of the cargo passage to the destination, however, in the section of passage through the locks, forced delays are possible due to their low throughput, possible collisions and damage to equipment. Removing this section from the route requires an increase in such an indicator as a deviation from the route to 350 miles. At the same time, fuel consumption increases, the duration of delivery increases to 20 days, and the total cost of transportation increases to 240 thousand US dollars.

Situation  $S_7$  is characterized by the fact that it differs little from the situation  $S_6$ . The difference is a slight increase in cargo volumes, an increase in deviations from the route for passing cargo up to 500 miles and a decrease in the load on the main engine up to 65%.

Situation  $S_8$  is characterized by the possibility of increasing the total volume of cargo transported to 2485 tons, which is achieved by increasing the load on the main engine to 60% and increasing the speed of passage to 11 knots, despite some deviations from the route for passing cargo of 200 miles. The cost of transportation is 220 thousand USD.

Situation  $S_9$  is characterized by a stable load on the main engine of 55% of the maximum, low fuel consumption of 3.6 tons/day and a slight increase in the speed of delivery to 11 knots, which, when deviating from the route by 200 miles, is achieved by increasing the intensity of the equipment used and maximizing operational factors.

Situation  $S_{10}$  is characterized by a change in the direction of the vessel's movement to eliminate ballast crossings and an increase in the deviation from the route while maintaining the planned cargo delivery times. A tailwind on the crossing with a low load on the main engine of 50% of the maximum value in total ensures fuel consumption at minimum values, i.e. 3.5 t/day.

Situation S<sub>11</sub> is characterized by an incomplete load of up to 1930 t and relatively calm operating modes of the equipment: a load on the main engine of 50%, fuel consumption of 4.1 t/day and the possibility of deviation from the course for passing cargo by 100 miles. However, to meet the planned cargo delivery times of up to 19 days, an increase in speed to 11 knots is required.

Situation S<sub>12</sub> is characterized by a sudden change in the navigation situation; in addition to known head currents, storms and hurricanes are expected to complicate the crossing. This requires the formation of a load on the main engine up to 80%, which will require fuel consumption of 5.6 tons/day to ensure a possible deviation from the route of 150 miles. In such difficult conditions, the route of the load should be reduced to 2900 tons. The terms and duration of delivery will increase to 20 days.

Situation S<sub>13</sub> is characterized by the parameters of the vessel loading of 3650 t, delivery duration of 19 days, passage speed of 10 knots, main engine load of 75%, fuel consumption of 3.5 t per day.

Situation S<sub>14</sub> is characterized by the need to maintain a high passage speed of up to 12 knots to ensure the possibility of a deviation of 100 miles for passing cargo. This requires 80% load on the main engine and fuel consumption of 5.6 t/day to ensure the planned delivery times of cargo. Due to the short duration of the route of up to 19 days, the cost of transportation will also be minimal and is 218 thousand USD.

Situation S<sub>15</sub> is characterized by a decrease in cargo volumes to 2190 t and an urgent need to reduce ballast passages. To implement these intentions, a deviation from the planned route of up to 400 miles is expected for additional cargo, which is provided by a fuel consumption of 5.7 tons/day at a load on the main engine of 80%. To maintain the cargo delivery time of up to 20 days, it is necessary to carry out cargo transportation at a speed of 13 knots in order to arrive at the destination port on time.

Situation S<sub>16</sub> is characterized by the longest duration of the transition of 21 days. Due to the small load of 2140 tons, this situation requires measures to other ports located on deviations from the route of up to 400 miles. To do this, it is necessary to increase the load on the main engine to 80%, increase fuel consumption to 5.6 tons/day and increase speed to 12 knots in order to maintain the planned arrival time.

Situation S<sub>17</sub> is characterized by countercurrents and natural disasters of long duration. The multidirectionality of the accompanying and counterflows forces the load on the main engine to increase to 85% with a fuel consumption of 5.4 t/day. Calling at other ports to replenish cargo in such a difficult situation is not required, however, due to possible deviations from the route trajectory, its deviation up to 350 miles is allowed. The average speed is 12 knots; the cost of transportation is 232 thousand USD.

Situation S<sub>18</sub> is characterized by a small tailwind. In this case, the load on the main engine can be reduced to 70%, reducing fuel consumption to 3.4 t/day.

Situation S<sub>19</sub> is characterized by the need to follow the route with a load of 3245 t with a call at the most distant port for replenishment, which is located 500 miles from the main route. Weather conditions are normal, so economical modes of main engine load of 50%, fuel consumption of 4.1 t/day are used. This allows to achieve a speed of transition of up to 10 knots. The duration of the transition under such conditions is 21 days, and the cost of transportation is 238 thousand USD.

The S<sub>20</sub> situation is characterized by almost the same route situation. Loading 3300 t requires a call at a port 450 miles away from the main route. Favorable weather conditions and a slight tailwind allow the transition to be carried out at a speed of 11 knots, which requires a load on the main engine of 60% with fuel consumption of 4.3 t/day. These modes of route passage allow to reach the final points of the route in 20 days. The cost of transportation will be 226 thousand USD.

The obtained data can be used to build multi-criteria optimization models that will help find the best compromise between conflicting goals, for example, between cost and quality of service. The considered situations of maritime transport can be characterized by stable states of operation of transport objects, variable states caused by changes, adjustments, changes in operational parameters and new transformation states as a reaction to external disturbances.

**Research methodology.** Knowing the possible situations and the full set of possible decision outcomes, it is possible to construct a matrix whose elements can be interpreted as a numerical assessment of the advantage of the  $i$ -th alternative, provided that the situation has arisen  $j$ .

$$R = \left( \begin{array}{c|cccc} & \Pi_1 & \Pi_2 & \dots & \Pi_n \\ \hline q_1 & \delta y_{11} & \delta y_{12} & \dots & \delta y_{1n} \\ q_2 & \delta y_{21} & \delta y_{22} & \dots & \delta y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_m & \delta y_{m1} & \delta y_{m2} & \dots & \delta y_{mn} \end{array} \right), \quad (3)$$

where  $q_1 \dots q_i$  – components of transition characteristics (current situation  $S_i$  in table 1);

$\Pi_1 \dots \Pi_j$  – optimization parameters in table 1;

$i$  – line number;

$j$  – column number;

$\delta y_{ij}$  – relative deviation  $j$  – th parameter has the optimal value.

The matrix is the basis for a reasoned choice of a transportation strategy. In maritime transport logistics, it is a tool that allows you to systematically evaluate different logistics solutions and identify the most optimal options for many criteria and situations. It shows how different transport strategies or routes correlate with key criteria: delivery time, cost, reliability, transport load level, etc. This allows you to compare alternatives and choose the most balanced solution. If an alternative shows low results for one or more criteria, the matrix will help to identify this. It indicates areas that need improvement, for example, delays on a specific section of the route or a high level of transport operating costs.

To achieve the same goal, depending on the choice of strategy and a specific criterion, different optimal solutions can be obtained. To eliminate uncertainty, it is necessary to take into account the impact of all situations. Each type of strategy can be matched with a set of criteria for choosing the optimal solution.

Decision-making is the process of selecting the most preferential solution from a set of permissible solutions or their ordering. It is carried out on the basis of knowledge about the management object and can occur over time in the presence of a set of indicators characterizing the effectiveness of the decision made.

Formalization and meaningful filling of solutions consists in choosing the most successful alternative from a set of existing ones. The task is described by a pair  $(\Omega, C)$ , where  $\Omega$  – multiple alternatives,  $C$  – the principle of optimality.

To determine the elements of the matrix, the evaluation of a scalar vector is used. This requires a transition from the evaluation of a vector to a scalar of objects. The functions used in solving a multi-criteria problem are the convolution function of vector arguments  $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{ij}, \dots, y_{in})$  in scalars  $\delta y_{ij} = f(y_i)$ .

The convolution of the vector argument serves to reduce the number of criteria. Its purpose is to replace the original criteria with general criteria. The convolution operation is called aggregation of partial criteria. It is used if the partial criteria can be ranked in order of decreasing importance so that the importance of each pair of neighboring criteria does not differ significantly. Their normalization is used to compensate for small values of some criteria with large values of other criteria.

To define elements  $\delta y_{ij}$  matrices, one of the methods of scalarization of vector estimates is used – the method of selection by ordering objects according to the standard.

By standard we mean a class of objects characterized by a generalized goal  $h = (c_1, \dots, c_j, \dots, c_n)$ . Let us introduce a measure of generalized deviation from the aim, which allows us not only to find the object closest to the standard, but also to order the objects by distance from the target. Let

us consider a standard whose properties are formed by equality constraints ( $y_j = c_j$ ). Deviation of the  $j$ -th feature in any direction from the point  $c_j$  ( $c_j \pm \delta y_{ij}$ ) determines the degree of remoteness of the object from the aim by this feature. Then the relative deviation of the  $j$ -th feature from the aim is determined as

$$\delta y_{ij} = \frac{|y_{ij} - c_j|}{c_j}, \quad (4)$$

where  $i$  – line number;  $j$  – column number in matrix.

As parameters  $c_j$  it is necessary to choose the best (optimal  $c_{j\ opt}$ ) from the point of view of the problem being solved, the values of the analyzed parameters can be maximum, minimum or intermediate values from the experimental sample. With this approach, the formula  $\delta y_{ij}$  will convert dimensional values into relative ones. However, with such a choice of parameters  $c_j$  will necessarily be observed coinciding with the magnitude  $c_j$  the corresponding elements of the matrix, which will lead to  $\delta y_{ij} = 0$ . When using additive convolution, this leads to the corresponding feature falling out of the overall assessment of the object, and when using multiplicative convolution, to its zeroing. An obvious way to eliminate such situations is to expand the limit of each feature  $c_j$  in the same percentage ratio. Below are the optimal values of each of the analyzed parameters  $c_{j\ opt}$  were increased by 1%.

$$c_j = c_{j\ opt} + 0.01c_{j\ opt}. \quad (5)$$

In this case, the principle of optimality in the problem of maritime transport logistics is implemented according to priorities. Optimization is carried out according to the rule.

$$Opt\ y_i = extr \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i, \quad (6)$$

where  $\alpha_i$  – optimization parameter.

Under the result of decision  $a_{ij}$  we will understand its numerical assessment, corresponding to the situation  $S_i$  and option  $x_i$ .

$$Y = \max_i \min_j a_{ij} + \max_i \min_j f(x_i, S_i). \quad (7)$$

The efficiency of decision-making  $E$  can be formalized using the formula of the multiplicative combination of the decision-making factor  $Q$  and the decision-making factor  $A$  [9].

$$E = Q \cdot A. \quad (8)$$

If one of these factors decreases, the effectiveness of the solution decreases.

The technology model for the selection of logistics solutions with diversity and ambiguity of the principles of multi-criteria optimization of situational management of maritime transport transportation under conditions of uncertainty of the influence of the external environment is presented in Fig. 1.

This is a new scientific result in the research work: the model of situational logistics management of maritime transport under conditions of uncertainty has been further developed, consisting of their aggregation of criteria and coincidences of generalizing objective functions, which differs from existing ones by additional operations of establishing and ranking priorities of multi-criteria optimization strategies with the combination of objective assessments with subjective preferences of consumers. This increases the reliability and efficiency of transport.

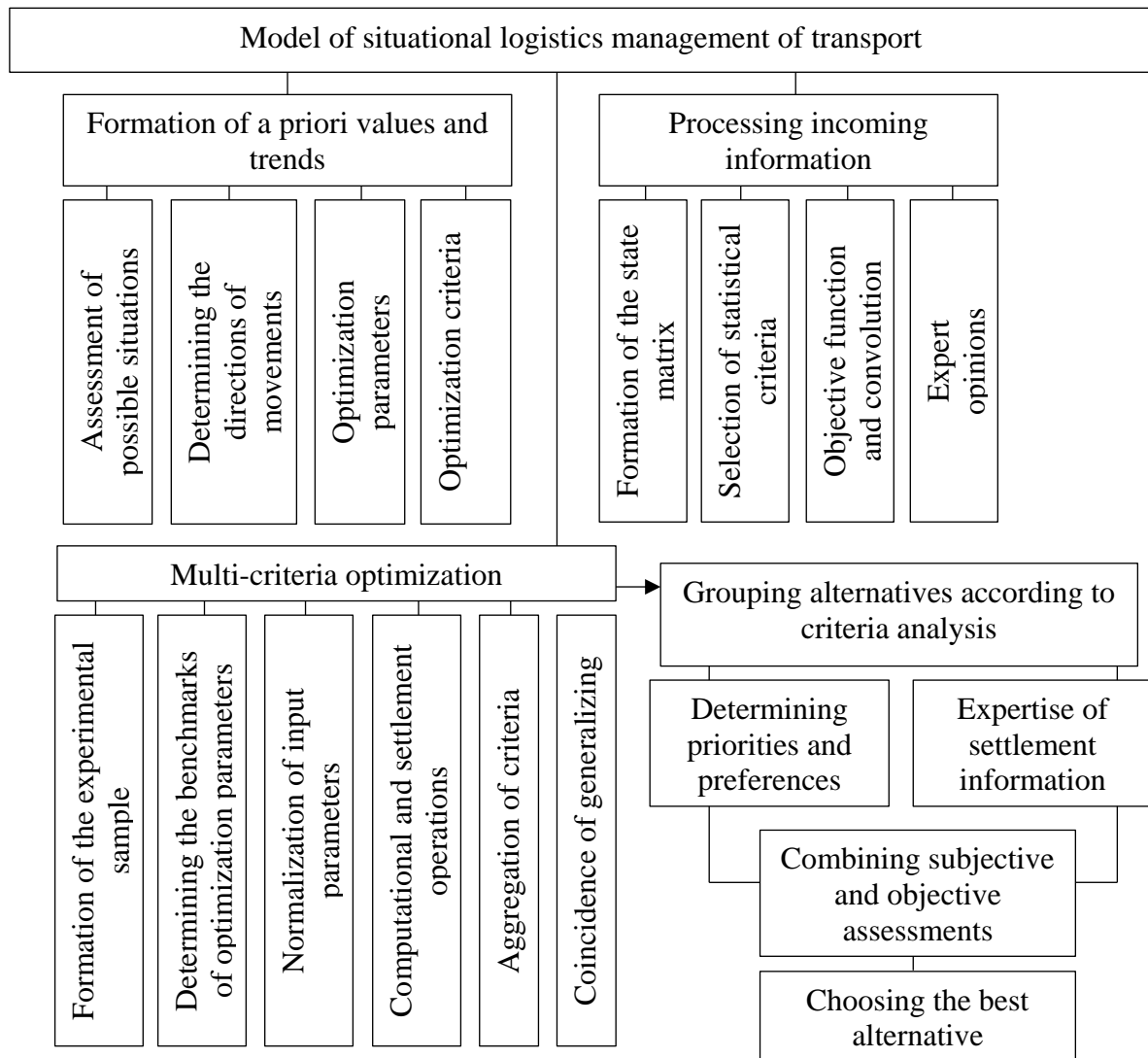


Figure 1 – Model of situational logistics management of transport

The following generalizing multi-criteria utility functions were used in the theoretical analysis.

Additive package

$$y_a = \sum_{j=1}^n \omega_j \delta y_{ij} , \tag{9}$$

where  $\omega_j$  – importance (weight coefficient) of the  $j$ -th attribute,

$$\sum_{j=1}^n \omega_j = 1 . \tag{10}$$

Step multiplicative convolution

$$y_{ms} = \prod_{j=1}^n (\delta y_{ij})^{\omega_j} . \tag{11}$$

Additional multiplicative convolution

$$y_{md} = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \omega_j \delta y_{ij}) . \tag{12}$$

The best object is considered to be the one with the minimum values of the additive convolution, exponential multiplicative convolution, and additive multiplicative convolution functions.

Wald criterion (minimum maximum)

$$Z_v = \min_i \max_j \delta y_{ij}. \quad (13)$$

Laplace criterion (minimum minimum)

$$Z_L = \min_i \min_j \delta y_{ij}. \quad (14)$$

By comparing the weight and significance of the criteria, it is possible to determine from the conditions which parameters will be the most critical for the transition (for example, reducing delivery time may be more important than increasing costs during intensive operation of transport equipment).

One of the problems in decision-making in the presence of several criteria that are not always consistent with each other is their formalization using multi-criteria optimization models. In their practical implementation, they use the principle of reducing a multi-criteria problem to a single-criteria function through scalar optimization.

Scalar optimization requires additional knowledge about the properties of generalized objective functions, the scale of characteristics and weight coefficients. Since this knowledge depends on the subject area, the order of objects in n-dimensional space can be explicitly determined. Therefore, it is relevant to study the influence of the properties of generalized objective functions, characteristic scales and weight coefficients on the optimization results.

The additive generalizing function (9) synthesizes the "volumetric" indicator of the object. It reflects the total value of individual indicators, considering their importance. The direct multiplicative function (11) prefers objects with uniform estimates for all indicators, reflecting the uniformity of individual indicators. The additional multiplicative function (12) has the inverse property. The advantage of the additional over the multiplicative functions is the admissibility of zero values of the features. For direct multiplicative functions, special measures should be taken to avoid scalar estimates of vectors that have a component with a zero value.

The Wald criterion (13) is a reinsurance criterion which consists of obtaining the maximum guaranteed result under the worst conditions. Assuming the maximum negative development of the situation, the strategy chosen is not so much winning as losing. The minimum value of the worst option is taken into account (the strategy of fatalism). It can be used in cases where errors in choosing a strategy can lead to catastrophic consequences when decisions are made only once and cannot be changed in the future.

Laplace's criterion (14) determines the strategy that gives the maximum gain with an unknown state of the environment. The alternative with the lowest score according to the Laplace criterion is considered the best. This is a criterion of extreme optimism. In this case, no possible result except the best is taken into account. The degree of risk from the negative impact of changes in the external environment is not taken into account. It should be noted that situations requiring the use of such a criterion are not limited only to incorrigible optimists but also to people put in a hopeless situation when they are forced to follow the principle of "win or lose". The main disadvantage of this criterion is that when finding the average gain, the effect of compensation of small gains by large ones may occur.

The main stages of the multi-criteria approach to choosing the optimal strategy for implementing maritime transport under conditions of uncertainty are working with numerical representations of experimental information, mathematical calculations, storing and exchanging information, and interpreting results.

**Main results and discussion.** To ensure transparency, orderliness and compliance with the requirements for the use of multi-criteria optimization of maritime transport, a system of regulatory management procedures has been developed. Regulatory management systems are based on laws, rules, internal regulations used to organize and manage various aspects of the activities of maritime transport logistics entities.

Prospects for further research are as follows. The information obtained can be used as the basis for a computer-aided automated system designed to assist and support decision-making in solving poorly structured problems through an intelligent interactive management model (Fig. 2).

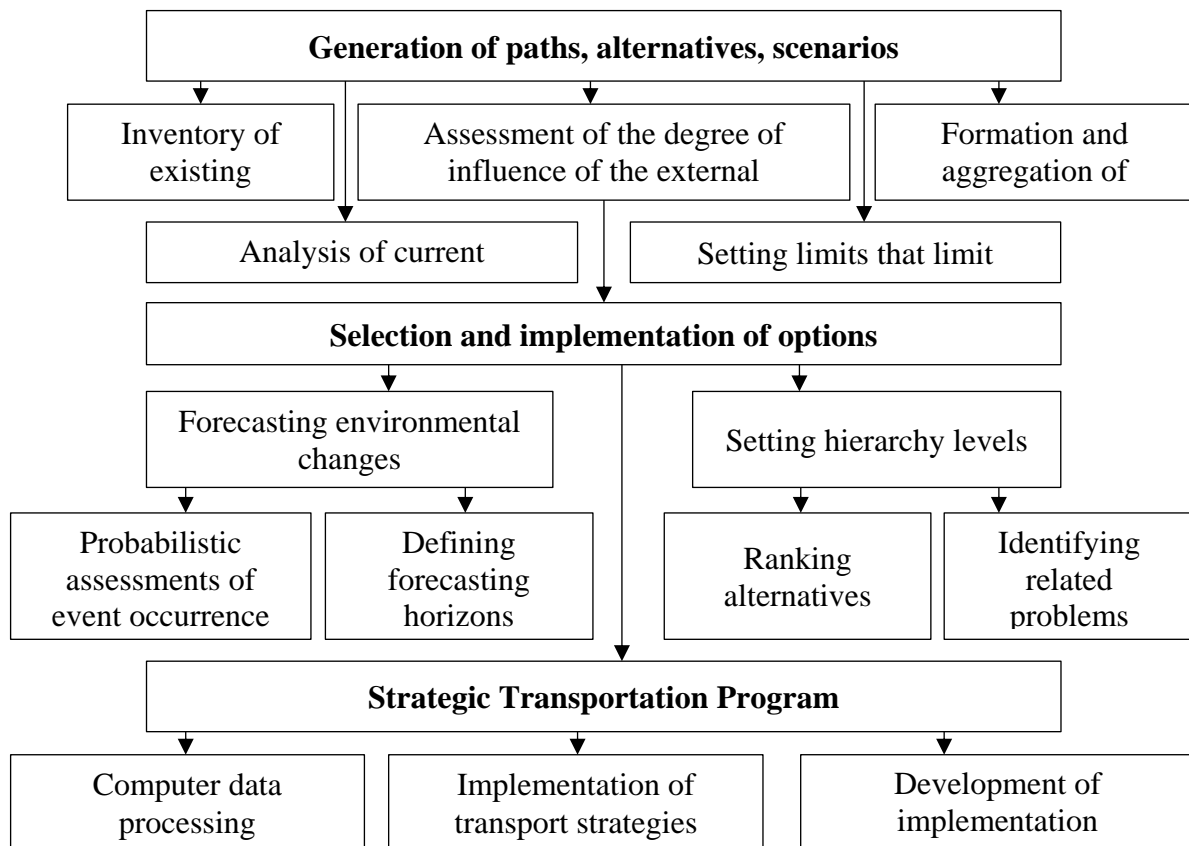


Figure 2 – Intelligent interactive model of transport management

Information management systems help reduce uncertainty in the volume of cargo flows, which allows attracting additional volumes of cargo. Digitalization allows you to control not only the cargo flow, but also to identify the time and zones of arrival, as well as the places of loading and unloading. Situational management provides flexibility and adaptability in managing transport processes. It allows you to quickly respond to changes in the environment. Modern transport systems are faced with the need to take into account a variety of factors, such as economic efficiency, equipment stability, reliability and timeliness of delivery, and others.

Multi-criteria optimization involves the simultaneous consideration of several, often conflicting, criteria after making decisions. In transport logistics, this may include minimizing costs, reducing delivery time, reducing emissions, and increasing the reliability of transport. The use of such methods allows finding compromise solutions that satisfy various stakeholders. This approach allows for the formation of adaptive strategies that simultaneously take into account a variety of factors and provide a balance between economic efficiency and service quality. Thus, the integration of multi-criteria optimization and situational management into the practice of planning and implementing transport allows for more effective achievement of goals, adaptation to changes in situations, and greater resilience of logistics networks to external influences and internal failures.

To perform calculations using the proposed method, knowledge of the weight coefficients of optimization parameters, their recommended values, directions and trends of possible changes is required. This information is presented in Table 2. The optimal values of the parameters are represented by the results of the generalization of the long-term experience of one of the authors, who is carrying out a transition along a given route. Weight coefficients were determined by expert evaluation.

Table 2 – Optimal values of parameters of the transportation process

No. s/n	ship loading, <i>t</i>	ship loading, <i>t</i>	transition speed, knots	load on the main engine, %	fuel consumption, t/day	deviation from route, miles	transportation cost, thousand USD
optimal value <i>c<sub>j opt</sub></i>	3650 (max)	19 (min)	10 (min)	75	3.4 (min)	100 (min)	218 (min)
weight factor <i>ω<sub>i</sub></i>	0.20	0.15	0.20	0.10	0.10	0.10	0.15

Calculated by the formula  $\delta y_{ij}(4)$ . The matrix of dimensionless values of parameters, as well as the values of convolutions and criteria are presented in Table 3 (highlighted in gray). The calculations were performed using the Maple 2018 computer mathematics system. The calculations were performed assuming that all parameters have different importance.

Table 3 – Matrix of dimensionless (relative) values of process parameters, as well as the values of convolutions and criteria

No. s/n	loading of a ship	delivery time	transition speed	load on the main engine	fuel consumption	deviation from the route	transportation cost	min	max	<i>y<sub>a</sub></i>	<i>y<sub>ms</sub></i>	<i>y<sub>md</sub></i>
0	0.2079	0.0422	0.2871	0.9966	0.7993	0.9802	0.0355	0.0355	0.9966	0.3883	0.2093	0.3328
1	0.0722	0.0099	0.0099	0.0561	0.0483	1.9703	0.0082	0.0082	1.9703	0.2266	0.0339	0.2205
2	0.1455	0.0099	0.0891	0.9972	0.9350	2.9604	0.0446	0.0099	2.9604	0.5443	0.1456	0.4566
3	0.3069	0.0099	0.0891	0.0759	0.0192	0.4851	0.0446	0.0099	0.4851	<b>0.1454</b>	0.0739	<b>0.1382</b>
4	0.3069	0.0099	0.0891	0.1221	0.1939	2.4653	0.0673	0.0099	2.4653	0.3689	0.1223	0.3349
5	0.3489	0.0422	0.0099	0.0759	0.0483	2.9604	0.0446	0.0099	2.9604	0.3932	0.0798	0.3629
6	0.3978	0.0422	0.0099	0.0759	0.1939	2.4653	0.0900	0.0099	2.4653	0.3748	0.1028	0.3397
7	0.3565	0.0422	0.0099	0.1419	0.4560	3.9505	0.0900	0.0099	3.9505	0.5479	0.1222	0.4828
8	0.3259	0.0099	0.0891	0.2079	0.1939	0.9802	0.0008	<b>0.0008</b>	0.9802	0.2228	0.0614	0.2060
9	0.4534	0.0422	0.0891	0.2739	0.0483	0.9802	0.0008	<b>0.0008</b>	0.9802	0.2452	0.0729	0.2253
10	0.5049	0.0099	0.1881	0.3399	0.0192	1.9703	0.0809	0.0099	1.9703	0.3851	0.1387	0.3392
11	0.4764	0.0099	0.0891	0.2079	0.1939	0.0099	0.0008	<b>0.0008</b>	<b>0.4764</b>	0.1559	0.0418	0.1489
12	0.2133	0.0422	0.1881	0.0561	0.6307	0.4851	0.0082	0.0082	0.6307	0.2050	0.1060	0.1894
13	0.0099	0.0099	0.0099	0.2541	0.6889	0.9802	0.0008	<b>0.0008</b>	0.9802	0.1979	0.0228	0.1860
14	0.2038	0.0099	0.1881	0.0561	0.6307	0.0099	0.0099	0.0099	0.6307	0.1510	0.0588	0.1433
15	0.4059	0.0422	0.2871	0.0561	0.6598	2.9604	0.0536	0.0422	2.9604	0.5206	0.2092	0.4418
16	0.4195	0.0943	0.1881	0.0561	0.6307	2.4653	0.0673	0.0561	2.4653	0.4609	0.2207	0.3960
17	0.4249	0.0422	0.1881	0.1221	0.5725	2.4653	0.0536	0.0422	2.4653	0.4529	0.2029	0.3909
18	0.0099	0.0099	0.0099	0.2079	0.2230	1.4752	0.0008	<b>0.0008</b>	1.4752	0.1961	<b>0.0207</b>	0.1884
19	0.1197	0.0943	0.0099	0.3399	0.1939	3.9505	0.0809	0.0099	3.9505	0.5006	0.1093	0.4563
20	0.1048	0.0422	0.0891	0.2079	0.2521	3.4554	0.0264	0.0264	3.4554	0.4406	0.1194	0.4054
	Laplace criterion		Wald criterion									
	<b>0.4764</b>		<b>0.0008</b>									

In table. 3, the values of the used criteria corresponding to the optimal rows of table 1 are highlighted in bold and in color.

For the final derivation of the relatively optimal row of process parameters in table 1, it is necessary to take into account the coincidences of various generalizing functions, the degree of adequacy of each generalizing function of the problem being solved.  $S_8$ ,  $S_9$ ,  $S_{11}$ ,  $S_{13}$ ,  $S_{18}$ . Wald's criterion clearly indicates  $S_{11}$ . (Laplace criterion and additional multiplicative convolution).

Key parameters of management strategies include the level of priority of goals. Limit values of performance indicators, permissible limits of deviations from the established transition plan.

This structuring of solutions allows us to highlight the main optimization parameters in the recommended strategies. This is a common priority in the strategies.  $S_3$ ,  $S_{11}$  and  $S_{18}$  have a delivery time of 19 days and fuel consumption within the permissible norm of 3.5 t/day, 4.1 t/day, 3.4 t/day. Other parameters of these strategies are considered of little importance to users and are considered as additional. Among them, the greatest interest is the vessel loading, which for strategy  $S_{18}$  is the maximum among all three considered strategies and is 3245 t. Based on these considerations, this strategy should be preferred.

The next group of ranking priority strategies, according to the calculations, is represented by strategies  $S_8$  and  $S_9$ , in which the general priority position is the lowest transition cost, which is 220 thousand USD. Other parameters of these strategies are considered insignificant for users.

Ranking by priorities for users and organizers of crossings is a practical implementation of the proposed multi-criteria optimization method for situational management of maritime transport in conditions of uncertainty of the external environment.

### Conclusions.

1. Multi-criteria optimization of situational management of sea transport is proposed, which consists of an analysis of complex manifestations of specific situations, hidden by possible interactions and uncertainties of the external environment, which differs from existing ones in the formation of a transport matrix, optimization parameters, as which the duration of delivery, load on the main engine, fuel consumption, deviation from the route, and the cost of transportation are selected. These parameters directly depend on the situation, the transition from a vector to a scalar representation and the ranking of criterion estimates of objective functions. This allows for intelligent support for decision-making regarding the choice of transportation strategies.

2. An intelligent interactive model of decision-making regarding the choice of transport management alternatives in conditions of uncertainty of input information, which includes internal regulations, standards and rules for transportation, is proposed, which differs from existing ones in that it takes into account the effects of the external environment and the probability of situations of route passage, the formation and aggregation of criteria. This allows for transparency and streamlining of procedures for implementing transport strategies.

### REFERENCES

1. Kurapati, S., Kourouniotti, I., Lukosch, H., Bekebrede, G., Tavasszy, L., Verbraeck, A., Groen, D., Van Meijeren, J., Lebesque, L. (2017). The role of Situation Awareness in Synchronodal Corridor Management: A simulation gaming perspective. *Transportation Research Procedia*, 27, pp. 197–204.
2. Liu, J., Gong, R., Gong, Y., Li, Z., Chen, Z. (2025). Low-cost real-time traffic situational awareness system based on modified YOLO v8 and GWO-LSTM for edge deployment. *Journal of Real-Time Image Processing*, 22 (2), art. no. 89.
3. Othman, K. M., Alzaben, N., Alruwais, N., Maray, M., Darem, A. A., Mohamed, A. (2025). Smart Surveillance: Advanced Deep Learning-Based Vehicle Detection and Tracking Model on Uav Imagery. *Fractals*, 33 (2), art. no. 2540027.
4. Ponte, S., Farina, A. (2024). Conceptual, Functional and Operational Interactions of ATC Radars and Navigation Systems in the Framework of Future Airspace Management. 2024 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security, TechDefense 2024 – Proceedings, pp. 435–440.

5. Thanikella, A., Singh, S. (2023). Congestion to Clarity: Innovative Traffic Management with Braess Paradox and Advanced Image Segmentation. 2023 IEEE International Conference on Electrical, Automation and Computer Engineering, ICEACE 2023, pp. 237–244.
6. Qu, L., Li, Y., Wang, J. (2023). Simulation and optimization of agricultural production scenarios in loess hilly and gully region. *Dili Yanjiu*, 42 (6), pp. 1647–1662.
7. Xin, X., Liu, K., Loughney, S., Wang, J., Yang, Z. (2023). Maritime traffic clustering to capture high-risk multi-ship encounters in complex waters. *Reliability Engineering and System Safety*, 230, art. no. 108936.
8. Fatkueva, R. R. (2023). Secure data transmission method for the movement of autonomous vehicles [Метод защищенной передачи информации для передвижения автономных транспортных средств] *Informatsionno-Upravliaiushchie Sistemy*, (6), pp. 46–56.
9. Topaj, A., Tarovik, O. (2023). Operational planning and combinatorial optimization in simulation models of marine transportation systems. *International Conference on Harbour, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation, 2023 – September*, 9 p.
10. Scarlat, C., Ioanid, A., Andrei, N. (2023). Use of the Geospatial Technologies and its Implications in the Maritime Transport and Logistics. *International Maritime Transport and Logistics Conference*, 12, pp. 19–30.
11. Dukic, A., Bjelosevic, R., Stojcic, M., Banjanin, M. K. (2023). Network Model of Multiagent Communication of Traffic Inspection for Supervision and Control of Passenger Transportation in Road and City Traffic. 2023 46th ICT and Electronics Convention, MIPRO 2023 – Proceedings, pp. 1167–1172.
12. Ponte, S., Farina, A. (2024). Conceptual, Functional and Operational Interactions of ATC Radars and Navigation Systems in the Framework of Future Airspace Management. 2024 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security, TechDefense 2024 – Proceedings, pp. 435–440.
13. Polo, A., Rocca, P. (2022). Decision Support System for Mobility and Transportation Management in Large Sport Events. 2022 IEEE International Workshop on Sport, Technology and Research, STAR 2022 – Proceedings, pp. 84–88.
14. Soner, O., Akyuz, E., Celik, M. (2019). Statistical modelling of ship operational performance monitoring problem. *Journal of Marine Science and Technology (Japan)*, 2019, 24 (2), pp. 543–552.
15. Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A., Yanenko, A. (2024). Multicriteria Approach to the Selection of Optimal Diagnostic Characteristics of Ship Bearings Monitoring. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2024, 219, 242–257. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-70959-3\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-031-70959-3_12).
16. Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A., Yanenko, A., Movchan, P. (2024). Zastosuvannia bahatokryterialnoho analizu pry doslidszhenni termodynamichnykh protsesiv u sudnoremonti ta transportnii infrastrukturi. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*, 1(28), 117–133. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.117-132>.
17. Sharko, A., Sharko, O., Stepanchikov, D., Yanenko, A. (2024). Monitoring State of Marine Plain Bearings Based on Exponential Degradation Model. *Proceedings of the 8th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems. Volume I: Machine Learning Workshop, Lviv, Ukraine, April 12–13*, 48–58.
18. Bidiuk, P. I., Tymoshchuk, O. L., Kovalenko, A. Ye., Korshevniuk, L. O. (2022). *Sistemy i metody pidtrymky pryiniattia rishen*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 610.
19. Anikin, V. K., Krylov, Ye. V., Pasko V. P. (2023). *Teoriia pryiniattia rishen: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 134.
20. Us, S. A., Koriashkina, L. S. (2014). *Modelii metody pryiniattia rishen: navch. posib*. Dnipro: NHU, 300.
21. Sharko O. V. (2025). Multicriteria optimization of situational management of sea transportation / O. V. Sharko, D. M. Stepanchikov, P. V. Movchan // “Modern Information and Innovation Technologies in Transport” MINTT-2025: Materials of the 17 international scientific

and practical conference (Odesa, May 28-30, 2025). Odesa: Kherson State Maritime Academy, 2025, pp. 42–45.

**Шарко О. В., Степанчиков Д. М., Шарко А. О., Мовчан П. В. БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИТУАЦІЙНОГО УПРАВЛІННЯ МОРСЬКИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

*Запропоновано методологію багатокритеріальної оптимізації морських транспортних перевезень в умовах невизначеності впливу зовнішнього середовища. Зазначено, що у практиці управління морськими транспортними перевезеннями спостерігаються їх комплексні прояви у вигляді різних конкретних ситуацій, прихованих можливими взаємодіями і невизначеностями впливу зовнішнього середовища. Показано, що найбільш раціональним способом вирішення завдань транспортних перевезень за умов невизначеності є багатокритеріальна оптимізація. На основі розгляду реальних ситуацій транспортного переходу Туреччина-Німеччина показано, що зниження невизначеності при визначенні умов проходження маршрутів перевезень може бути досягнуто як шляхом раціонального використання експлуатаційних параметрів судна, так і урахуванням зовнішніх умов проходження маршруту. Запропоновано та докладно досліджено параметри оптимізації транспортних перевезень конкретного транспортного маршруту. Виконано формування матриці транспортних перевезень, параметрами оптимізації в якій є завантаження судна, тривалість доставлення, швидкість переходу, навантаження на головний двигун, витрата палива, відхилення від маршруту, вартість перевезень. Розглянуто практичні ситуації проходження маршрутів. Встановлено вплив зовнішніх збурень на керовані експлуатаційні параметри судна, що дозволило виробити рекомендації щодо прийняття рішень, виходячи з ранжирування пріоритетів оптимізаційних параметрів стратегій матриці транспортних перевезень та збігів з різних узагальнювальних функцій та можливість прогнозування наслідків прийняття рішень про обрану оптимальну стратегію управління в умовах конкретної ситуації, що склалася. Запропоновано інтелектуальну інтерактивну модель прийняття рішень щодо вибору альтернатив управління транспортом в умовах невизначеності вхідної інформації, що включає внутрішні нормативні акти, стандарти та правила перевезень, яка відрізняється від наявних тим, що враховує вплив зовнішнього середовища та ймовірність ситуацій проходження маршруту, формування та агрегування критеріїв. Це дозволяє забезпечити прозорість та оптимізувати процедури реалізації транспортних стратегій.*

**Ключові слова:** морські перевезення; тенденції розвитку; управління; логістика; інтелектуалізація; транспортні технології.

© Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A., Movchan P.

Статтю прийнято до редакції 21.05.2025

## MODEL AND METHOD FOR CALCULATING MATRICES OF CORRESPONDENCES TAKING INTO ACCOUNT TIME LIMITS OF TRAVEL BENEFITS

**Slavych V. P.**, Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Technical Service of Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: vslavich@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7882-4198.

*The article proposes an improved model for calculating matrices of passenger correspondences, which takes into account time limits of travel benefits. The relevance of the study is due to the need to adapt transport planning to social changes and reduce passenger traffic in conditions of limited funding. Traditional approaches do not take into account the impact of changes in the time of benefits, which leads to distortion of modeling results and inefficient use of resources. The proposed model takes into account the temporal availability of benefits and allows calculating the attraction coefficients between transport areas, taking into account the periods of paid and free travel. Special attention is paid to the analysis of the dynamics of trips of persons of preferential categories at different times of the day, which allows correctly considering peak and interpeak loads. The introduced parameters allow calculating the share of time allocated to each type of travel and combining the corresponding attraction coefficients. Thus, the model reflects the change in the mobility of preferential categories of passengers depending on the time of day, which is especially important for cities with a high share of such passengers. The developed approach also allows assessing potential changes in passenger flows when adjusting the time limits of the benefits, which can be useful for transport management bodies. The paper considers various options for the mutual arrangement of the time intervals of the benefits and the calculation of the corresponding weighting coefficients. The results obtained allow the formation of more accurate and flexible correspondence matrices that take into account social policy in the field of transportation, demand reduction and uneven load on the transport network. The proposed approach is universal in nature and can be adapted to different conditions of public transport operation, contributing to more effective planning of routes and schedules. In addition, the model can be integrated into existing transport modeling information systems for automated consideration of preferential factors.*

**Key words:** passenger transportation; correspondence matrix; route transportation; preferential travel; transport modeling; passenger flow; time constraints; attraction coefficient; public transport; trip dynamics; transportation planning.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.187-194**

**Introduction.** The modern transport system faces challenges related not only to the technical aspects of transportation, but also to changes in social policy, in particular in the field of preferential travel. In conditions of limited funding and the need for rational use of resources, the calculation of correspondence matrices that take into account the time limits of the benefits is becoming increasingly relevant. Traditional transport planning models are not always able to accurately reflect the impact of such restrictions on the spatio-temporal structure of passenger flows, which leads to distortions in forecasting and inefficient transport management.

The need to improve the methods of calculating correspondence matrices is due to the need to increase social justice, economic efficiency and optimize transport costs. This issue is of particular importance in cities with a high proportion of passengers using benefits that are limited in time (for example, only during off-peak hours). In such cases, the structure of demand shifts, which must be taken into account in analytical models to ensure adequate planning of routes, traffic schedules and vehicle loads.

Thus, the development of new models capable of integrating time constraints on benefits into the process of constructing correspondence matrices is not only relevant but also critically necessary for creating an efficient, flexible, and socially oriented transportation system.

**Analysis of recent achievements and publications.** Research into methods for generating and analyzing passenger correspondence matrices is a key area of research in transport modeling, especially when considering time constraints associated with travel benefits. Different approaches to calculating such matrices allow us to choose the most appropriate models for specific urban mobility conditions.

In the works [1, 3, 4] synthetic and stochastic methods of constructing correspondence matrices that take into account the structural features of passenger flows are considered. In [3] the formulation of the problem of random filling of the matrix is proposed, considering the uncertainty in the initial data, which is especially relevant in the case of preferential transportation, when accurate observation of the passenger is difficult. In [4] the accuracy of models for small cities is estimated, where the effects of the influence of privileges can be more pronounced due to the smaller number of alternative routes.

Interval approaches to modeling that consider ranges of possible values instead of fixed ones are discussed in [2]. This approach allows for better consideration of temporal variability in demand, particularly in the case of limited-time benefits.

The works [6, 7, 9] are devoted to modeling the dynamics of transport and pedestrian flows, as well as determining the passenger waiting time, which is of critical importance for analyzing the behavior of preferential categories of passengers who may change routes in response to changes in service conditions. In [6], a model for optimizing the stay of transport at stops is considered, which allows considering the time component when forming correspondences.

The issue of accounting for preferential passenger categories in urban conditions is partially considered in [8], which examines the impact of reducing the number of carriers on passenger correspondence. This allows us to draw conclusions about the flexibility of passenger demand and changes in the structure of trips due to restrictions on transport supply.

The application of intelligent systems for passenger flow forecasting is presented in [11], where electronic ticket data is used to model passenger flow during special events. Such approaches can be adapted to model the behavior of preferential passengers depending on the time of day or calendar day.

Special attention is paid to modern works that combine methods of network analysis and transport geography [10, 14, 15]. It is shown how weighting factors in complex networks allow considering real passenger traffic, which can also be used to analyze the impact of time restrictions on the activity of preferential categories of transport users.

In [12], a method for integrating ticket sales and passenger registration data to construct dynamic OD matrices was developed. This approach is extremely promising in the context of studying preferential travel, when taking into account the time of day is of fundamental importance. And in [13], optimization of transport frequency is considered, considering new restrictions that arose during the pandemic; similar methods can be applied to adapting transport to the time frame of the benefits.

Thus, the analyzed sources form a comprehensive picture of modern approaches to modeling passenger correspondence, especially in conditions of time and social constraints. The proposed study is a logical continuation and expansion of the above approaches, aimed at taking into account the specifics of the action of travel benefits in the temporal aspect.

**Goal and problem statement.** The aim of the work is to develop a model for calculating correspondence matrices that takes into account restrictions in the form of time changes in the validity of travel privileges. This approach involves the development of methods for adapting to reduced demand, optimizing the frequency of flights, and maintaining the efficiency of transfers between different modes of transport.

**Presentation of the main research material.** Consider the transport network of a hypothetical city, which consists of separate transport districts or zones, between which there is intensive daily movement of passengers. This movement is carried out using public road transport, which provides a connection between residential, business, educational and other functional zones of the city. The transport network is considered as a system that includes nodes (transport districts) and connections between them (public transport routes), along which passenger flows move.

To simplify the analysis and focus on key aspects related to the impact of restrictions on benefits, it is advisable to introduce a generalization: consider public transport as a homogeneous system, represented by one type of vehicle – for example, buses. This allows us to abstract from technical and technological differences between modes of transport and focus on the basic patterns

of passenger flow formation and their change due to the action of social restrictions. This approach does not reduce the generality of the model, but on the contrary – it allows us to identify universal dependencies that can be further adapted to broader conditions.

Let us consider the construction of a generalized model that allows calculating the matrix of passenger correspondences taking into account the time limits for the validity of travel privileges.

The model parameters are presented in Table 1.

Table 1 – Model parameters

<i>No.</i>	<i>Designation parameter</i>	<i>Parameter name</i>	<i>Unit measurement parameter</i>
Model input parameters			
1	$n_{\pi}$	Number of passengers in preferential categories traveling within the transport network	Persons
2	$p$	Statistical constant reflecting the ability of persons from privileged categories to travel for a fee in the transport network	–
3	$t_0$	Time of entry of vehicles onto the transport network route	Time units
4	$t_{\kappa}$	Time of return of vehicles to the depot (end of route)	Time units
5	$t_{\pi 1}$	Start time of free travel for preferential categories of passengers traveling in a given transport network	Time units
6	$t_{\pi 2}$	Expiration time of free travel for preferential categories of passengers traveling in a given transport network	Time units
7	$[t_1; t_2]$	The time period over which the correspondence matrix is calculated	Time units
8	$t$	Current time	Time units
Intermediate model parameters			
9	$c_{ij1}$	Gravity coefficient taking into account passengers of preferential categories during paid travel	–
10	$c_{ij2}$	Attraction coefficient taking into account passengers of preferential categories during free travel	–
11	$\Theta_1$	Percentage coefficient of finding the time period on which the calculation is made in paid parts of the day	–
12	$\Theta_2$	Percentage of finding the time period on which the calculation is made in free parts of the day	–

In modern conditions, society is increasingly faced with the influence of various external factors that significantly change the usual rhythm of life. One of such factors is the epidemiological situation, which can lead to restrictions on the activities of certain areas of social functioning, in particular, transport. In such conditions, optimization of transport connections and management of passenger flows becomes of particular importance. One of the most relevant restrictions that affect the formation of transport demand is the limitation of the duration of travel privileges for certain categories of passengers.

Such restrictions lead to a change in the nature of movement of preferential categories of citizens, causing uneven load on the transport system at different times of the day. In this regard, traditional approaches to the formation of correspondence matrices – one of the main tools of transport modeling – need to be adapted and improved. In particular, it is advisable to introduce a variable attraction coefficient, which depends on the presence or absence of privileges in a specific period of time. This will allow for a more accurate account of the change in demand due to time restrictions on free travel.

Let  $t_0$  and  $t_k$  denote the start and end times of the public transport route, respectively. In this case, the time interval from  $t_{11}$  to  $t_{12}$  denotes the range of validity of the preferential travel – that is, the period during which passengers of preferential categories have the right to free travel. It is obvious that if the moment of the trip does not fall into this interval, the probability of the trip for the beneficiary decreases, which must be reflected in the model by means of an appropriate adjustment of the attraction coefficients in the correspondence matrix.

Let's create a system:

$$\begin{cases} c_{ij1} = \frac{n_{\pi}}{D_j} \cdot p + \frac{D_j - n_{\pi}}{D_j} \cdot (t_{\pi}^{-1} \cdot s^{-1}), \text{ якщо } \begin{cases} t1; t2 \leq t_{\pi1} \\ t \geq t_{\pi2} \end{cases}; & (1) \\ c_{ij2} = \frac{n_{\pi}}{D_j} \cdot (t_{\pi}^{-1}) + \frac{D_j - n_{\pi}}{D_j} \cdot (t_{\pi}^{-1} \cdot s^{-1}), \text{ якщо } \begin{cases} t_{\pi1} \leq t1 \\ t2 \leq t_{\pi2} \end{cases}. & (2) \end{cases}$$

That is, during the period of the benefits, when travel for certain categories of passengers is free, the attraction coefficient  $c_{ij}$  between districts  $i$  and  $j$  for such passengers does not depend on the cost of the trip. During this period, only the spatial and temporal characteristics of the route remain decisive factors – distance, duration of the trip, frequency of transport, etc. At the same time, when a trip for preferential categories becomes paid, that is, it goes beyond the allowed free period – there is a decrease in the mobility of this group of passengers. In such cases, the attraction coefficient is no longer neutral, but has a conditionally constant weight, which can be denoted as a statistical constant  $p$ , which characterizes the willingness of passengers of preferential categories to make paid trips.

In other words, during the time of the benefit (for example, during off-peak hours of the day), the demand for trips from benefit holders remains high, while at other times of the day – in particular during rush hours or late at night – this demand decreases significantly. The reason for this is not only financial, but also a change in motives for travel – many benefit holders plan their trips taking into account the time of free travel.

In this regard, for the correct calculation of the correspondence matrix with the participation of passengers of preferential categories, it is necessary to take into account the time limits of the validity or absence of privileges. That is, it is necessary to know exactly for what period of time the matrix is calculated, as well as what proportion of this interval falls on periods of free or paid travel. Otherwise, the model will lose its adequacy and will not be able to correctly reflect the real behavior of passengers, which will lead to data distortion and errors in transport planning.

That is why the following variable parameters are introduced:

$\Theta_1$  – shows the part of the time period that is in the paid part of the day,

$\Theta_2$  – shows the part of the time period that lies in the free part of the day.

Let us consider all possible options for calculating the variables  $\Theta_1$  and  $\Theta_2$ .

Under the condition  $t_1, t_2, t_{\pi1}, t_{\pi2} \in [t_0; t_k]$  then we will compose the systems.

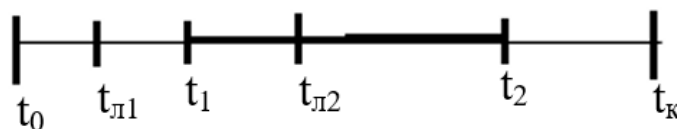


Figure 1 – The first option for the mutual arrangement of time intervals travel benefits

When performing conditions:

$$\begin{cases} t_2 > t_{\pi 2} \\ t_1 > t_{\pi 1} \end{cases},$$

we get:

$$\Theta_1 = \frac{t_2 - t_{\pi 2}}{t_2 - t_1},$$

$$\Theta_2 = 1 - \Theta_1.$$



Figure 2 – Second option for the mutual arrangement of time intervals travel benefits

When performing conditions (Fig. 2):

$$\begin{cases} t_2 < t_{\pi 2} \\ t_1 < t_{\pi 1} \end{cases},$$

we get:

$$\Theta_1 = \frac{t_{\pi 1} - t_1}{t_2 - t_1},$$

$$\Theta_2 = 1 - \Theta_1.$$

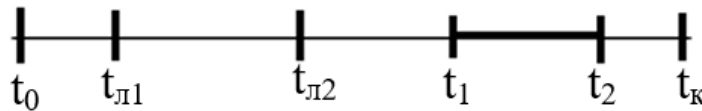


Figure 3 – Third option for the mutual arrangement of time intervals travel benefits

When performing conditions (Fig. 3):

$$\begin{cases} t_2 > t_{\pi 2} \\ t_1 > t_{\pi 1} \end{cases},$$

we get:

$$\Theta_1 = 1,$$

$$\Theta_2 = 0.$$

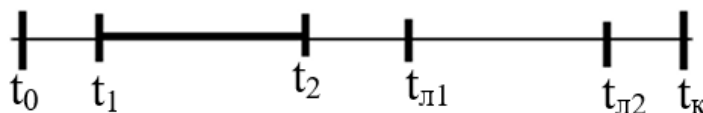


Figure 4 – Fourth option for the mutual arrangement of time intervals travel benefits

When performing conditions (Fig. 4):

$$\begin{cases} t_2 < t_{\pi 1} \\ t_1 < t_{\pi 1} \end{cases},$$

we get:

$$\Theta_1 = 1,$$

$$\Theta_2 = 0.$$

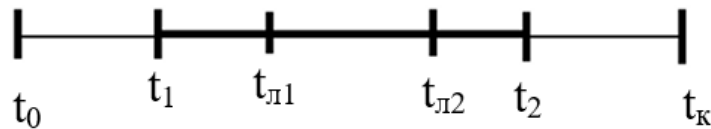


Figure 5 – Fifth option for the mutual arrangement of time intervals travel benefits

When performing conditions (Fig. 5):

$$\begin{cases} t_2 > t_{\pi 2} \\ t_1 < t_{\pi 1} \end{cases},$$

we get:

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \frac{t_{\pi 1} - t_1}{t_2 - t_1} + \frac{t_2 - t_{\pi 2}}{t_2 - t_1}, \\ \Theta_2 &= 1 - \Theta_1. \end{aligned}$$

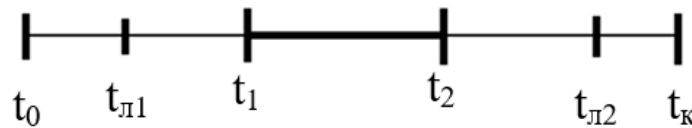


Figure 6 – The sixth option for the mutual arrangement of time intervals travel benefits

When performing conditions (Fig. 6):

$$\begin{cases} t_2 < t_{\pi 2} \\ t_1 > t_{\pi 1} \end{cases},$$

we get:

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= 0, \\ \Theta_2 &= 1. \end{aligned}$$

Then the final formula for calculating the gravity coefficient is in case of limiting the validity period of travel benefits will be found using the expression:

$$c_{ij} = \Theta_1 \cdot c_{ij1} + \Theta_2 \cdot c_{ij2}, \tag{4}$$

where:  $c_{ij1}$  is calculated by formula ( 1 ),  $c_{ij2}$  by formula (2) .

Then, considering

$$\begin{aligned} c_{ij} &= \Theta_1 \cdot \left( \frac{n_{\pi}}{D_j} \cdot p + \frac{D_j - n_{\pi}}{D_j} \cdot (t_{\pi}^{-1} \cdot s^{-1}) \right) + \\ &+ \Theta_2 \cdot \left( \frac{n_{\pi}}{D_j} \cdot (t_{\pi}^{-1}) + \frac{D_j - n_{\pi}}{D_j} \cdot (t_{\pi}^{-1} \cdot s^{-1}) \right). \end{aligned} \tag{5}$$

**Conclusions.**

1. Thus, the paper proposes a model for calculating passenger correspondence matrices that considers time restrictions on travel privileges. Such solutions will provide more accurate forecasting of passenger flows and more efficient use of limited transport network resources, considering the decrease in demand for certain routes and the limited number of available carriers. The model allows you to optimize the frequency of flights by changing the intervals between trips, as well as redistribute passenger flows between different routes, which allows you to maintain a high level of service under conditions of reduced transportation.

2. Taking into account the time limits of travel benefits in the process of constructing correspondence matrices is an important stage in improving transport modeling. This allows for a more accurate reflection of the real conditions of passenger flow, taking into account social factors

and changes in the demand structure. The development and implementation of new models taking into account such restrictions contributes to increasing the accuracy of forecasting, optimizing transport planning, as well as a more rational allocation of resources. This approach ensures not only the economic efficiency of transportation, but also contributes to the formation of a more fair and adaptive transport policy focused on the needs of different categories of the population.

**Prospects for further research.** Further research consists in expanding the proposed model by including additional socio-demographic parameters of passengers, as well as taking into account seasonal and daily fluctuations in demand. It is advisable to investigate the possibility of integrating the model with real-time operational monitoring systems of passenger flows for adaptive management of the route network. Special attention should be paid to the development of algorithms for automatic adjustment of travel intervals based on predicted changes in the structure of preferential transportation. Further research may focus on a comparative analysis of the effectiveness of the model in conditions of different types of urban transport systems.

## REFERENCES

1. Bilous, A. B., Demchuk, I. A. (2014). Analiz metodiv ta modelei rozrakhunku obsiahu pasazhyrskykh korespondentsii. *Shkidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*. № 3(3). P. 53–57.
2. Horbachov, P. F., Liubyi, Ye. V., Kovtsur, K. H., Tsyn, S. (2024). Shchodo pytannia modeliuвання elementiv matryts korespondentsii v ramkakh intervalnoi kontseptsii formuvannia modelei transportnoho popytu. Napriamky rozvytku tekhnolohichnykh system i lohistyky v APV. Materialy V-yi Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi internet-konferentsii (23 travnia 2024). Kharkiv: DBTU. P. 48–49.
3. Liubyi, Ye., Kovtsur, K., Tsyn, S. (2024). Postanovka zadachi vypadkovoho zapovnennia matrytsi pasazhyrskykh korespondentsii. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*. № 2(23). P. 152–158.
4. Liubyi, Ye. V., Koliy, O. S. (2019). Otsinka tochnosti syntetychnykh modelei rozrakhunku pasazhyrskykh korespondentsii na prykladi malykh mist. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*. № 1. P. 98–106.
5. Ponkratov, D. P., Faletska, H. I. (2015). Vybir pasazhyramy shliakhiv peresuvannia v mistakh : monohrafiia. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova. 164 p.
6. Slavych, V. P., Hirik, D. O. (2019). Model optymizatsii chasu perebuvannia hromadskoho transportu na zupynkakh. *Visnyk KhNTU*. № 2(69). P. 187–191.
7. Slavych, V. P., Livandovskiy, V. S. (2021). Model systemy upravlinnia pishokhidnym potokom mista. *Visnyk KhNTU*. № 2(77). P. 47–51.
8. Slavych, V. P., Marchuk, N. V. (2023). Model vyznachennia pasazhyrskykh korespondentsii m. Kherson v umovakh zmeshennia kilkosti pereviznykiv. *Synerhiia nauky i biznesu u povoiennomu vidnovlenni Khersonshchyny : materialy Mizhnarodnoi nauk.-prakt. konf. Odesa*, P. 316–318.
9. Chyzhyk, V. M. (2019). Rozrobka analitychnykh modelei vyznachennia chasu ochikuvannia pasazhyramy marshrutnoho transportu v mistakh : avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.22.01. Kharkiv. 20 p.
10. Ding Luo, Oded Cats, Hans van Lint, Graham Currie. (2019). Integrating network science and public transport accessibility analysis for comparative assessment. *Journal of Transport Geography*. Vol. 80. 102505.
11. Chen, E., Ye, Z., Wang, C., Xu, M. (2020). Subway passenger flow prediction for special events using smart card data. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Vol. 21, No 3. P. 1109–1120.
12. Greta Galliani, Piercesare Secchi, Francesca Ieva (2024). Estimation of dynamic Origin–Destination matrices in a railway transportation network integrating ticket sales and passenger count data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 190. 104246.

13. Konstantinos Gkiotsalitis, Oded Cats (2022). Optimal frequency setting of metro services in the age of COVID-19 distancing measures. *Transportmetrica A: Transport Science*. Vol. 18, No 3. P. 807–827.

14. Wang, L.-N., Wang, K., Shen, J.-L. (2020). Weighted complex networks in urban public transportation: Modeling and testing. *Physica A: Stat. Mech.* Vol. 545. 123498.

15. Tina Šfiligoj, Aljoša Peperko, Patricija Bajec, Oded Cats (2025). Node importance corresponds to passenger demand in public transport networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 659. 130354.

**Славич В. П. МОДЕЛЬ ТА МЕТОД РОЗРАХУНКУ МАТРИЦЬ КОРЕСПОНДЕНЦІЙ З УРАХУВАННЯМ ЧАСОВИХ ОБМЕЖЕНЬ ДІЇ ПРОЇЗНИХ ПІЛЬГ**

У роботі запропоновано вдосконалену модель розрахунку матриць пасажирських кореспонденцій, що враховує часові обмеження дії проїзних пільг. Актуальність дослідження зумовлена потребою адаптації транспортного планування до соціальних змін та зменшення пасажиропотоку в умовах обмеженого фінансування. Традиційні підходи не враховують вплив змін у часі дії пільг, що призводить до викривлення результатів моделювання та неефективного використання ресурсів. Запропонована модель враховує часову доступність пільг і дозволяє розраховувати коефіцієнти тяжіння між транспортними районами з урахуванням періодів платного та безкоштовного проїзду. Особливу увагу приділено аналізу динаміки поїздок осіб пільгових категорій у різні години доби, що дозволяє коректно врахувати пікові та міжпікові навантаження. Введені параметри дозволяють розраховувати частку часу, що припадає на кожен тип проїзду, та комбінувати відповідні коефіцієнти тяжіння. Таким чином, модель відображає зміну мобільності пільгових категорій пасажирів залежно від часу доби, що особливо важливо для міст із високою часткою таких пасажирів. Розроблений підхід також дає змогу оцінити потенційні зміни пасажиропотоків при коригуванні часових меж дії пільг, що може бути корисним для органів управління транспорту. У роботі розглянуто різні варіанти взаємного розташування інтервалів часу дії пільг та розрахунку відповідних вагових коефіцієнтів. Отримані результати дозволяють формувати більш точні та гнучкі матриці кореспонденцій, що враховують соціальну політику у сфері перевезень, зменшення попиту та нерівномірність навантаження на транспортну мережу. Запропонована модель може бути використана для оптимізації розкладів руху автобусів у години з підвищеним попитом серед пільгових категорій (наприклад, ранкові години для пенсіонерів), для прогнозування змін навантаження на маршрути у разі корекції політики пільгового проїзду (наприклад, скасування пільг у пікові години або введення обмежень у вихідні дні), а також для аналізу ефективності використання муніципальних субсидій на перевезення у різний час доби та дні тижня. Модель також дозволяє обґрунтувати необхідність запуску додаткових рейсів або змінити маршрути з урахуванням змін у поведінці пільгових пасажирів, що сприятиме більш збалансованому навантаженню на транспортну мережу. Вона може бути корисною при формуванні соціально орієнтованої тарифної політики, яка враховує час доби та категорії пасажирів, забезпечуючи більш раціональне використання ресурсів. Крім того, модель може бути інтегрована в наявні інформаційні системи транспортного моделювання для автоматизованого врахування пільгових факторів.

**Ключові слова:** пасажирські перевезення; матриця кореспонденцій; маршрутні перевезення; пільговий проїзд; транспортне моделювання; пасажиропотік; часові обмеження; коефіцієнт тяжіння; громадський транспорт; динаміка поїздок; планування перевезень.

© Slavych V. P.

Статтю прийнято до редакції 19.05.2025

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ТА ІМІТАЦІЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ДЛЯ АВТОНОМНОГО СУДНА З ОЦІНКОЮ СТАБІЛЬНОСТІ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ

**Бурлаченко Д. А.**, старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: brlda.onmi@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3749-4908;

**Мельник О. М.**, д.т.н., професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: m.onmi@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9228-8459.

*У статті досліджено поведінку морського автономного судна (МАС) в умовах виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних із втратою керування, впливом поривчастого вітру та відмовою рульового приводу. Доведено, що дослідження аварійної поведінки морських автономних суден набуває практичного значення та підіймає проблеми безпечної застосування її енергоефективності навігаційного переходу в автономному режимі. Застосовано спрощену математичну модель динаміки руху судна в горизонтальній площині на основі рівнянь Ньютона-Ейлера з урахуванням простих рішень в умовах дії гідродинамічних, аеродинамічних та стохастичних впливів. Показано, що існує дефіцит моделей, здатних не лише відтворювати поведінку автономних суден при блокуванні рульового приводу, зникненні керуючих сигналів чи дії неочікуваних збурень, а і прогнозувати наслідки. Імітація проведена у MATLAB/Simulink із реалізацією основних аварійних сценаріїв. Результати симуляцій дозволили оцінити стабільність траєкторії руху судна та ефективність наявних стратегій керування судном. Отримані дані є основою для подальшого створення алгоритмів автоматичного аварійного реагування на позаштатні ситуації під час виконання автономних навігаційних місій.*

**Ключові слова:** автономне судно; аварійна ситуація; симуляція; курсова стабілізація; втрати керування; морське середовище; процес керування; математичне моделювання; гідродинаміка; стохастичні збурення.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.195-208**

**Вступ.** Зростання автономності сучасного морського флоту супроводжується потребою у розробці надійних моделей реагування автономних суден на нестандартні та критичні ситуації. Традиційні системи навігаційного керування орієнтовані на передбачувані умови й не завжди здатні забезпечити сталість траєкторії руху у разі втрати зв'язку з центром управління, відмови виконавчих органів або різких змін зовнішніх збурень. У цих умовах надзвичайно важливо не лише виявляти критичні режими руху, а й заздалегідь оцінювати можливу динаміку судна при порушеннях процесів керування. Тому дослідження аварійної поведінки морського автономного судна (МАС) набуває практичного значення як з погляду безпеки, так і енергоефективності автономного навігаційного переходу.

**Постановка проблеми, аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні, не існує єдиного, повністю сформованого та ратифікованого міжнародного кодексу або конвенції, що регулює всі особливості не лише експлуатації морських автономних суден, а їх побудови. Це зумовлено тим, що технології (інформаційні, керуючі, енергетика, зв'язок, матеріали тощо) розвиваються надзвичайно швидко, і міжнародне морське право просто не встигає за ними. Однак, є низка основних документів, які формують основу для функціонування і побудови основних нормативних вимог до майбутніх і існуючих МАС.

Міжнародна морська організація (ІМО) є ключовим гравцем у розробці міжнародних норм для функціонування МАС. Вони активно працюють над цим питанням. Наведемо основні напрямки роботи ІМО за цією проблемою.

Regulatory Scoping Exercise (RSE). ІМО провела масштабну «регуляторну оцінку» (Regulatory Scoping Exercise) існуючих міжнародних документів (таких як SOLAS, MARPOL, STCW, COLREGs тощо) для визначення, які з них застосовні до МАС, які з них потребують поправок, а які взагалі не охоплюють нові виклики.

Розробка Кодексу MASS (MASS Code). Наразі ІМО активно працює над розробкою міжнародного, заснованого на цілях (goal-based), обов'язкового Кодексу для МАС. Очікується, що цей кодекс стане всеосяжним документом, який регулюватиме проектування, будівництво, експлуатацію, навчання персоналу, відповідальність та інші аспекти МАС. У червні 2025 року (зараз) ІМО організовує Симпозіум щодо МАС та Кодексу MASS, що свідчить про активну фазу цієї роботи.

Ступені автономності. ІМО визначила чотири ступені автономності, що є важливою передумовою для регулювання законодавства, визначення вимог до функціонування і побудови МАС. Це наступні ступені.

Ступінь 1. Судно з автоматизованими процесами та підтримкою прийняття рішень. Моряки на борту керують системами, деякі операції можуть бути автоматизовані, але екіпаж готовий взяти контроль над судном.

Ступінь 2. Дистанційно кероване судно з моряками на борту. Судно керується з іншого місця, але екіпаж на борту готовий для взяття повного контролю.

Ступінь 3. Дистанційно кероване судно без моряків на борту. Судно керується з іншого місця, екіпажу на борту немає.

Ступінь 4. Повністю автономне судно. Операційна система судна (інтелектуальна) здатна самостійно приймати рішення та визначати дії.

Відзначимо, що: а) ІМО вже видала деякі тимчасові рекомендації та керівництва, що стосуються проведення випробувань МАС. Вони наголошують на забезпеченні щонайменше такого ж рівня безпеки, захисту навколишнього середовища та кібербезпеки, як і для звичайних суден; б) позиція ІМО є фундаментальною, оскільки ця організація є глобальним регулятором морського судноплавства. Їхня робота ляже в основу майбутнього міжнародного правового поля для МАС. Відсутність повного кодексу на цей момент створює «сіру зону», що вимагає індивідуального підходу та тимчасових рішень.

Національне законодавство та «регуляторні пісочниці». Деякі країни, що є лідерами у розробці МАС (наприклад, Норвегія, Фінляндія, Японія, Південна Корея), вже почали розробляти власні національні законодавчі акти та створювати «регуляторні пісочниці». Це дозволяє тестувати та експлуатувати МАС у контрольованих умовах, збираючи дані та досвід для майбутніх міжнародних норм. Ці національні ініціативи є важливими «випробувальними/дослідними майданчиками», які допомагають виявити практичні проблеми та потенційні ризики, а також розробити ефективні рішення, які можуть бути потім інтегровані в міжнародні стандарти.

Правила класифікаційних товариств. Провідні класифікаційні товариства, такі як DNV, Lloyd's Register, ABS, Bureau Veritas, RINA, активно розробляють власні правила та рекомендації для проектування, будівництва та класифікації МАС. Вони пропонують «нотації класу» або «додаткові позначки» для суден з різними рівнями автономності. Класифікаційні товариства відіграють критично важливу роль у забезпеченні безпеки суден. Їхні правила є фактично технічними стандартами, які доповнюють міжнародні конвенції. Вони заповнюють прогалини, що виникають через відсутність повної міжнародної нормативної бази, надаючи рамки для сертифікації та технічної відповідності МАС.

Конвенція ООН із морського права (UNCLOS) та інші міжнародні конвенції. Попри відсутність конкретних положень про МАС, UNCLOS встановлює основоположні принципи морського права, які застосовуються до всіх суден, включаючи МАС. Наприклад, обов'язок «підкорятися капітану та офіцерам, які мають відповідну кваліфікацію», що є викликом для повністю автономних суден (Ступінь 4). Інші міжнародні конвенції, такі як SOLAS (безпека життя на морі), MARPOL (запобігання забрудненню), STCW (стандарти підготовки та дипломування моряків), COLREGs (правила запобігання зіткненням суден у морі), зараз проходять ретельний аналіз ІМО для адаптації їхніх положень до МАС.

Хоча наявні конвенції розроблені для традиційних суден з екіпажем, їхні базові принципи, такі як безпека судноплавства, захист навколишнього середовища, обов'язки суден у разі лиха, аварій залишаються актуальними. Однак, їх застосування до МАС вимагає

переосмислення та поправок, оскільки поняття «капітана на борту» або «екіпажу» стає розмитим.

Українське законодавство. Щодо України, то на сьогодні, спеціальний закон чи нормативний акт, який всебічно регулює морські автономні судна, відсутній. Чинне українське законодавство в морській галузі (Кодекс торговельного мореплавства, правила Регістру судноплавства України тощо) здебільшого орієнтоване на судна з екіпажем. Це є очікуваним, враховуючи, що Україна, як і більшість країн світу, чекає на консолідовані міжнародні стандарти від ІМО. До того часу, будь-які кроки щодо МАС в Україні, ймовірно, будуть базуватися на тимчасових дозволах або адаптації чинних норм, а також на принципах кращої міжнародної практики. Регістр судноплавства України, як і інші класифікаційні товариства, вже має «Правила класифікації та побудови морських суден», які регулярно оновлюються з урахуванням міжнародних змін, але конкретних розділів, присвячених повністю автономним суднам 3 та 4 ступеня, поки що немає.

Таким чином, нормативні вимоги до морських автономних суден перебувають у стадії активного формування. Це складний і багатогранний процес, що включає: а) міжнародні зусилля ІМО з розробки всеосяжного Кодексу MASS; б) національні ініціативи деяких країн, що слугують «полігонами» для тестування; в) діяльність класифікаційних товариств, які розробляють технічні стандарти; г) необхідність адаптації чинних міжнародних конвенцій. Відзначимо, що це перехідний період. Основний виклик полягає у забезпеченні безпеки (включно з кібербезпекою), визначенні відповідальності у разі інцидентів, а також у підготовці майбутніх фахівців, які зможуть працювати з цими передовими технологіями, адже навіть для повністю автономних суден потрібні будуть кваліфіковані оператори з дистанційних центрів керування. Майбутнє за автономією, але шлях до повного впровадження ще вимагає значної роботи над законодавчим та нормативним підґрунтям.

У дослідженні розглядаються різні сучасні джерела з акцентом на ключові елементи моделювання, навігації та керування автономними морськими суднами. Дослідження [1–3] зосереджені на моделях підтримки курсу та стабілізації руху судна з використанням методів внутрішнього моделювання у реальному часі, оптимальної (за визначеними критеріями) маршрутизації та навчання з підкріпленням.

Джерела [4–6] досліджують інтелектуальні та нейромережеві методи керування підводними апаратами, зокрема, з використанням нечіткої логіки та робастних стратегій в умовах невизначеності. Публікації [7–9] досліджують системи з адаптивними контролерами та надають критичні оцінки морських систем, тоді як [10–12] зосереджуються на технологіях супутникової навігації, системах утримання курсу та інструментах дистанційного керування, спрямованих на підвищення безпеки судноплавства.

Роботи [13–18] заглиблюються в технічні аспекти, пов'язані з машинним навчанням інтелектуальних систем управління електроприводами рушіїв, систем зв'язку та протидії безпілотним технологіям, підкреслюючи багатогранність та міждисциплінарний характер предмета дослідження. У [19] розглянуто основні небезпеки при використанні автономних суден. Методологія якісної оцінки ризиків для морських автономних надводних суден розглянуто у роботі [20], де проведено функціональний аналіз на основі когнітивної моделі та ідентифікація небезпек.

У роботах [21, 22] проведено ретельний аналіз ризиків, що виникають внаслідок використання автономних суден, наведена оцінка ризиків автономної навігаційної системи для морського автономного надводного корабля.

Проблеми запобігання зіткненням для морських автономних надводних суден на основі модельного прогнозного керування з використанням даних про наміри та кватерніонної області судна наведені у [23]. Загальний огляд морських автономних надводних суден, орієнтований на взаємодію з людиною, наведений у [24], де проаналізовано вплив та реакції людини, майбутні напрямки удосконалення взаємодії МАС та людини.

У роботі [25] аналізуються різні типи морських автономних надводних суден, піднято проблеми поширення відомих інцидентів з безпілотними літальними апаратами, використовуючи модель перцептивного циклу, на МАС. У [26] розглянуто відомі напади та атаки на комерційні морські автономні надводні кораблі в морі, наведено міри, які необхідно передбачити при проєктуванні й експлуатації МАС.

У статтях [27–29] розглянуто міжнародно-правові аспекти експлуатації автономного морського судна, проблеми та виклики, що постають перед процесом регулювання МАС, проблеми та розвиток у державному управлінні автономним судноплавством.

Опрацьовані джерела підтверджують актуальність і важливість моделювання динаміки автономних суден у реалістичних умовах морського середовища, необхідність урахуванням вітрових, гідродинамічних та стохастичних збурень.

Проведений аналіз дозволяє обґрунтувати вибір логіки дослідження, а також демонструє, що розроблені моделі повинні поєднувати сучасні тенденції в області автономного морського транспорту, адаптивне керування, симуляційне моделювання, урахувати стохастичні впливи, цифрове тестування систем стабілізації (наприклад, курсу).

Серед робіт, що торкаються питань аварійної поведінки або нестандартних ситуацій, переважають теоретичні підходи, орієнтовані на аналіз стійкості або компенсацію часткових збурень (наприклад, вітер або хвилювання), без урахування системної відмови в керуванні (частково-інваріантні до збурень системи). Натомість сучасні вимоги до автономного морського транспорту передбачають наявність резервних алгоритмів реагування на кризові ситуації, таких, як відмова керма чи втрата навігаційного сигналу. Саме ця прогалина і визначає актуальність створення імітаційної моделі, яка дозволяє не лише виявити слабкі місця в наявних алгоритмах, але й верифікувати траєкторну стійкість автономного судна в умовах аварій.

Але, попри значну кількість досліджень, присвячених стабілізації курсу автономних надводних апаратів, переважна більшість моделей не враховують можливості технічних відмов чи втрати контролю в ході автономного руху. Існує дефіцит моделей, здатних відтворювати поведінку МАС при блокуванні рульового приводу, зникненні керуючих сигналів чи дії неочікуваних збурень (наприклад, поривів вітру). Брак таких симуляцій ускладнює перевірку стійкості базових алгоритмів керування та не дозволяє адаптувати наявні навігаційні системи до потенційно критичних умов експлуатації.

**Метою дослідження** є розробка симуляційної моделі поведінки автономного морського судна при виникненні надзвичайних ситуацій, зокрема, при відмові рульового керування, втраті зворотного зв'язку та впливі поривчастого вітру, і на її основі оцінити стабільність траєкторії та динамічні властивості судна в умовах стохастичних збурень.

Уперше запропоновано симуляційний сценарій аварійних режимів МАС із варіативними конфігураціями відмов навігаційних елементів. Запропоновано підхід до імітації критичних станів із фіксацією параметрів руху у разі втрати керування, що дозволяє формувати базу для подальшої розробки антикризових протоколів. Розширено класичну модель PID-алгоритмів регулювання через впровадження функціоналу «заморожування» виконавчих органів, а також урахування змін навантажень і поперечної швидкості у порівнянні з номінальними режимами. Представлений підхід відкриває можливості для створення резервних контурів автономного керування за допомогою, наприклад, цифрових двійників суден.

**Виклад основного матеріалу.** Для опису динаміки автономного морського судна в горизонтальній площині використано відому систему рівнянь Ньютона-Ейлера. Судно розглядається як тверде тіло, на яке діють сукупні сили та моменти з боку гідродинаміки, аеродинаміки, течій, хвиль і системи керування.

Рух описується в локальній системі координат МАС, яка обертається відносно земної (інерційної):

$$\begin{aligned}
 m \frac{dv}{dt} &= Y_H + Y_W + Y_C + Y_{wav} + T, \\
 m \frac{dv}{dt} &= Y_H + Y_W + Y_C + Y_{wav}, \\
 I_z \frac{d\psi}{dt} &= N_H + N_W + N_C + N_{wav},
 \end{aligned} \tag{1}$$

де  $u, v$  – подовжна і поперечна швидкості судна;  $\psi$  – курс;  $m, I_z$  – маса і момент інерції судна;  $T$  – тяга;  $X_i, Y_i, N_i$  – компоненти сил і моментів відповідно до джерел впливу ( $H$  – гідродинаміка,  $W$  – вітер,  $C$  – течії,  $wav$  – хвилювання).

Гідродинамічні сили визначені, як функції швидкості:

$$X_H = -\rho C_x A u |u|, \quad Y_H = -\rho C_y A v |v|. \tag{2}$$

$$N_H = -\rho C_n A v |v| L. \tag{3}$$

Аеродинамічні (вітрові) впливи визначаються за наступними виразами:

$$\begin{aligned}
 X_W &= \frac{1}{2} \rho_a C_D A_W V_W^2 \cos(\beta - \psi) \\
 Y_W &= \frac{1}{2} \rho_a C_L A_W V_W^2 \sin(\beta - \psi), \\
 N_W &= \frac{1}{2} \rho_a C_M A_W V_W^2 L_W \sin(\beta - \psi)
 \end{aligned} \tag{4}$$

а стохастичний вплив вітру моделюється як гаусівський процес:

$$V_W(t) = V_{W0} + \sigma_W W(t) \tag{5}$$

Базове управління курсом здійснюється за допомогою PID-регулятора, який формує керуючий сигнал для рульового пристрою:

$$\delta(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad e(t) = \psi_d(t) - \psi(t), \tag{6}$$

де  $\delta(t)$  – кут відхилення керма,  $\psi_d(t)$  – задане значення курсу,  $K_P, K_I, K_D$  – коефіцієнти регулятора,  $e(t) = \psi_d - \psi(t)$  – помилка курсу.

Розглянемо наступні аварійні сценарії МАС.

*Сценарій 1* – відмова керма. При імітації відмови рульового керування кут керма фіксується на певному значенні або обнуляється:

$$\delta(t) = \delta_{fail} = \text{const}. \tag{7}$$

У моделі це реалізується блокуванням сигналу від PID-регулятора.

*Сценарій 2* – втрата зв'язку. У випадку втрати зв'язку сигнал керування взагалі не надходить або має затримку, тобто:

$$\delta(t) = 0 \quad \text{або} \quad \delta(t) = \delta(t - \Delta t). \tag{8}$$

Дивлячись на (8), бачимо, що при втраті зв'язку сигнал моделюється, як обнуління або затримка керуючого впливу.

*Сценарій 3* – раптовий боковий вітер (порив). Модель пориву реалізується як стохастичний доданий, із відповідною розмірністю, імпульс:

$$V_W(t) = V_{W0} + A_{burst} \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2\right), \tag{9}$$

де  $A_{burst}$  – амплітуда пориву,  $\tau$  – тривалість,  $t_0$  – час виникнення.

Узагальнення для симуляції полягає у тому, що всі сили, моменти та стан системи збираються у векторному вигляді для моделювання у MATLAB/Simulink:

$$M \cdot \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{F}_{\text{sum}}(\mathbf{v}, t), \quad \mathbf{v} = [u \ v \ \psi], \quad (10)$$

де  $M$  – масово-інерційна матриця,  $\mathbf{F}_{\text{sum}}$  – вектор сумарних сил і моментів, які включають описані аварійні сценарії.

#### Алгоритмічна реалізація моделі та сценарний аналіз

Для перевірки поведінки МАС при дії пориву вітру та контролі курсу з використанням PID-регулятора проведено чисельне моделювання. Використано дискретний час із фіксованим кроком інтегрування  $\Delta t = 0,1$  с, що дозволяє визначати зміну стану системи з урахуванням гідродинамічних та аеродинамічних сил. У програмному коді реалізовано базову конфігурацію параметрів судна, PID-регулятор з обчисленням похибки курсу, імпульсний боковий вітер (як збурення) та обчислення сил та оновлення стану системи в часі.

Для оцінки поведінки МАС в умовах надзвичайних ситуацій проведено чисельне моделювання трьох наведених характерних сценаріїв: а) повна відмова рульового керування, б) втрата зв'язку з навігаційною системою, в) вплив раптового пориву вітру. В усіх випадках оцінювалось відхилення курсу судна від бажаної траєкторії.

#### Сценарій 1 – Відмова керма

Кермо судна блокується у нульовому положенні  $\delta(t) = 0$ , що унеможливує поворот і стабілізацію курсу. Метою є визначення того, як сильно МАС буде відхилитися при боковому збуренні (порив вітру).

На графіку (див. рис. 1) видно, як під дією імпульсного вітру судно поступово змінює курс. Відсутність реакції системи керування призводить до стійкого дрейфу.

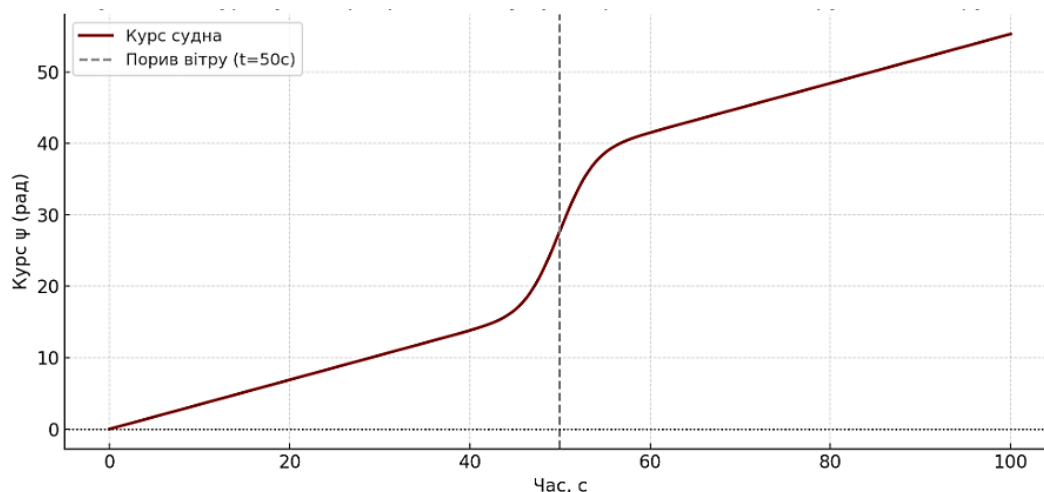


Рисунок 1 – Курс судна при фіксованому куті керма  $\delta = 0$  (відмова рульового керування)

Графік демонструє поведінку МАС при повній відмові рульового керування. З моменту пориву вітру (позначено сірою пунктирною лінією на момент часу  $t = 50$  с), курс починає монотонно відхилитися, оскільки система не має можливості компенсувати зовнішнє збурення. Це є найбільш критичним випадком, коли навіть при невеликому збуренні виникає неконтрольований дрейф.

Таким чином при блокуванні або заклинюванні рульового механізму МАС, що безумовно, не здатне змінити напрямок руху. У моделі це реалізовано шляхом фіксації кута керма  $\delta(t) = 0$ . Результати симуляції показують стійке й неконтрольоване відхилення курсу внаслідок вітрових поривів. Такий сценарій є найгірший, оскільки судно втрачає здатність до навігаційної компенсації, але напрямок можна спрогнозувати.

*Сценарій 2 – Затримка сигналу*

Сигнал керування надходить із запізненням  $\delta(t) = \delta(t - \Delta t)$ , що моделює втрату стійкого з'єднання з навігаційною системою. Метою є оцінка того, як затримка сигналу впливає на здатність утримання курсу при збуреннях. На графіку (рис. 2) показано осциляції навколо заданого курсу. Через запізнення регулятор не встигає реагувати в реальному часі, виникає аперіодичний ефект (при інших умовах – навіть пере регулювання).

У розглянутому випадку керуючий сигнал від PID-регулятора надходить із затримкою  $\Delta t = 2$  с, що імітує втрату зв'язку з навігаційною системою або часове відставання сигналів датчиків.

Інколи (не наведено у статті) це може призводити до появи осциляцій курсу, які можуть спричинити навіть постійні коливання при змінному вітрі, проте судно все ще зможе зберігати здатність частково повертатись до бажаної траєкторії.

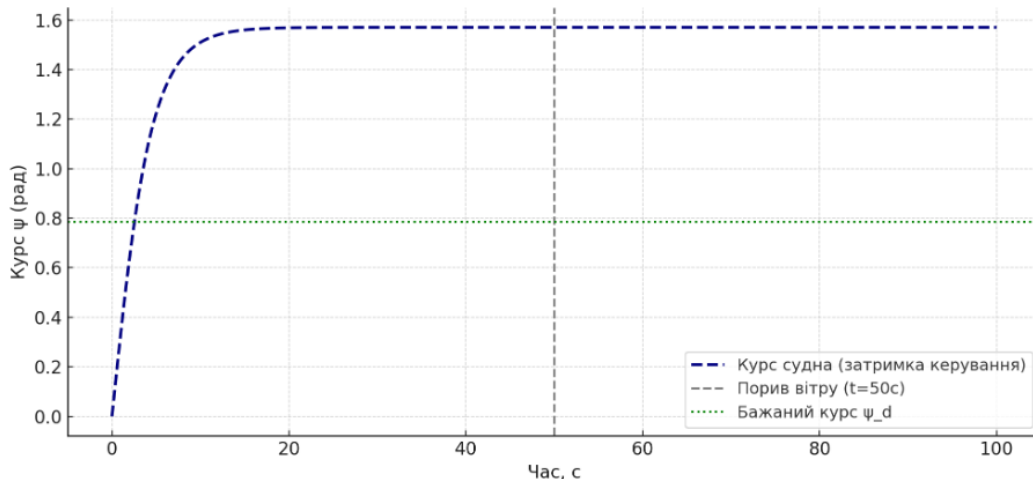


Рисунок 2 – Зміна курсу (приклад) при затримці керуючого сигналу ( $\Delta t = 2$  с)

В інших умовах, через затримку керуючого сигналу на більший час, судно не здатне одразу зреагувати на відхилення, що може призводити до появи статичного відхилення від бажаного напрямку руху. Така поведінка характерна для систем із запізненням, де існує ризик нестабільності при частих збуреннях і несподіваних затримках. Саме тому є необхідність у використанні особливих алгоритмів керування, зокрема – інтелектуальних.

*Сценарій 3 – Раптовий порив вітру з активним керуванням*

Вважаємо, що у момент часу  $t_0 = 50$  с, на судно діє сильний боковий порив вітру, змодельований як додаткова імпульсна функція. Необхідно оцінити здатність PID-регулятора повертати судно на бажаний курс. Результат моделювання показав, що попри різкому збуренні, регулятор, що налаштований на «модульний оптимум», компенсує відхилення і курс стабілізується через декілька секунд. Спостерігається незначне перерегулювання, однак воно швидко згасає, підтверджуючи часткову інваріантність до збурень алгоритмів керування. Порівняння сценаріїв дозволяє зробити висновок, що найкритичнішим є повна відмова рульового механізму (з прогнозуванням руху), тоді як за наявності навіть базової системи керування (PID) судно демонструє стійку поведінку. Затримка сигналу вказує на необхідність впровадження фаззі-нейро, нейромережного тощо керування.

Для побудови моделі руху використано відому систему рівнянь Ньютона-Ейлера, яка раніше була апробована для автономних суден у спокійних та збурених умовах [18]. У цьому дослідженні вона не змінюється, однак у рамках експериментів модифікується характер збурень та обмежується/вимикається керуючий сигнал. Це дозволяє вивчити динаміку траєкторії МАС в умовах критичних навігаційних сценаріїв.

**Методика дослідження та обговорення результатів.** Метою моделювання є оцінка сталості траєкторії автономного судна при впливі характерних аварійних ситуацій (збурень). Для цього реалізовано серію чисельних симуляцій у середовищі MATLAB з використанням

дискретного підходу до розв'язання рівнянь руху. Час інтегрування обрано як  $\Delta t = 0,1$  с, загальна тривалість модельного часу експерименту – 100 секунд.

Параметри судна (маса, момент інерції, гідродинамічні та аеродинамічні коефіцієнти) встановлювалися згідно типовим для малої автономної платформи. Аеродинамічне збурення моделювалося у вигляді стохастичного пориву вітру, який має імпульсну форму з піковим значенням у момент визначений момент часу.

У всіх протестованих сценаріях (повна відмова керма, сигнал керування фіксується на  $\delta = 0$ ; затримка сигналу, сигнал PID-регулятора надходить із запізненням  $\Delta t = 2$  с; номінальна робота PID-регулятора, активне компенсування збурення вітру) критерієм оцінки є динаміка зміни курсу  $\psi(t)$ , порівняння відхилення від бажаного курсу  $\psi_d$ , аналіз характеру процесу (аперіодичний, коливальний, резонанс) та здатність системи стабілізувати напрямок руху після збурення. Основні результати чисельного моделювання дозволяють здійснити порівняльний аналіз поведінки автономного судна за різних аварійних сценаріїв.

У першому, при фіксації куту керма  $\delta = 0$ , судно не здатне протидіяти вітровому збуренню, що призводить до постійного наростання відхилення курсу, апарат втрачає керованість. У другому сценарії, коли керуючий сигнал надходить із затримкою, курс МАС демонструє аперіодичний процес (при збільшенні часу затримки може переходити до коливання (у статті не наведено) навколо бажаного значення  $\psi_d$ , амплітуда цих осциляцій зростає після пориву вітру, однак система все ж зберігає часткову здатність до компенсації. Аналіз свідчить про потенційну нестійкість при частих збуреннях і необхідність покращення зворотного зв'язку, наприклад, за допомогою предиктивного фільтру). У третьому сценарії PID-регулятор забезпечує швидку реакцію на зміну зовнішніх умов. Після вітрового пориву курс судна відхиляється лише на короткий час і швидко стабілізується, що демонструє високу ефективність базового контролю. Такий підхід є прийнятним для забезпечення стабільної навігації в умовах обмежених збурень.

Таблиця 1 – Порівняння ефективності компенсації збурення у трьох аварійних сценаріях

№	Сценарій	Тип збурення	Реакція системи керування	Характер відхилення курсу	Оцінка ефективності
1	Відмова керма	Імпульсний вплив вітру	Відсутня (кермо зафіксоване)	Постійне відхилення (дрейф)	Незадовільно
2	Затримка сигналу	Імпульсний вплив вітру	Робота PID регулятора із запізненням $\Delta t$ сигналів	Можливі осциляції навколо $\psi_d$	Задовільно, ефективність низька
3	Активний PID-регулятор	Імпульсний вплив вітру	Нормальний режим, робота PID регулятора без суттєвих затримок	Швидке згасання відхилення, робастність	Задовільно

Отже, результати модельних експериментів підтверджують можливість і необхідність активного керування траєкторією МАС, критичну важливість коректної роботи системи керування для забезпечення безпеки автономного руху.

#### Висновки.

1. Показано, що переважна більшість моделей роботи МАС не враховують можливості технічних відмов чи втрати контролю в ході автономного руху, що існує дефіцит моделей, здатних відтворювати поведінку МАС при аваріях, що брак таких симуляцій ускладнює перевірку стійкості базових алгоритмів керування та не дозволяє адаптувати чинні навігаційні системи до потенційно критичних умов експлуатації. Також показано, що нормативна база щодо проектування та функціонування МАС зараз активно розвивається і нормується.

2. Проведене моделювання поведінки МАС у трьох ключових аварійних сценаріях дозволило отримати дані щодо стабільності траєкторії та ефективності систем керування в

критичних умовах. Результати чисельних симуляцій, виконаних у MATLAB/Simulink, підтверджують критичну важливість надійної роботи системи керування для забезпечення безпеки автономного судноплавства.

У сценарії повної відмови керма (фіксація кута керма на нулі), МАС повністю втрачає керованість, що призводить до неконтрольованого дрейфу та постійного відхилення від заданого курсу під впливом зовнішніх збурень, зокрема імпульсного вітру. Цей результат є найбільш критичним і підкреслює необхідність розробки надійних резервних систем рульового керування та/або адаптивних алгоритмів, здатних прогнозувати та компенсувати подібні відмови.

Сценарій із затримкою керуючого сигналу (моделювання втрати зв'язку) показав, що судно все ще зберігає здатність до часткової компенсації, проте курс МАС демонструє аперіодичні (інколи навіть коливальні) процеси навколо бажаного значення). Це вказує на потенційну нестабільність при частих або тривалих затримках зв'язку та необхідність впровадження ефективніших механізмів фільтрації або предиктивних алгоритмів керування для підвищення стійкості.

Сценарій з раптовим поривом вітру за умови активного PID-регулятора продемонстрував ефективність базової системи керування. Курс судна швидко стабілізується після короткочасного відхилення, що свідчить про часткову інваріантність алгоритму до збурень. Це підтверджує, що для забезпечення стабільної навігації в умовах обмежених, але передбачуваних збурень, наявні базові контролери є задовільним рішенням.

3. Порівняльний аналіз аварійних сценаріїв наголошує на тому, що найвищий ризик для безпеки МАС несе повна втрата керованості, тоді як навіть за наявності функціонування базових систем керування судно здатне демонструвати частково-стійку поведінку.

Отримані результати формують основу для подальшого створення алгоритмів автоматичного аварійного реагування на позаштатні ситуації та синтезу оптимальних систем керування МАС, зокрема з використанням адаптивних підходів, нечіткої логіки та методів штучного інтелекту.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Kazantzidou C., Perez T., Donaire A. & Valentinis F. Internal Model Control for Rudder Roll Stabilisation and Course Keeping of a Surface Marine Craft. *IFAC-PapersOnLine*, 51(29), 457–462. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.445>.
2. Hadi B., Khosravi A., & Sarhadi P. Cooperative motion planning and control of a group of autonomous underwater vehicles using twin-delayed deep deterministic policy gradient. *Applied Ocean Research*, 147, 103977. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103977>.
3. Zhang Y., Zhao H., Wang J. & Wang H. Optimal path planning for autonomous berthing of unmanned ships in complex port environments. *Ocean Engineering*, 303, 117641. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117641>.
4. Deng Y., Zhang X., Im N., Zhang G. & Zhang Q. Adaptive fuzzy tracking control for underactuated surface vessels with unmodeled dynamics and input saturation. *ISA Transactions*, 103, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.04.010>.
5. Hassani V., Sorensen A. J. & Pascoal A. M. Adaptive Wave Filtering for Dynamic Positioning of Marine Vessels using Maximum Likelihood Identification: Theory and Experiments. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33), 203–208. <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00041>.
6. Elhaki O., Shojaei K. & Mehrmohammadi P. Reinforcement learning-based saturated adaptive robust neural-network control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Expert Systems With Applications*, 197, 116714. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116714>.
7. Er M. J., Ma C., Liu T. & Gong H. Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. *Ocean Engineering*, 280, 114562. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562>.

8. Larrazabal J. M. & Peñas M. S. Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel. *Expert Systems With Applications*, 55, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.01.057>.
9. Kahveci N. E. & Ioannou P. A. Adaptive steering control for uncertain ship dynamics and stability analysis. *Automatica*, 49(3), 685–697. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.11.026>.
10. Мельник О. М. Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських суднах для забезпечення навігаційної безпеки / О.М. Мельник, О.В. Щербина, К.С. Корякін, Д.А. Бурлаченко // *Наукові вісті Далівського університету*. – 2021. – № 21. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21>.
11. Мельник О. М., Корякін К. С. & Логінов О. В. Супутникові компаси у системі забезпечення безпеки навігації суден. *Розвиток транспорту*, 1(12), 54–63. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.05>.
12. Мельник О. М. Розвиток дистанційних технологій керування судном як фактор забезпечення безпеки судноплавства / О. А. Онищенко, А. О. Волошин, Н. В. Васалатій, О. В. Логінов, К. С. Корякін// *Розвиток транспорту*. 2022. № 3 (14), С. 179–191. <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13>.
13. Мельник О. М., Налева Г. В., Обнявко Т. С., Онищенко О. А. Особливості математичних моделей судових електроприводів, побудованих на основі безщіткових двигунів постійного струму. *Суднові енергетичні установки*, №45, С. 155–168. <https://doi.org/10.31653/smf45.2022>.
14. Мельник О. М., Калініченко Є. В., Бурлаченко Д. А., Никитюк П. В., Колесник О. В. Забезпечення безпеки судноводіння шляхом розроблення стратегій попередження зіткнення на базі «моделі відкритого моря». *Водний транспорт*, 1(37), 71–79. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.07>.
15. Онищенко О. А., Мельник О. М., Курдюк С. В., Дрозденко О. І., Гаврилюк Т. К. & Бурлаченко Д. А. Застосування методів машинного навчання для оптимізації маршрутів і завдань автономних надводних апаратів. *Наука і техніка*, 12(40), 1372–1386. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386).
16. Курдюк, С., Дремлюк, В., Мельник, О., Онищенко, О., Галаган, С., Гаврилюк, Т. (2024). Програмне забезпечення для надійної передачі даних для морських безпілотних плавальних апаратів. *Судноводіння*, 36, 86–101. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.86-101>.
17. Мельник О., Онищенко О., Курдюк С., Дрозденко О., Гаврилюк Т., Бурлаченко Д. Сучасні методи протидії безпілотним системам: Технології та перспективи. *Судноводіння*, 36, 102–115. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.102-115>.
18. Бурлаченко Д. А., Мельник О. М. Моделювання динаміки руху морського автономного судна з адаптивною курсовою стабілізацією в умовах стохастичних збурень середовища. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*, 1(109).
19. Volkov O., Petrychenko O. & Vlasenko Y. Danger of using autonomous ships. *Судноводіння*. 2023. Вип. 34. URL: [https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023\\_O.-Volkov-O.-Petrychenko-Y.-Vlasenko-Danger-of-us%D1%96ng-autonomous-ships.pdf](https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023_O.-Volkov-O.-Petrychenko-Y.-Vlasenko-Danger-of-us%D1%96ng-autonomous-ships.pdf).
20. Roh H. et al. Qualitative Risk Assessment Methodology for Maritime Autonomous Surface Ships: Cognitive Model-Based Functional Analysis and Hazard Identification. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 13, no. 5. P. 970. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/5/970>.
21. Mihailidis A. & Nikitakos N. Analysis of Risks Arising from the Use of Autonomous Vessels. *Journal of Maritime & Transportation Science*. 2023. Vol. 63, no. 1. P. 63–74. URL: [https://www.researchgate.net/publication/377683241\\_Analysis\\_of\\_Risks\\_Arising\\_from\\_the\\_Use\\_of\\_Autonomous\\_Vessels](https://www.researchgate.net/publication/377683241_Analysis_of_Risks_Arising_from_the_Use_of_Autonomous_Vessels).
22. Tsolakis T. et al. A risk assessment of an autonomous navigation system for a maritime autonomous surface ship. *International Journal of Navigation and Port Research*. 2025.

<https://doi.org/10.1080/20464177.2025.2460268>. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/20464177.2025.2460268>.

23. Poplavska I. & Tkachenko O. Collision Avoidance for Maritime Autonomous Surface Ships Based on Model Predictive Control Using Intention Data and Quaternion Ship Domain. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2025. Vol. 13, no. 1. P. 124. URL: <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/1/124>.

24. Wróbel M. A human-centred review on maritime autonomous surfaces ships: impacts, responses, and future directions. *Ergonomics*. 2024. <https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2325453>. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01441647.2024.2325453>.

25. Ryan P. et al. Maritime autonomous surface ships: can we learn from unmanned aerial vehicle incidents using the perceptual cycle model? *Ergonomics*. 2022. Vol. 65, no. 12. P. 1779–1798. <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2126896>. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00140139.2022.2126896>.

26. Rhee J. Attacks on Commercial Maritime Autonomous Surface Ships at Sea in. *The International Journal of Marine and Coastal Law*. 2023. Vol. 38, no. 2. P. 266–291. URL: [https://brill.com/view/journals/apoc/8/2/article-p266\\_005.xml](https://brill.com/view/journals/apoc/8/2/article-p266_005.xml).

27. Веремчук В. С. Міжнародно-правові аспекти експлуатації автономного морського судна: постановка питання. *Правова держава*. 2023. Вип. 50. С. 280272. <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2023.50.280272>. URL: <http://pd.onu.edu.ua/article/view/280272>.

28. Issa M. et al. Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 23. P. 15630. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/15630>.

29. Luchenko Y. Challenges and Developments in the Public Administration of Autonomous Shipping. *Lex Portus*. 2023. Вип. 1. С. 9–12. URL: [https://lexportus.net.ua/vipusk-1-2023/luchenko\\_912.pdf](https://lexportus.net.ua/vipusk-1-2023/luchenko_912.pdf).

## REFERENCES

1. Kazantzidou, C., Perez, T., Donaire, A., & Valentinis, F. (2017). Internal Model Control for Rudder Roll Stabilisation and Course Keeping of a Surface Marine Craft. *IFAC-PapersOnLine*, 51(29), 457–462. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.09.445>.

2. Hadi, B., Khosravi, A., & Sarhadi, P. (2024). Cooperative motion planning and control of a group of autonomous underwater vehicles using twin-delayed deep deterministic policy gradient. *Applied Ocean Research*, 147, 103977. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103977>.

3. Zhang, Y., Zhao, H., Wang, J., & Wang, H. (2024). Optimal path planning for autonomous berthing of unmanned ships in complex port environments. *Ocean Engineering*, 303, 117641. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117641>.

4. Deng, Y., Zhang, X., Im, N., Zhang, G., & Zhang, Q. (2020). Adaptive fuzzy tracking control for underactuated surface vessels with unmodeled dynamics and input saturation. *ISA Transactions*, 103, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2020.04.010>.

5. Hassani, V., Sørensen, A. J., & Pascoal, A. M. (2012). Adaptive Wave Filtering for Dynamic Positioning of Marine Vessels using Maximum Likelihood Identification: Theory and Experiments. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33), 203–208. <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00041>.

6. Elhaki, O., Shojaei, K., & Mehrmohammadi, P. (2022). Reinforcement learning-based saturated adaptive robust neural-network control of underactuated autonomous underwater vehicles. *Expert Systems With Applications*, 197, 116714. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116714>.

7. Er, M. J., Ma, C., Liu, T., & Gong, H. (2023). Intelligent motion control of unmanned surface vehicles: A critical review. *Ocean Engineering*, 280, 114562. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114562>.

8. Larrazabal, J. M., & Peñas, M. S. (2016). Intelligent rudder control of an unmanned surface vessel. *Expert* 9. Kahveci, N. E., & Ioannou, P. A. (2013). Adaptive steering control for uncertain ship dynamics and stability analysis. *Automatica*, 49(3), 685–697. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.11.026>.
10. Melnyk, O. M., Shcherbyna, O. V., Koriakin, K. S., & Burlachenko, D. A. (2021). Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskykh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky [Overview and prospects of using modern course-indicating systems on sea vessels to ensure navigation safety]. *Naukovi visti Dalivskoho universytetu*, (21). <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21>.
11. Melnyk, O. M., Koriakin, K. S., & Loginov, O. V. (2022). Suputnykovi kompasy u systemi zabezpechennia bezpeky navihatsii suden [Satellite compasses in the system of ensuring ship navigation safety]. *Rozvytok transportu*, 1(12), 54–63. <https://doi.org/10.33082/td.2022.1-12.05>.
12. Melnyk, O. M., Onishchenko, O. A., Voloshyn, A. O., Vasalati, N. V., Loginov, O. V., & Koriakin, K. S. (2022). Rozvytok dystantsiinykh tekhnolohii keruvannia sudnom yak faktor zabezpechennia bezpeky sudnoplavstva [Development of remote ship control technologies as a factor in ensuring navigation safety]. *Rozvytok transportu*, 3(14), 179–191. <https://doi.org/10.33082/td.2022.3-14.13>.
13. Melnyk, O. M., Naleva, H. V., Obniavko, T. S., & Onishchenko, O. A. (2022). Osoblyvosti matematychnykh modelei sudnovykh elektropryvodiv, pobudovanykh na osnovi bezshchitkovykh dvyhuniv postiinoho strumu [Features of mathematical models of ship electric drives based on brushless DC motors]. *Sudnovi enerhetychni ustanovky*, (45), 155–168. <https://doi.org/10.31653/smf45.2022>.
14. Melnyk, O. M., Kalinichenko, Y. V., Burlachenko, D. A., Nykhytiuk, P. V., & Kolesnyk, O. V. (2023). Zabezpechennia bezpeky sudnovodinnia shliakhom rozroblennia stratehii poperedzhennia zitknennia na bazi «modeli vidkrytoho moria» [Ensuring navigation safety by developing collision avoidance strategies based on the "open sea model"]. *Vodnyi transport*, 1(37), 71–79. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.07>.
15. Onishchenko, O. A., Melnyk, O. M., Kurdiuk, S. V., Drozdenko, O. I., Havryliuk, T. K., & Burlachenko, D. A. (2024). Zastosuvannia metodiv mashynnoho navchannia dlia optymizatsii marshrutiv i zavdan avtonomnykh nadvodnykh aparativ [Application of machine learning methods for optimizing routes and tasks of autonomous surface vehicles]. *Nauka i tekhnika*, 12(40), 1372–1386. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386).
16. Kurdiuk, S., Dremluk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Halagan, S., & Havryliuk, T. (2024). Prohramne zabezpechennia dlia nadiinoi peredachi danykh dlia morskykh bezpilotnykh plavalnykh aparativ [Software for reliable data transmission for marine unmanned aerial vehicles]. *Sudnovodinnia*, (36), 86–101. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.86-101>.
17. Melnyk, O., Onishchenko, O., Kurdiuk, S., Drozdenko, O., Havryliuk, T., & Burlachenko, D. (2024). Suchasni metody protydii bezpilotnym systemam: Tekhnolohii ta perspektyvy [Modern methods of countering unmanned systems: Technologies and prospects]. *Sudnovodinnia*, (36), 102–115. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.102-115>.
18. Burlachenko, D. A., & Melnyk, O. M. (2025). Modeliuvannia dynamiky rukhu morskoho avtonomnoho sudna z adaptyvnoiu kursovoiu stabilizatsiieiu v umovakh stokhastychnykh zburhen seredovyshecha [Modeling the dynamics of a maritime autonomous vessel with adaptive course stabilization under stochastic environmental disturbances]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*, 1(109).
19. Volkov, O., Petrychenko, O., & Vlasenko, Y. (2023). Danger of using autonomous ships. *Sudnovodinnia*, (34). [https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023\\_O.-Volkov-O.-Petrychenko-Y.-Vlasenko-Danger-of-us%D1%96ng-autonomous-ships.pdf](https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2023/05/34-2023_O.-Volkov-O.-Petrychenko-Y.-Vlasenko-Danger-of-us%D1%96ng-autonomous-ships.pdf).
20. Roh, H., Jeong, D., Park, S., & Kim, M. J. (2024). Qualitative Risk Assessment Methodology for Maritime Autonomous Surface Ships: Cognitive Model-Based Functional

Analysis and Hazard Identification. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(5), 970. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/5/970>.

21. Mihailidis, A., & Nikitakos, N. (2023). Analysis of Risks Arising from the Use of Autonomous Vessels. *Journal of Maritime & Transportation Science*, 63(1), 63–74. [https://www.researchgate.net/publication/377683241\\_Analysis\\_of\\_Risks\\_Arising\\_from\\_the\\_Use\\_of\\_Autonomous\\_Vessels](https://www.researchgate.net/publication/377683241_Analysis_of_Risks_Arising_from_the_Use_of_Autonomous_Vessels).

22. Tsolakis, T., Georgakarakos, V., Theodoulidis, C., & Loukas, D. (2025). A risk assessment of an autonomous navigation system for a maritime autonomous surface ship. *International Journal of Navigation and Port Research*. <https://doi.org/10.1080/20464177.2025.2460268>.

23. Poplavska, I., & Tkachenko, O. (2025). Collision Avoidance for Maritime Autonomous Surface Ships Based on Model Predictive Control Using Intention Data and Quaternion Ship Domain. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(1), 124. <https://www.mdpi.com/2077-1312/13/1/124>.

24. Wróbel, M. (2024). A human-centred review on maritime autonomous surfaces ships: impacts, responses, and future directions. *Ergonomics*. <https://doi.org/10.1080/01441647.2024.2325453>.

25. Ryan, P., Horberry, T., & Fleming, B. (2022). Maritime autonomous surface ships: can we learn from unmanned aerial vehicle incidents using the perceptual cycle model? *Ergonomics*, 65(12), 1779–1798. <https://doi.org/10.1080/00140139.2022.2126896>.

26. Rhee, J. (2023). Attacks on Commercial Maritime Autonomous Surface Ships at Sea in. *The International Journal of Marine and Coastal Law*, 38(2), 266–291. [https://brill.com/view/journals/apoc/8/2/article-p266\\_005.xml](https://brill.com/view/journals/apoc/8/2/article-p266_005.xml).

27. Veremchuk, V. S. (2023). Mizhnarodno-pravovi aspekty ekspluatatsii avtonomnoho morskoho sudna: postanovka pytannia [International legal aspects of autonomous marine vessel operation: Problem statement]. *Pravova derzhava*, (50), 280272. <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2023.50.280272>.

28. Issa, M., Ali, A., Hussein, M., Abdelhady, S., & Eltawil, Y. (2022). Maritime Autonomous Surface Ships: Problems and Challenges Facing the Regulatory Process. *Sustainability*, 14(23), 15630. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/23/15630>.

29. Luchenko, Y. (2023). Challenges and Developments in the Public Administration of Autonomous Shipping. *Lex Portus*, (1), 9–12. [https://lexportus.net.ua/vipusk-1-2023/luchenko\\_912.pdf](https://lexportus.net.ua/vipusk-1-2023/luchenko_912.pdf).

**Burlachenko D., Melnyk O. BEHAVIOR MODELING AND EMERGENCY SIMULATION FOR A MARITIME AUTONOMOUS VESSEL WITH TRAJECTORY STABILITY ASSESSMENT**

*The article investigates the complex behavior of a Maritime Autonomous Surface Ship (MASS) during critical emergency situations. It specifically focuses on scenarios involving loss of control, sudden gusty winds, and steering drive failure. It is demonstrated that studying the emergency behavior of a MASS holds profound practical significance, directly addressing challenges related to the safe deployment and energy efficiency of autonomous navigational transits.*

*A simplified mathematical model, based on Newton-Euler equations, was employed to characterize the vessel's motion dynamics in the horizontal plane. This model accounts for hydrodynamic, aerodynamic, and stochastic effects in a simplified manner, thereby ensuring a realistic representation of the marine environment.*

*A critical gap identified in current MASS research is the deficit of models capable not only of reproducing the behavior of autonomous vessels during rudder blockage, loss of control signals, or unexpected disturbances, but also of predicting their cascading consequences. To address this deficiency, an innovative simulation scenario for MASS emergency modes was proposed. This scenario incorporates various navigational element failures. The simulation was conducted in MATLAB/Simulink, enabling the implementation and analysis of key emergency scenarios. This included a discrete integration step of 0.1 seconds over a 100-second simulation period, utilizing typical parameters for a small autonomous platform.*

*The study evaluated three distinct emergency scenarios:*

*– in the first scenario, the rudder was fixed at a zero position, leading to irreversible and uncontrolled course deviation due to wind gusts. This was identified as the most critical outcome, as the vessel loses its ability to perform navigational compensation, although the direction of drift remains predictable;*

– the second scenario involved simulating a delay in the PID controller's command signal, mimicking an unstable connection. This revealed deviations from the desired course, indicating a partial retention of trajectory. However, it underscored that prolonged delays can induce not only aperiodic effects but also resonance, thereby necessitating adaptive control algorithms;

– in the third scenario, with the PID controller actively engaged, the system demonstrated a robust capability to quickly compensate for a strong lateral wind gust. The vessel's course stabilized within a few seconds after a minor transient overshoot, confirming a partial invariance to disturbances.

The simulation results provided invaluable insights into trajectory stability and the varying effectiveness of control strategies under adverse conditions. The presented approach to simulating critical states, achieved by fixing motion parameters during loss of control, established a fundamental database for developing proactive crisis response protocols. Furthermore, the classic PID control model was enhanced with a "freeze" function for actuators and adapted to account for changes in load and transverse speed. This enables the creation of redundant autonomous control loops, potentially through digital twin technologies. These data serve as a foundation for developing new automatic emergency response algorithms aimed at mitigating unforeseen and critical situations during future autonomous navigation missions.

**Key words:** autonomous vessel; emergency; simulation; directional stabilization; loss of control; marine environment; control process; mathematical modeling; hydrodynamics; stochastic disturbances.

© Бурлаченко Д. А., Мельник О. М.

Статтю прийнято до редакції 16.06.2025

## СТВОРЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНА

**Никитюк П. В.**, старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: pikrv.onpu@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5905-3807;

**Мельник О. М.**, д.т.н., професор, професор кафедри судноводіння і морської безпеки, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: m.onpu@ukr.net, ORCID: 0000-0001-9228-8459.

*Стаття пропонує інтегровану математичну модель (ММ), застосування якої у практиці дозволяє підвищити експлуатаційну безпеку суден. Модель поєднує декілька критично важливих компонентів: імовірнісну оцінку ризиків, що надає кількісні показники потенційних загроз; глибинний аналіз деградації бар'єрів безпеки, відстежуючи зменшення захисних шарів з часом або під впливом навантажень; агреговану оцінку стану різних підсистем судна в режимі реального часу, уніфікуючи різномірні дані для цілісного огляду; надійні можливості прогнозування ризиків, засновані на використанні технологій нейронних мереж, що дозволяє передбачати майбутні траєкторії ризиків на основі вивчених закономірностей зі складних експлуатаційних даних.*

*Змодельовано серію з п'яти різних експлуатаційних сценаріїв. Ці сценарії розроблені так, щоб охопити широкий спектр умов функціонування судна, критично враховуючи динамічні зміни навколишнього середовища, різноманітні технічні збої (несправності, поломки) та потенційну втрату ефективності чинних систем безпеки та захисту. Тестування сценаріїв дозволило провести валідацію продуктивності моделі в різноманітних та складних експлуатаційних умовах.*

*Результати симуляції демонструють здатність запропонованої моделі виявляти небезпечні умови на надзвичайно ранніх стадіях їхнього розвитку, задовго до того, як вони переростуть у критичні інциденти. Показано, що модель здатна генерувати кількісні оцінки ризиків, пропонуючи чіткі числові дані про потенційні загрози, формує дієві рекомендації для превентивного реагування, надаючи особам, які приймають рішення, своєчасні та актуальні вказівки для запобігання несприятливим подіям. Вбудовані індикатори інтегрованого ризику, запасу міцності та безперервного моніторингу деградації бар'єрів безпеки підтверджують високу інформативність системи, щодо визначення статусу безпеки судна. Модель має адаптивність до високодинамічного морського середовища. Пропонований підхід може служити основою для створення складних функціональних платформ, присвячених комплексному управлінню безпекою морських суден. Пропонується інтеграція таких ММ у сучасні навігаційні та безпекові системи управління інформацією.*

**Ключові слова:** морський транспорт; експлуатаційна безпека; інтегрована модель; бар'єри безпеки; оцінка ризиків; деградація; прогнозування; суднові системи; процес управління; комплекс; адаптація; системний моніторинг; процеси керування; підтримка рішень.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.209-221**

**Вступ.** На поточному етапі інтенсивного розвитку морських перевезень, зростання складності суднових систем і підвищених вимог до безпеки виконання технічних та технологічних процесів на суднах, проблеми забезпечення експлуатаційної безпеки судна виходять на перший план. Класичні підходи до оцінки морських ризиків часто не враховують комплексного впливу факторів середовища, технічного стану систем судна та людського елементу. Водночас розвиток інформаційних технологій і обчислювальної техніки дозволяє впроваджувати інтегровані підходи оцінювання, що поєднують аналітичні моделі, штучний інтелект, машинне навчання та багатофакторний аналіз для комплексного моніторингу й управління безпекою суднових операцій. Особливої актуальності набуває застосування таких моделей для автономних суден, що працюють у динамічному морському середовищі з мінімальним втручанням людини.

У цьому контексті інтегровані моделі оцінки та прогнозування експлуатаційних ризиків стають основою для підвищення рівня морської безпеки, оптимізації керування суднами, зниження ймовірності аварійних ситуацій і є вкрай актуальними.

**Аналіз останніх досліджень та постановка проблеми.** Останні дослідження у сфері експлуатаційної безпеки суден у більшості випадків орієнтовані на інтегровані підходи до

оцінки ризиків, аналізу бар'єрів безпеки та використанні сучасних інтелектуальних технологій. У [1, 11] запропоновано методики кількісної оцінки ефективності бар'єрів безпеки, орієнтовані на підвищення стійкості суднових систем, використовуючи ймовірнісні мережі для комплексного аналізу. Модель багатoshарової оцінки безпеки судна, презентована у [2], демонструє важливість поєднання інформаційної та технічної безпеки в єдиній структурі. Інша робота [3] зосереджена на інтегрованому підході до кібербезпеки судового обладнання, як критичного чинника загальної експлуатаційної безпеки.

Стосовно портової логістики, у науковій праці [4] використано гібридні моделі DEMATEL-OPA-DGRA для ідентифікації та оптимізації затримок інформації.

У контексті автономних суден автори роботи [5, 15] розглядають моделі ризиків у складних умовах плавання з обмеженою видимістю та простором маневрування, запропонувавши фреймворк оцінки операційного ризику, розглядають проблеми логістики при використанні таких засобів. Публікація [6] надає огляд методів контролю в контексті безпеки та кіберзахисту, що має високу релевантність у рамках використання інтегрованих моделей. Водночас у [7–9] інтегрують Deep Q-мережі та знання експертів для оптимізації операційної ефективності в портах. Деякі дослідження, наприклад, [10–12] зосереджуються на кількісному аналізі бар'єрів безпеки у промисловому середовищі, що адаптивно переноситься у сферу морського транспорту.

Особливу цінність становлять методики реального часу, які детально представлені у [13] і пропонують використати гібридну модель глибокого навчання для прогнозу наслідків зіткнень у реальних умовах. Робота [14] звертає увагу на специфіку управління ризиками для малих риболовецьких суден.

**Постановка проблеми.** Попри значний науковий прогрес, практична інтеграція моделей оцінки ризиків, контролю ефективності бар'єрів, інформаційної безпеки та ситуаційної обізнаності в єдину операційну систему забезпечення безпеки судна, залишається недостатньо реалізованою. Чинні підходи часто мають одновимірний характер або орієнтовані на окремі аспекти, тоді як реальні судові системи функціонують у багатофакторному, динамічно змінюваному середовищі. Відсутність інтегрованих платформ, здатних до адаптивного управління ризиками в реальному часі, суттєво знижує ефективність рішень і підвищує ймовірність помилок оператора. Також, недостатньо досліджена взаємодія між фізичними та цифровими бар'єрами безпеки в умовах інцидентів або кіберзагроз.

**Метою дослідження** є розробка та верифікація інтегрованої моделі забезпечення експлуатаційної безпеки судна, яка поєднує відомі методи оцінки ризиків, ефективності бар'єрів безпеки, інформаційної захищеності та оперативного реагування в умовах змінного морського середовища.

**Завдання дослідження:** а) провести аналіз сучасних моделей управління експлуатаційною безпекою суден та їхніх обмежень; б) сформулювати інтегровану концептуальну модель оцінки та управління ризиками з урахуванням фізичних і інтелектуальних бар'єрів; в) реалізувати обчислювальну модель для тестування поведінки системи за різних сценаріїв (технічна відмова, зіткнення, кіберінцидент); г) проаналізувати ефективність запропонованої моделі за критеріями стійкості, своєчасності реакції та зниження ризику.

Наукова новизна дослідження полягає у наступному.

По-перше, запропоновано єдину інтегровану модель забезпечення експлуатаційної безпеки судна, яка одночасно враховує вплив фізичних, інформаційних та когнітивних бар'єрів у режимі реального часу на основі багаторівневої оцінки ризиків. На відміну від наявних підходів, запропонована модель орієнтована не лише на оцінку ймовірності окремих подій, а й на динамічне оновлення сценаріїв ризику із застосуванням гібридного обчислювального ядра, що поєднує ймовірнісні структури з модулями глибокого навчання для прогнозування критичних станів системи. Уведено концепцію бар'єрів безпеки, як окремого функціонального елемента інтегрованої архітектури управління ризиками судна, реалізовану на основі моделі повного перекриття.

Отримало подальший розвиток використання методів ситуаційної обізнаності з розширенням їх функціоналу до методів обізнаності з адаптацією їх функціоналу до умов рейсу та адаптивним реагуванням на зміни зовнішніх умов та внутрішнього технічного стану судна, а також здатність ефективно управляти багатофакторними загрозами, від технічних відмов до кіберінцидентів. Практичне застосування моделі забезпечує підвищення точності операційного ризику, скорочення часу реагування систем безпеки судна та ймовірності виникнення аварійних ситуацій.

**Виклад основного матеріалу.** Безумовно, для забезпечення цілісної експлуатаційної безпеки судна необхідна така модель, яка здатна охопити динаміку морського середовища, технічний стан судових систем, вплив людського фактора та ефективність наявних бар'єрів безпеки. Пропонується інтегрована модель, яка поєднує методи ймовірнісного аналізу, функції ефективності бар'єрів, прогнозу компоненту та зважену оцінку критичності підсистем судна. Використання такої моделі дозволить створити адаптивну систему, що реагує на ризики в режимі реального часу та підтримує оператора у прийнятті ним найбільш ефективних рішень.

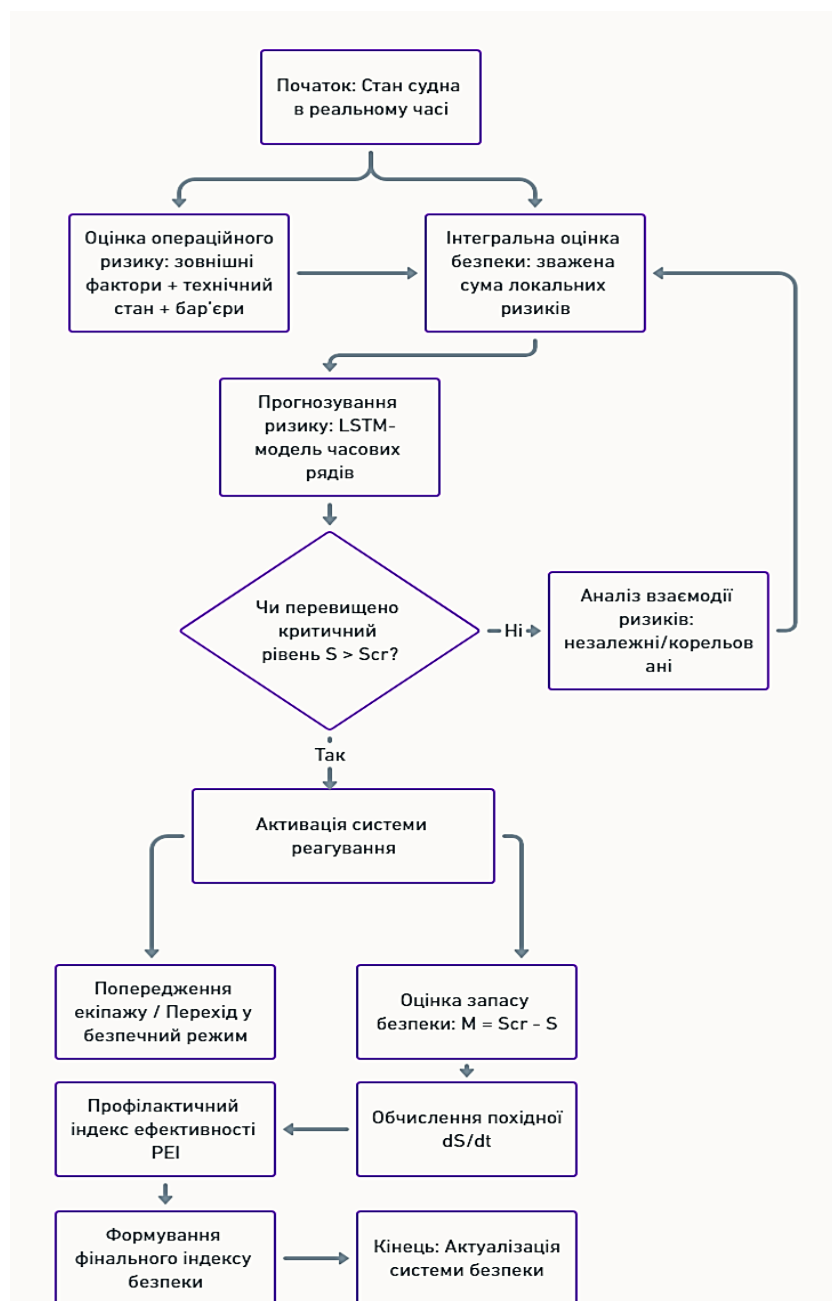


Рисунок 1 – Алгоритм динамічного управління експлуатаційною безпекою судна

Для інтерпретації логіки функціонування інтегрованої системи забезпечення експлуатаційної безпеки судна пропонується функціональний алгоритм, представлений на рис. 1, де відображена послідовність ключових етапів: від збору та оцінки поточних даних про стан судна до прогнозування критичних ситуацій, прийняття рішень і формування підсумкових індикаторів безпеки.

Алгоритм динамічного управління експлуатаційною безпекою судна реалізує циклічну оцінку, прогнозування та реагування на основі реального стану судна. Початково виконується оцінка операційного ризику (зовнішні фактори, технічний стан, бар'єри), після чого формується інтегральна оцінка безпеки, з урахуванням локальних ризиків підсистем.

Далі, за допомогою *LSTM*-моделі, здійснюється прогнозування ризику на наступні часові інтервали. Якщо розрахований рівень безпеки  $S$  перевищує граничне значення  $S_{cr}$ , активується система реагування: попередження екіпажу, перехід у безпечний режим, розрахунок запасу безпеки  $M = S_{cr} - S$  та швидкості зміни ризику  $dS/dt$ . Паралельно виконується аналіз корельованих ризиків. На завершальному етапі формується профілактичний індекс ефективності (*PEI*) та фінальний індекс безпеки з подальшою актуалізацією параметрів системи.

Далі спрощено наведені основні елементи інтегрованої моделі, яка поєднує три основні компоненти (оцінку операційного ризику, модель ефективності бар'єрів безпеки та механізм адаптивного реагування). Таким чином, необхідно сформулювати систему, що забезпечує реальний контроль за станом судна, його системами і навколишнім середовищем у контексті запобігання інцидентам.

1. Оцінка операційного ризику. Загальна ймовірність аварійної події  $P(R)$  визначається як комбінація умовних ймовірностей кількох ключових факторів: зовнішнього середовища  $F_i$ , технічного стану системи  $C_i$  та функціонування бар'єрів безпеки  $B_i$ :

$$P(R) = \sum_{i=1}^n P(R | F_i, C_i, B_i) \cdot P(F_i) \cdot P(C_i) \cdot P(B_i). \quad (1)$$

Цей вираз дозволяє моделювати складну ймовірнісну залежність між подіями, що можуть спричинити аварійну ситуацію.

2. Модель ефективності бар'єрів. Оскільки технічні системи безпеки деградують із часом, їхня ефективність  $E_B(t)$  моделюється як експоненційна функція:

$$E_B(t) = E_0 \cdot e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

де  $E_0$  – початковий рівень ефективності (100 % при введенні в експлуатацію),  $\lambda$  – коефіцієнт деградації, залежить від типу обладнання, середовища та режиму роботи,  $t$  – час експлуатації.

Такий вираз дозволяє динамічно враховувати зниження здатності бар'єра стримувати або компенсувати ризик. Наприклад, узагальнено, одним з етапів оцінки наслідків аварії, може бути зважена сума компонент:

$$C = \alpha L + \beta E + \gamma F + \delta R, \quad (3)$$

де  $L$  – людські втрати,  $E$  – екологічні,  $F$  – фінансові,  $R$  – репутаційні втрати;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  – відповідні вагові коефіцієнти (експертні, апріорні/прогнозовані тощо).

3. Інтегральна оцінка стану судна. Для формування узагальненої оцінки безпеки всі ризики підсистем зважуються відповідно до їх критичності. Рівень безпеки судна  $S$  визначається як:

$$S = f \left( \sum_{j=1}^m w_j \cdot R_j \cdot (1 - E_{B_j}) \right), \quad (4)$$

де  $w_j$  – ваговий коефіцієнт підсистеми  $j$ ,  $R_j$  – локальна оцінка ризику для підсистеми,  $E_{B_j}$  – ефективність відповідного бар'єру. Функція  $f(\cdot)$  може бути як лінійною, так і логістичною, залежно від системи керування.

4. Прогноз ризику з використанням *LSTM*. Ключовим компонентом моделі є здатність до прогнозування. З цією метою використовується рекурентна (нейромережева) структура (*LSTM*), яка аналізує часові ряди параметрів, тож для прогнозування майбутніх значень ризику застосуємо *LSTM*-модель, що працює з часовими рядами:

$$\hat{R}_{t+1} = \text{LSTM}(F_{1:t}, C_{1:t}, B_{1:t}) . \quad (5)$$

Така модель враховує залежності між подіями в часі й дозволяє здійснювати керування на випередження.

5. Умова активації системи реагування. Коли загальний рівень ризику перевищує критичне значення  $S_{cr}$ , система ініціює аварійне втручання або перехід у безпечний режим:

$$S > S_{cr} \rightarrow \{ \text{Активация аварійного алгоритму} \} . \quad (6)$$

Наприклад, це може включати зупинку судна, сповіщення екіпажу або автоматичне перемикання систем керування рухом. Отримане прогнозне значення використовується для оцінки ймовірності аварії у найближчому майбутньому та проактивного реагування.

Для більш компактного й прикладного використання впроваджується інтегрований індекс ризику судна:

$$SIRI = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (w_j \cdot R_j \cdot (1 - E_{B_j})) . \quad (7)$$

Його перевищення порогового значення супроводжується запуском аварійного протоколу. Очевидно, що швидкість зміни ризику легко оцінюється через відомий вираз для похідної:

$$\frac{dR}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t + \Delta t) - R(t)}{\Delta t} . \quad (8)$$

Комбінована логіка прийняття рішення задається як функція кількох умов:

$$\text{IF } SIRI > S_{cr} \quad \text{AND} \quad \frac{dR}{dt} > \gamma \quad \Rightarrow \quad \text{RESPONSE} . \quad (9)$$

де  $\gamma$  – граничний градієнт ризику. У підсумку, можна обчислити очікувану втрату безпеки:

$$L = \sum_{j=1}^m p_j \cdot \Delta S_j \quad (10)$$

та сформувати фінальний узагальнений показник:

$$S_{\text{total}} = \phi \left( \bar{R}, \bar{E}_B, t, \frac{dR}{dt}, L \right) . \quad (11)$$

Таким чином, запропонований алгоритм охоплює не лише оцінку стану судна «тут і зараз», а й дозволяє здійснювати прогнозування та адаптацію, формуючи цілісну цифрову структуру управління безпекою.

6. Функція адаптації вагових коефіцієнтів підсистем. У разі зміни умов (наприклад, аварійного режиму), ваги підсистем можуть автоматично оновлюватися згідно з функцією пріоритетності:

$$w_j(t) = \frac{\alpha_j \cdot S_j^{-1}}{\sum_{k=1}^m \alpha_k \cdot S_k^{-1}} , \quad (12)$$

де  $\alpha_j$  – базова важливість підсистеми  $j$ ,  $S_j$  – поточний рівень безпеки цієї підсистеми,  $w_j(t)$  – динамічна вага, нормована в реальному часі. Це дозволяє автоматично зміщувати фокус системи до найбільш уразливих зон.

7. Оцінка запасу безпеки (Safety Margin). Запас безпеки визначається як різниця між критичним та фактичним індексом:

$$M = S_{cr} - SIRI, \quad (13)$$

де  $M \rightarrow 0$  – означає наближення до критичного рівня ризику, і вимагає пріоритетної реакції.

8. Інтегрована ймовірність виявлення інциденту. Якщо використовується кілька датчиків або систем моніторингу, ймовірність виявлення інциденту можна описати як:

$$P_d = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - p_k), \quad (14)$$

де  $p_k$  – ймовірність виявлення події кожним із  $n$  незалежних сенсорів або систем. Це дозволяє враховувати, так званий, мультисенсорний контроль або дублювання систем.

9. Коефіцієнт стійкості системи до потрясінь (Resilience Index). Для оцінки здатності системи відновлюватися після критичних подій вводимо:

$$RI = \frac{T_{rec}}{T_{dis} + T_{rec}}, \quad (15)$$

де  $T_{dis}$  – тривалість впливу інциденту,  $T_{rec}$  – час, за який система повертається до безпечного стану. Встановлено:  $RI \rightarrow 1$  – висока стійкість системи,  $RI \rightarrow 0$  – критична вразливість системи.

10. Функція оцінки ймовірності каскадного збою (cascading failure). Ймовірність переходу локального збою в системний виглядає як:

$$P_{cas} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - q_i \cdot (1 - E_{B_i})) , \quad (16)$$

де  $q_i$  – ймовірність, що збій у підсистемі  $i$  спричинить ланцюгову реакцію,  $E_{B_i}$  – здатність бар'єра стримати поширення збоїв.

Це критичний показник для оцінки «ефекту доміно» у складних судових системах.

11. Інтегральна функція часового накопичення ризику (Cumulative Risk Exposure). Враховуючи, що ризик може бути не критичним у певний момент, але загрожує при накопиченні, вводимо:

$$CRE(t) = \int_0^t R(\tau) \cdot d\tau . \quad (17)$$

За допомогою (17) дозволяється оцінка загального навантаження на систему безпеки за проміжок часу  $[0, t]$ .

12. Ймовірність множинного ризику (Multi-risk interaction function). Якщо два або більше незалежних ризику діють одночасно, тоді:

$$P(R_1 \cap R_2 \cap \dots \cap R_n) = \prod_{i=1}^n P(R_i), \quad (18)$$

а якщо ризики корельовані, то з урахуванням коефіцієнтів взаємозв'язку  $\rho_{ij}$ :

$$P_{corr} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \cdot P(R_i) \cdot P(R_j) . \quad (19)$$

Це критично для складних сценаріїв (наприклад, технічний збій, плюс людська помилка, плюс складне довкілля).

13. Функція ефективності системи запобігання (Prevention Effectiveness Index). Оцінка того, наскільки система безпеки реально знижує потенційний ризик:

$$PEI = 1 - \frac{P(R|B)}{P(R|\neg B)}, \quad (20)$$

де  $P(R|B)$  – ймовірність аварії при наявності бар'єра,  $P(R|\neg B)$  – без бар'єра. Чим ближче  $PEI$  до 1, тим ефективніше система безпеки.

14. Інтервал часу до критичного стану (Time-to-Failure Estimate). При відомому градієнті ризику можна наближено обчислити залишковий час до досягнення граничного рівня:

$$T_{crit} = \frac{S_{cr} - S(t)}{\frac{dS}{dt}} \quad (21)$$

Це дозволяє запускати попередження не за фактом, а проактивно.

15. Структурна стійкість системи безпеки (Redundancy Coverage Index). Якщо система має резервні модулі, то:

$$RCI = \frac{N_{act} + N_{back} \cdot \eta}{N_{total}} \quad (22)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт надійності резерву (0.8–1.0),  $N_{act}$  – активні модулі,  $N_{back}$  – резерви. Це дозволяє враховувати структурну надмірність, а не тільки функціональну ефективність.

Використання запропонованого алгоритму дозволяє не лише здійснювати моментну оцінку експлуатаційної безпеки судна з урахуванням фізичних, технічних і інформаційних чинників, але й прогнозувати динаміку ризику. Комбінація ймовірнісного моделювання, функцій деградації, вагового аналізу підсистем і методів прогнозування формує цілісну платформу для прийняття рішень у реальному часі. Важливо підкреслити, що модель здатна враховувати множинні сценарії, адаптуватися до змін середовища й технічного стану, а також формувати конкретні рекомендації для запобігання аваріям. Такий підхід створює надійне підґрунтя для цифрового управління безпекою в морській навігації та закладає основу для побудови автоматизованих систем підтримки судноводія в критичних умовах.

**Методика моделювання.** Метою, на етапі моделювання, є числова реалізація та подальша верифікація інтегрованої моделі забезпечення експлуатаційної безпеки судна в умовах змінного середовища, технічної невизначеності та деградації бар'єрів безпеки. Безумовна, реальна верифікація можлива лише в особливих умовах. Саме тому методика базується на поетапному використанні математичних виразів моделі, таблиць сценаріїв, вхідних технічних даних систем судна та програмній реалізації симуляцій.

Для модельного дослідження обрано чотири ключові підсистеми судна: система керування, енергетична установка, навігаційна система та комунікаційний модуль (зв'язок). Для кожної підсистеми визначено базову ймовірність відмови, початкову ефективність бар'єра, коефіцієнт деградації, а також вагові коефіцієнти критичності. Дані наведено у табл. 1. Сценарії моделювання охоплюють як нормальну експлуатацію, так і ускладнені умови – з комбінованим впливом середовища та технічних відмов.

Таблиця 1 – Алгоритм моделювання

Крок моделювання	Вхідні дані	Вихідні дані
1. Ініціалізація вхідних параметрів	$P(F), P(C), P(B), t$ з таблиці сценаріїв	Початкові значення для сценарію
2. Обчислення ймовірності аварії $P(R)$	$P(R)$	$F, C, B, P(F), P(C), P(B)$ – формула (1)
3. Розрахунок деградації ефективності $E_B(t)$	$E_0, \lambda, t$ – експоненційна модель	$E_B(t)$ для кожного бар'єра
4. Оцінка стану $S$ і індексу $SIRI$	$R_j, w_j, E_{Bj}$ – з моделі	Індивідуальні $S_j$ , інтегральний $SIRI$
5. Розрахунок запасу $M$ , часу $T_{crit}$	$SIRI, S_{cr}, dR/dt$	Час до досягнення критичного рівня
6. Прогнозування $LSTM$	Часові ряди $F, C, B$	Прогнозоване $R^{\wedge}_{t+1}$
7. Генерація рішень	Всі попередні результати	Рекомендації: резерв, тривога, контроль

Процес моделювання реалізується як послідовність семи кроків, описаних у таблиці 1. На першому етапі відбувається ініціалізація вхідних параметрів на основі заданого сценарію. Далі розраховується ймовірність аварії згідно з умовною ймовірнісною формулою. Третій крок це моделювання експоненційної деградації ефективності бар'єрів. На основі отриманих значень формується оцінка безпеки окремих підсистем, а також агрегований індекс інтегрованого ризику судна (*SIRI*). Наступні етапи включають оцінку запасу безпеки та прогноз залишкового часу до критичного стану. Шостий крок, прогнозування майбутнього ризику із застосуванням моделі *LSTM*. На завершальному етапі система генерує рекомендації для переходу в безпечний режим або активації резервного контролю.

Запропонована методика забезпечує реалізацію математичної структури інтегрованої моделі безпеки у вигляді поетапного алгоритму, здатного адаптуватися до конкретних умов експлуатації судна.

Чітке розмежування вхідних параметрів, аналітичних розрахунків та вихідних індикаторів дозволяє ефективно аналізувати складні сценарії розвитку подій, включно з деградацією технічних елементів, дією множинних ризиків та реакцією захисних систем. Гнучкість реалізації в цифровому середовищі дає змогу легко масштабувати модель, інтегрувати її у корабельні інформаційні системи, а також проводити навчальні симуляції для екіпажу. Результати, отримані за цією методикою, дозволяють не лише кількісно оцінити рівень безпеки, але й здійснювати своєчасне прогнозування критичних станів та ініціювати запобіжні дії.

У наступному розділі статті наведено деякі приклади застосування методики до реалістичних сценаріїв, що дозволяє верифікувати модель та проаналізувати її ефективність.

**Результати та обговорення.** На основі запропонованого алгоритму та описаної методики проведено моделювання для п'яти типових сценаріїв експлуатації судна, що охоплюють як штатні умови, так і аварійні ситуації з деградацією технічних елементів. Для кожного сценарію розраховано умовну ймовірність аварійної події  $P(R)$ , локальні оцінки ризику для чотирьох ключових підсистем (система керування рухом –  $S_{кер}$ , енергетична система судна –  $S_{ен}$ , навігаційна система –  $S_{нав}$  та система зв'язку –  $S_{зв}$ ), інтегрований індекс безпеки судна *SIRI*, а також запас безпеки  $M = S_{cr} - SIRI$ , де  $S_{cr} = 0,05$  є граничним значенням, за яким ініціюється аварійна реакція.

Таблиця 2 – Результати моделювання показників безпеки судна за експлуатаційними сценаріями

Сценарій	$P(R)$	$S_{кер}$	$S_{ен}$	$S_{нав}$	$S_{зв}$	<i>SIRI</i>	<i>M</i>
Базовий	0.0058	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0011	0.0489
Погіршення погоди	0.0134	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	0.0025	0.0475
Втрата бар'єра	0.0058	0.0007	0.0006	0.0006	0.0005	0.0023	0.0477
Комбінований вплив	0.0153	0.0024	0.0019	0.0018	0.0015	0.0076	0.0424
Критичне навантаження	0.0192	0.0035	0.0027	0.0026	0.0020	0.0109	0.0391

У базовому сценарії ймовірність інциденту становить лише 0,58 %, а інтегральна оцінка безпеки  $SIRI = 0,0011$ , що значно нижче критичного рівня. Однак уже при погіршенні погодних умов показник зростає більш ніж удвічі, а при втраті резервного бар'єра попри відносно сталий рівень  $P(R)$  – збільшується вплив деградації бар'єра, що відображено у вищих значеннях локальних ризиків.

Найбільш небезпечним виявився сценарій критичного навантаження, де одночасна дія зовнішнього середовища та внутрішніх відмов призводить до зростання *SIRI* до 0,0109, майже 22 % від порогового значення. Запас безпеки у цьому випадку становить лише 0,0391, що свідчить про наближення до аварійної зони, при цьому найуразливішими залишаються системи керування й енергетики.

Таким чином, попередні результати підтверджують здатність моделі реагувати на зміну умов, визначати розрахунки ризику залежно від технічних і середовищних факторів, а також надавати кількісну основу для запуску автоматичних або ручних механізмів реагування.

Графік, наведений на рис. 2, показує, як інтегрований індекс ризику (*SIRI*) зростає зі зміною сценаріїв – найвищі значення спостерігаються у критичних режимах.

Цей графік демонструє зростання індексу *SIRI* залежно від складності сценарію. Найнижчі значення відповідають базовим умовам, тоді як у комбінованому та критичному сценаріях індекс значно підвищується. Це свідчить про наближення до межі безпеки, за якою система має активувати аварійне реагування.

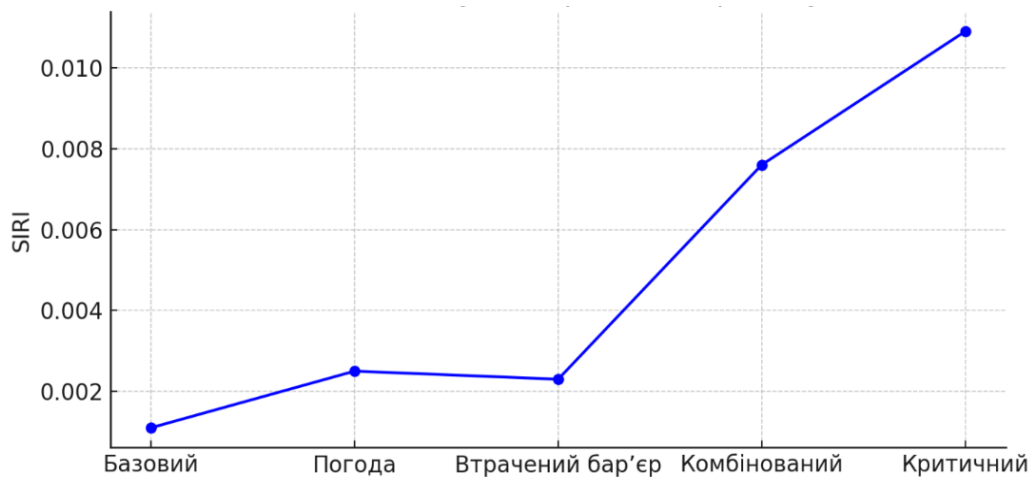


Рисунок 2 – Динаміка індексу інтегрованого ризику (*SIRI*)

Графік запасу безпеки (*M*) представлений на рис. 3, демонструє зменшення стійкості системи – чим нижче значення, тим ближче до активації аварійного реагування.

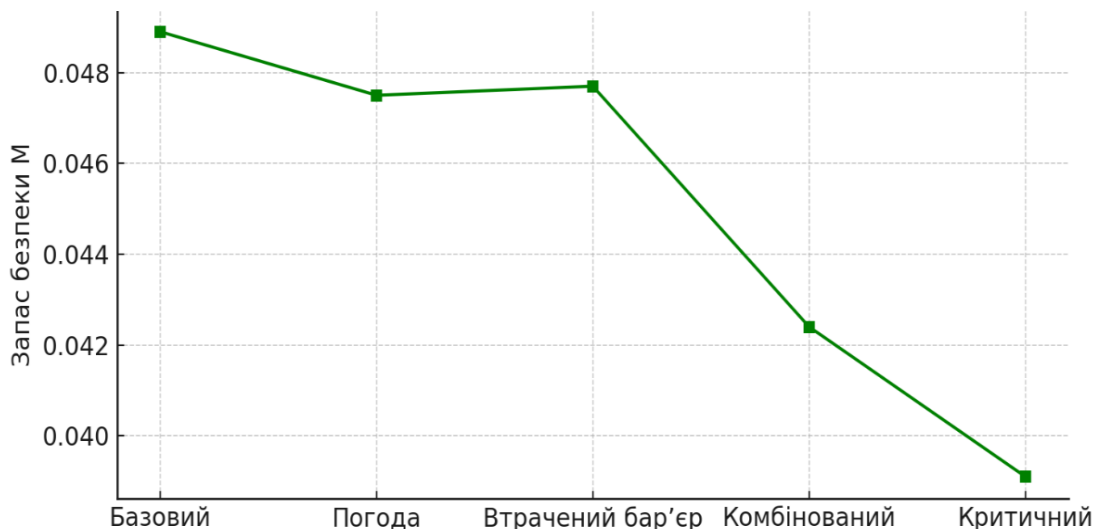


Рисунок 3 – Запас безпеки (*M*) у різних сценаріях

На графіку чітко видно, як з ускладненням умов експлуатації зменшується запас безпеки. У критичних умовах запас знижується до значення менш як 0,04, що свідчить про необхідність попереджувальних дій для уникнення системної відмови або інциденту.

Порівняльний графік підсистем (рис. 4) ілюструє, що найбільший ризик у критичних умовах припадає на системи керування та енергетичного забезпечення.

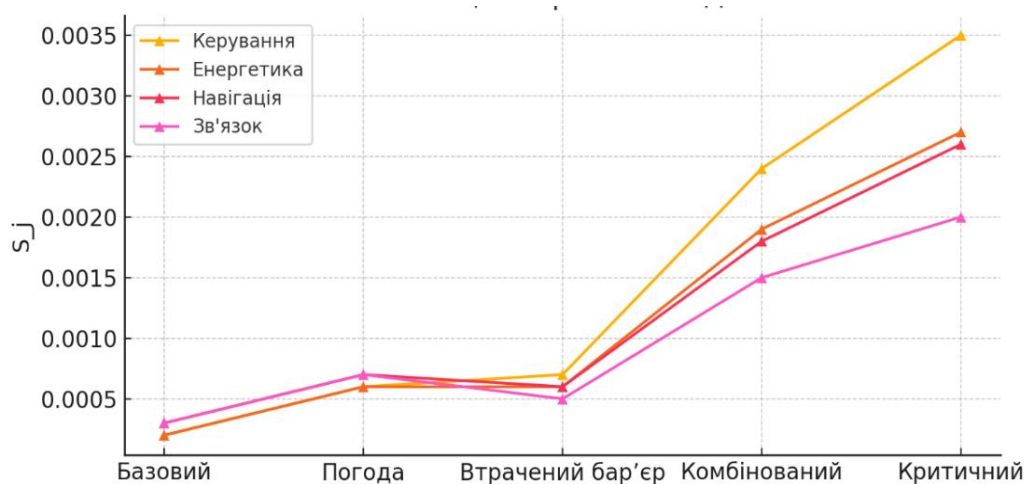


Рисунок 4 – Локальні оцінки ризиків підсистем

Приведений графік порівнює, як різні підсистеми реагують на зміну сценаріїв. У критичних випадках найбільш вразливими виявляються системи керування й енергетики, які мають вищі локальні ризики  $S_j$ . Це дає змогу точково спрямовувати зусилля на зміцнення саме тих компонентів, які є ключовими в конкретному контексті.

На рис. 5 продемонстровано, що зменшення ефективності бар'єрів залежно від тривалості експлуатації, є експоненційним.

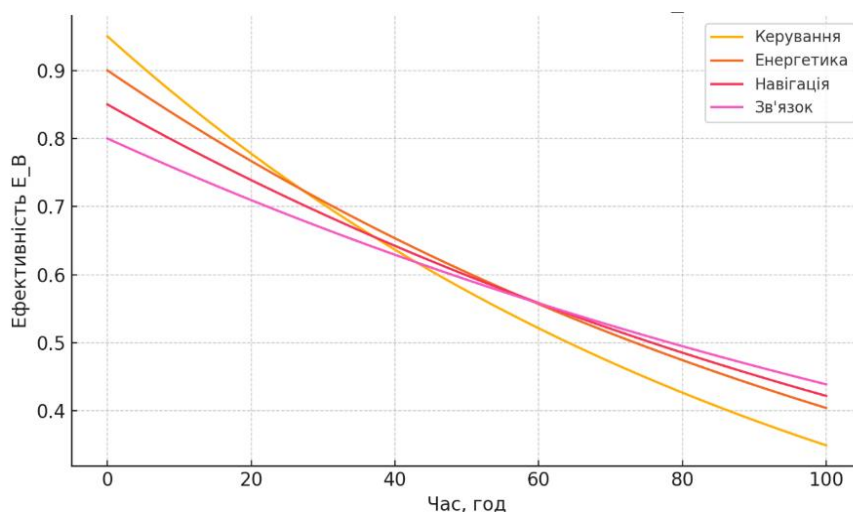


Рисунок 5 – Деградація ефективності бар'єрів  $E_{в}(t)$

Як видно з графіка, найшвидше деградує бар'єр системи керування (у наведеному прикладі вже через 100 годин його ефективність знижується до приблизно 37 %). Найбільш стійким виявляється бар'єр у системі зв'язку, що повільно втрачає здатність протидіяти ризикам, що дозволяє завчасно планувати технічне обслуговування, заміну елементів безпеки, оновлення програмного забезпечення, інших засобів, що зазнають зносу.

**Висновки.** У ході дослідження розроблено та протестовано інтегровану модель забезпечення експлуатаційної безпеки судна, яка враховує комбінацію технічних, інформаційних і середовищних чинників. Пропонований математичний апарат моделі базується на поєднанні ймовірнісного аналізу, функцій деградації бар'єрів безпеки, агрегованої оцінки стану підсистем і прогнозного модуля на основі нейромережі LSTM. Результати моделювання підтверджують, що навіть за незначного збільшення ймовірності відмови або втрати ефективності бар'єра загальний індекс ризику судна ( $SIRI$ ) може швидко досягати рівнів, які вимагають втручання.

Під час симуляцій типових сценаріїв виявлено, що найбільше навантаження припадає на підсистеми керування та енергетичні системи, особливо в умовах комбінованого або критичного впливу. Залежності ризику, запасу безпеки та ефективності бар'єрів

продемонстрували високу чутливість системи до тривалості експлуатації та впливу динаміки зовнішнього середовища. Розроблена модель дозволяє здійснювати як оперативний аналіз, так і превентивне прогнозування небезпечних станів, що підвищує рівень ситуаційної обізнаності екіпажу або автономного контролера.

Слід вважати, що запропонована модель є ефективним інструментом інтегрованого управління безпекою суден і може бути адаптована до реальних умов експлуатації суден різного типу. Подальші дослідження повинні включати розширення кількості підсистем, інтеграцію з сенсорами у режимі реального часу та навчання моделі на основі історичних інцидентів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Deng W., Ma X. & Qiao W. Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 139, 104581. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104581>.
2. Melnyk O., Onishchenko O., Drozhzhyn O., Pasternak O., Vilshanyuk M., Zayats S. & Shcheniavskyi G. The ship safety evaluation and analysis on the multilayer model case study. *E3S Web of Conferences*, 501, 01018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450101018>.
3. Melnyk O., Onyshchenko S., Koskina Y., Aleksandrovska N., Drozhzhyn O., Maluha E., Pulyaev I., & Bondaryuk M. Full overlap ship security model: An integrative approach to shipboard equipment information security. *E3S Web of Conferences*, 501, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450102002>.
4. Karimi N., Javanmardi E., Nadaffard A. & Facchini F. Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach. *Ocean & Coastal Management*, 263, 107620. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107620>.
5. Fan C., Montewka J., Bolbot V., Zhang Y., Qiu Y. & Hu S. Towards an analysis framework for operational risk coupling mode: A case from MASS navigating in restricted waters. *Reliability Engineering & System Safety*, 248, 110176. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110176>.
6. Wang Y., Kadakia Y., Wu Z. & Christofides P. D. An overview of control methods for process operational safety and cybersecurity. *Methods in Chemical Process Safety*, 8, 1–50. <https://doi.org/10.1016/bs.mcps.2024.07.006>.
7. Naserbegi A., Aghaie M., Sadeghi K., Ghazaie S., & Sokolova E. Improving operational flexibility of the integrated pressurized water reactor with the MED-TVC desalination system by control logic systems in the off-design mode. *Nuclear Engineering and Design*, 430, 113702. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113702>.
8. Kang G., Im J. & Lee C. Operational strategy to minimize operating cost in LNG terminal using a comprehensive numerical boil-off gas model. *Energy*, 296, 130878. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130878>.
9. Guo W., Zhang X., Ge Y. & Du Y. Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 197, 104046. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104046>.
10. Mochizuki H. Summary of researches on operational characteristics and safety of molten salt fast reactors based on neutronics and thermal-hydraulics coupling analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 435, 113941. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113941>.
11. Deng W., Ma X. & Qiao W. A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109884. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109884>.
12. Hellas M. S., Chaib R., Nettour D. & Zerrouki H. A new approach proposal for ensuring security engineering through barrier and operational quantitative risk analysis (BOQRA). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 91, 105390. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105390>.

13. Zhang M., Wang H., Conti F., Manderbacka T., Remes H. & Hirdaris S. A hybrid deep learning method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 145, 110158. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110158>.

14. Obeng F., Domeh D., Khan F., Bose N. & Sanli E. An operational risk management approach for small fishing vessel. *Reliability Engineering & System Safety*, 247, 110104. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110104>.

15. Onishchenko O. A., Melnyk O. M., Kurdiuk S. V., Drozdenko O. I., Havryliuk T. K. & Burlachenko D. A. Zastosuvannya metodiv mashynnoho navchannia dlia optymizatsii marshrutiv i zavdan avtonomnykh nadvodnykh aparativ [Application of machine learning methods for optimizing routes and tasks of autonomous surface vehicles]. *Nauka i tekhnika*, 12(40), 1372–1386. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386).

## REFERENCES

1. Deng, W., Ma, X., & Qiao, W. (2025). Resilience-oriented safety barrier performance assessment in maritime operational risk management. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 139, 104581. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104581>.

2. Melnyk, O., Onishchenko, O., Drozhzhyn, O., Pasternak, O., Vilshanyuk, M., Zayats, S., & Shcheniavskiy, G. (2024). The ship safety evaluation and analysis on the multilayer model case study. *E3S Web of Conferences*, 501, 01018. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450101018>.

3. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Koskina, Y., Aleksandrovska, N., Drozhzhyn, O., Maluha, E., Pulyaev, I., & Bondaryuk, M. (2024). Full overlap ship security model: An integrative approach to shipboard equipment information security. *E3S Web of Conferences*, 501, 02002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202450102002>.

4. Karimi, N., Javanmardi, E., Nadaffard, A., & Facchini, F. (2025). Systematic analysis and optimization of operational delay factors in port supply chains using a hybrid DEMATEL-OPA-DGRA approach. *Ocean & Coastal Management*, 263, 107620. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107620>.

5. Fan, C., Montewka, J., Bolbot, V., Zhang, Y., Qiu, Y., & Hu, S. (2024). Towards an analysis framework for operational risk coupling mode: A case from MASS navigating in restricted waters. *Reliability Engineering & System Safety*, 248, 110176. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110176>.

6. Wang, Y., Kadakia, Y., Wu, Z., & Christofides, P. D. (2023). An overview of control methods for process operational safety and cybersecurity. *Methods in Chemical Process Safety*, 8, 1–50. <https://doi.org/10.1016/bs.mcps.2024.07.006>.

7. Naserbegi, A., Aghaie, M., Sadeghi, K., Ghazaie, S., & Sokolova, E. (2024). Improving operational flexibility of the integrated pressurized water reactor with the MED-TVC desalination system by control logic systems in the off-design mode. *Nuclear Engineering and Design*, 430, 113702. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113702>.

8. Kang, G., Im, J., & Lee, C. (2024). Operational strategy to minimize operating cost in LNG terminal using a comprehensive numerical boil-off gas model. *Energy*, 296, 130878. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130878>.

9. Guo, W., Zhang, X., Ge, Y., & Du, Y. (2025). Deep Q-network and knowledge jointly-driven ship operational efficiency optimization in a seaport. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 197, 104046. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104046>.

10. Mochizuki, H. (2025). Summary of researches on operational characteristics and safety of molten salt fast reactors based on neutronics and thermal-hydraulics coupling analysis. *Nuclear Engineering and Design*, 435, 113941. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2025.113941>.

11. Deng, W., Ma, X., & Qiao, W. (2024). A novel methodology to quantify the impact of safety barriers on maritime operational risk based on a probabilistic network. *Reliability Engineering & System Safety*, 243, 109884. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109884>.

12. Hellas, M. S., Chaib, R., Nettour, D., & Zerrouki, H. (2024). A new approach proposal for ensuring security engineering through barrier and operational quantitative risk analysis (BOQRA). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 91, 105390. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105390>.

13. Zhang, M., Wang, H., Conti, F., Manderbacka, T., Remes, H., & Hirdaris, S. (2025). A hybrid deep learning method for the real-time prediction of collision damage consequences in operational conditions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 145, 110158. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110158>.

14. Obeng, F., Domeh, D., Khan, F., Bose, N., & Sanli, E. (2024). An operational risk management approach for small fishing vessel. *Reliability Engineering & System Safety*, 247, 110104. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110104>.

15. Onishchenko, O. A., Melnyk, O. M., Kurdiuk, S. V., Drozdenko, O. I., Havryliuk, T. K., & Burlachenko, D. A. (2024). Zastosuvannya metodiv mashynnoho navchannya dlia optymizatsii marshrutiv i zavdan avtonomnykh nadvodnykh aparativ [Application of machine learning methods for optimizing routes and tasks of autonomous surface vehicles]. *Nauka i tekhnika*, 12(40), 1372–1386. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386).

**Nykytyuk P., Melnyk O. CREATION OF AN INTEGRATED MODEL FOR ENSURING OPERATIONAL SHIP SAFETY**

*The article proposes a novel integrated mathematical model meticulously designed to enhance the operational safety of ships. This comprehensive model seamlessly combines several critical components: probabilistic risk assessment, providing quantitative measures of potential hazards; an in-depth analysis of the degradation of safety barriers, tracking the erosion of protective layers over time or under stress; an aggregate evaluation of the real-time state of various ship subsystems, unifying heterogeneous data for a holistic view; and robust risk prediction capabilities grounded in advanced neural network technologies, enabling the forecasting of future risk trajectories based on learned patterns from complex operational data.*

*Building upon a robust modeling methodology, a series of five distinct operational scenarios were rigorously simulated. These scenarios were carefully crafted to encompass a wide spectrum of ship functioning conditions, critically considering dynamic environmental changes, various technical failures (e.g., machinery malfunctions, system breakdowns), and the potential loss of efficiency in existing security and safety systems. Such comprehensive scenario testing allows for a thorough validation of the model's performance across diverse and challenging operational contexts.*

*The simulation results unequivocally demonstrate the proposed model's exceptional ability to detect dangerous conditions at remarkably early stages of their development, far before they escalate into critical incidents. Furthermore, the model is capable of generating precise quantitative risk assessments, offering clear numerical insights into potential threats. Crucially, it also produces actionable recommendations for preventive response, empowering decision-makers with timely and relevant guidance to avert adverse events. The embedded indicators for integrated risk, safety margin, and continuous safety barrier degradation monitoring collectively confirm the system's high information content, providing a rich, multi-faceted understanding of the ship's safety status. This also highlights its remarkable adaptability within a highly dynamic maritime environment, where conditions can change rapidly and unpredictably. The innovative approach presented in this work can therefore serve as a foundational basis for the creation of sophisticated functional platforms dedicated to comprehensively managing the safety of marine vessels. Moreover, it offers significant potential for seamless integration into modern navigation and broader information management systems, thereby paving the way for more resilient, predictive, and proactively managed maritime operations in the future.*

**Key words:** maritime transport; operational safety; integrated model; safety barriers; risk assessment; degradation; forecasting; ship systems; management process; complex; adaptation; system monitoring; management processes; decision support.

© Никитюк П. В., Мельник О. М.

Статтю прийнято до редакції 16.06.2025

## ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ АПРОКСИМАЦІЇ ПОПРАВКИ НА ХВИЛЮВАННЯ ПРИ РОЗРАХУНКУ ГЛИБИНИ ПІД КІЛЕМ

**Петровський А. В.**, к.т.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: andreyanybody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3337-9577;

**Бень А. П.**, к.т.н., професор кафедри судноводіння, проректор з науково-педагогічної роботи Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: a\_ben@i.ua, ORCID: 0000-0002-9029-3489.

Погодні умови мають значний вплив на судно під час переходу, а здатність утримувати правильну позицію та точно визначати безпечні глибини є одним з найважливіших факторів безпечної навігації. У статті проведено аналіз реальних досліджень з розрахунку поправки на хвилювання при визначенні Under Keel Clearance судна. Проведено параметричну ідентифікацію даних та отримано аналітичні залежності поправки на хвилювання від довжини судна та висоти хвиль у найбільш поширених для експлуатації суден діапазонах хвиль при розрахунку Under Keel Clearance. Використані методи аналізу, інтерполяції та екстраполяції дозволили отримати квадратичні залежності, обмежені амплітудою хвиль для всього обраного діапазону хвиль при відповідній довжині судна. Розроблено програмне забезпечення WaveCheckRoute мовою програмування Python з наданням рекомендацій щодо збільшення поправки на хвилювання на кожному часовому кроці обраних карт погоди і маршруту з метою впровадження у навчальний процес для курсантів одночасно із тренажером NaviSailor 4000.

**Ключові слова:** глибина під кілем; поправка на хвилювання; безпечна ізобата; безпечна глибина; параметри навігаційної безпеки ЕКНІС; попередня прокладка; вплив вертикального переміщення судна на кліренс.

**DOI:** 10.33815/2313-4763.2025.1.30.222-236

**Вступ.** Морські перевезення складають найпотужнішу частину транспортних перевезень у світі. Від них залежить багато економік світу: достатньо пригадати затримку судна «Evergiven» у Суецькому каналі. Всього тиждень затримки, а збитки – на млрд доларів у різних країнах. Своєчасність прибуття судна дуже важливе для сучасних логістичних ланок постачання. У свою чергу на своєчасність впливають погодні умови, аварії. За останні декілька років нещасні випадки навігаційного характеру, такі як посадка на мілину, траплялися у 40% усіх випадків: «"Grounding" is the incident with the most contributing factors associated with operational planning» [1] (р. 16). При дослідженні таких випадків можна визначити декілька різновидів помилок штурманів:

– невірні налагодження електронної картографічної навігаційної інформаційної системи (ECDIS);

– людський фактор;

– помилки при маневруванні;

– неможливість керування судном.

Невміння коректно налагодити параметри безпеки ECDIS, як на стадії попередньої прокладки, так і на виконавчій, офіцерським складом навігаційного містка, дорого коштують судноплавним компаніям.

**Постановка проблеми.** При плануванні переходу є декілька параметрів, які необхідно розраховувати по кожному плечу маршруту: безпечну ізобату (Safety Contour), безпечну глибину (Safety depth) – як основні та ізобату мілководдя (Shallow Contour), глибоководну ізобату (Deep Contour) – як додаткові. До параметру Safety Contour складовою компонентою входить глибина під кілем (Under Keel Clearance – UKC) [2, 3]:

$$\text{SAFETY CONTOUR} = \max(\text{SHIP'S STATIC DRAFT}) + \text{UKC} - \text{Height of Tide}, \quad (1)$$

де *Height of Tide* – висота припливу, м.

$$UKC = SQUAT + \Delta T_{swell} + \Delta T_{dock\ allowance} + \Delta T_{list} + \Delta T_{pitch} + CATZOC + Min\ Company\ Requirements, \quad (2)$$

де Squat – просідання судна, м;

$\Delta T_{swell}$  – збільшення осадки при хвилюванні (поправка на хвилювання), м;

CATZOC – похибка категорії зони довіри карти, м;

$\Delta T_{dock\ allowance}$  – зміна осадки судна завдяки зміні щільності портових/обмежених вод у порівнянні із відкритим морем, м;

$\Delta T_{pitch}$  – збільшення осадки за рахунок диференту, м;

$\Delta T_{list}$  – збільшення осадки судна при крені, м;

*Min Company Requirements* – вимоги щодо мінімального кліренсу з політики судноплавної компанії.

На UKC судна мають вплив багато факторів і один з них – хвилі (параметр  $\Delta T_{swell}$  при розрахунках запасу під кілем): вітри наганяють вітрові хвилі, іншого походження хвилі – мара (swell), більш потужніші та з більшою акваторією розповсюдження. Поправка на хвилювання є суттєвим фактором зміни UKC, іноді це може скласти додаткові метри глибини. Збільшення  $\Delta T_{swell}$  може негативно вплинути на розклад руху судна внаслідок можливої зміни маршруту на деяких плечах прокладки при дослідженні глибин акваторій. Вміння прогнозувати та своєчасно регулювати необхідний UKC, у тому числі за рахунок зміни  $\Delta T_{swell}$ , збільшує безпеку судноплавства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наразі проведено досить багато досліджень щодо з'ясування залежності впливу хвиль на судно. По перш за все, це дослідження щодо зв'язку параметрів хвиль між собою та класифікація хвиль. У роботі [4] показана: «Relationship between speed, length, and period of waves in deep water, based upon the theoretical relationship between period and length» [4] (Fig. 3702c) і надано таблицю часу: «Minimum Time (T) in hours that wind must blow to form waves of H significant height (in feet) and P period (in seconds)» [4] (Table 3702b). По останній таблиці можна оцінити час, за який хвилі набудуть відповідної висоти – «значна висота хвиль» (Significant height of waves). Автор [5] оцінив вплив хвиль на судно, розподіл хвильового навантаження та розрахування вертикального занурення судна під час кільового хвилювання і описав різні моделі з отримання періоду, довжини хвиль у різних акваторіях – все це для оцінки ризиків. Надаються поширені приклади з математичного моделювання впливу хвильового навантаження на судно і різні моделі з отримання періоду, довжини хвиль у різних акваторіях у [6] роботі. Автори [7] наводять поширені приклади з математичного моделювання впливу хвильового навантаження на судно. Однак, найбільш важливими з погляду перевезень є дослідження стосовно практичного використання отриманих знань з поведінки хвиль.

Звісно, що для безпечного судноплавства, визначення безпечних глибин вдовж маршруту руху – є однією з головних умов, і, калькуляції UKC присвячено досить багато робіт, наприклад [2, 8, 9], і з року в рік, з'являються нові, більш конкретизуючі та пояснючі, у тому числі із використанням параметра хвильового запасу. У [9] надаються рекомендації щодо налагодження параметрів ECDIS, наприклад: в обмежених водах, якірній стоянці, прибережному судноплавстві, відкритому океані. Однак, при перевірці маршруту не надається можливості в ECDIS перевіряти кліренс за погодними умовами, але повідомляється, що це обов'язково потрібно робити.

Приклад посадки на мілину балкера Pasha Bulker на Nobby's Beach, Ньюкасл, Новий Південний Уельс, 8 червня 2007 року [10] досить показово доказує необхідність врахування хвильового запасу у тому числі. Також можливі ситуації посадки на мілину поблизу портів, на що впливає також і недостатнє врахування хвиль у портах з обмеженою глибиною. Порти

з неглибокими акваторіями, наприклад, у Північному морі, часто стикаються з проблемою, коли хвилі знижують ефективну осадку судна. Історії інцидентів: у гавані Роттердама, коли було зафіксовано декілька випадків (штормові хвилі спричинили контакт суден із дном під час заходу); порти Австралії, де відомі випадки посадок на мілину під час штормів, пов'язані з неврахуванням в УКС хвильового запасу. Розроблені системи оптимізації руху судна (SPOS) системи, їх аналоги, які оптимізують маршрут, розклад руху судна, мають великий функціонал, але теж не надають конкретні рекомендації щодо налагодження параметрів навігаційної безпеки при зміні погодних умов. Деякі програмні продукти можуть надавати обмеження акваторій за обраними критеріями погодних умов, наприклад, Von Voyage System, але конкретних значень і рекомендацій для розрахунку УКС теж не надають.

Аналіз наукових досліджень приводить до думки, що станом на зараз немає достатньо спрощених моделей з отримання параметра  $\Delta T_{swell}$  для УКС. У роботі [8] надається методика розрахунку УКС, але дані щодо поправки на хвилювання враховуються без надання інформації їх отримання – лише як значна висота хвиль (Significant height of waves). Більш коректним є використання математичних залежностей та врахування, що висота  $\Delta T_{swell}$  може досягати значення у моделі лише до значення власної амплітуди. При достатньому збільшенні висоти хвиль, вони стають більш крутими та потужними. Їх вплив на судно перестає бути виключно енергетичним і починає визначатися геометричними обмеженнями:

- судно не може «зануритися» у хвилю більше, ніж на висоту амплітуди, оскільки це фізичне обмеження;
- після певної висоти хвилі, вертикальні коливання судна обмежуються його розмірами та стійкістю.

У роботі [12] розглядаються вертикальні коливання судна у хвилюванні, але використовуються теж Significant height of waves, що перебільшує значення можливого збільшення УКС шляхом поправки на хвилювання як мінімум у 2 рази. Публікації [2, 9] надають пояснення з багатьох параметрів для отримання УКС, але не повне розуміння, як розраховувати таку поправку. Розглядаються моделі її збільшення у складі УКС [13], але теж не надається конкретної рекомендації щодо величини, яку потрібно додавати до УКС. При цьому результати досить гарно підходять для подальшого використання вже після отриманої інформації щодо напрямку хвиль для з'ясування небезпечних параметрів хвиль. Наводиться діаграма ризику неконтрольованого ковзання при попутному або косо-попутному хвилюванні (Risk of surf-riding in following or quartering seas) [14], яка показує небезпечні зони при існуванні можливості відобразити розповсюдження хвиль на карті, але мова не йде про поширення досягнень та використання якогось програмного забезпечення для навчальних або професійних цілей. Загальне професійне користування будь-якими науковими розробками цієї тематики є складним. Те ж стосується і тренажерів для навчання судноводіїв. Описуються вимоги до тренажерів – симуляторів [15], у тому числі з використанням погоди: «...create a real-time operating environment, including navigation control and communications instruments and equipment appropriate to the navigation and watchkeeping tasks to be carried out and the manoeuvring skills to be assessed; and realistically simulate «own ship» characteristics in open-water conditions, as well as the effects of weather, tidal stream and currents» [15] (р. 8). Звісно, тренажер NaviTrainer 5000 на базі Херсонської державної морської академії (ХДМА) надає таку можливість, але перевірки побудованого маршруту на небезпечні погодні умови не робить, хоча і моделює її параметри.

Аналіз [16], щодо правил несення штурманської вахти, виявив таблицю розрахованих значень  $\Delta T_{swell}$  на базі емпіричних даних, але вона дуже обмежена, і, попри те, що вона рекомендована до використання в Україні (простота та швидкість використання у навчальних та професійних цілях), потрібно досить часто перераховувати інтерполяційним методом проміжні значення щодо довжини судна та кроку хвиль у 0,5 м (табл. 1):

Таблиця 1 – Значення поправки на хвилювання при відповідних: довжині судна та висоті хвиль [16]

Довжина судна, м	Висота хвиль, м			
	1	2	3	4
75	0.2	0.7	1.2	2.0
100	0.2	0.6	1.1	1.7
150	0.1	0.4	0.8	1.3
200	0.1	0.3	0.7	1.1
250	–	0.3	0.6	1.0
300	–	0.2	0.5	0.8

Додатково, для збільшення точності врахування  $\Delta T_{swell}$  обов'язково потрібно аналізувати курсові кути хвиль на ділянках маршруту (діаграми Богданова, Ремеза). На жаль, у таблиці обмежена кількість значень висоти хвиль до 4 м, що було обумовлено можливостями отримання емпіричних даних. Тому задля спрощення використання у професійній діяльності таких таблиць бажано було б мати готові розраховані дані  $\Delta T_{swell}$  з кроком довжини судна 10 м та кроком висоти хвиль 0,5 м. Менші кроки для довжини судна дадуть підвищення точності, але це не суттєво при відповідних довжинах судна. Наприклад, при розрахуванні  $\Delta T_{swell}$  для довжини 200 м та 150 м – різниця 50 м, а різниця  $\Delta T_{swell}$  на хвилях висотою 4 м складає всього 0,2 м, тобто кожен 10 м довжини судна – це 4 см; якщо розглядати зменшення кроку висоти хвиль, то для 0,5 м висоті хвиль максимальне значення  $\Delta T_{swell}$  очікується до значення амплітуди хвилі, тобто до 25 см, але тут ще потрібно враховувати неточність вимірювання та не постійність висот хвиль [4–6, 14], саме з чого і обирають висоту Significant height of waves. На даний час вже є розроблені і використані у професійній діяльності наукові розробки [14]. Розроблено та протестовано прилад Wave radar analyzer, який дозволяє визначати параметри хвиль наочно та моделювати за регресійними моделями хвилі, побудовано схему класифікації даних хвиль у регресійній моделі. Звісно, така точність (завдяки використанню приладу саме на місці подій) вимагається при виконавчій прокладці, але все ж таки не надає рекомендацій щодо врахування параметра  $\Delta T_{swell}$  у УКС, лише розраховує значну висоту хвильової складової мари і вимагає наявності встановленого приладу на борту судна.

У результаті сучасні дослідження хвиль та врахування їх впливу на судно достатньо досліджені, але рекомендацій, поширення у професійній/навчальній діяльності спрощених розрахунків у найбільш поширених діапазонах довжин суден та висоти хвиль з відповідними кроками, немає.

**Метою статті** є побудова аналітичних залежностей поправки на хвилювання від довжини судна та висоти хвиль у найбільш поширених для експлуатації суден діапазонах, отримання табульованих значень і програмного продукту для користування у навчальних цілях курсантами одночасно із тренажером NaviSailor 4000.

**Об'єктом дослідження** є визначення параметра поправки на хвилювання для розрахунку УКС.

**Методи дослідження:** методи інтерполяції, екстраполяції, аналізу отриманих даних. **Задачі дослідження:** розробка математичних моделей для табулювання значень поправки на хвилювання при різних висотах хвиль та довжин судна і розробка програмного продукту WaveCheckRoute, який повинен відображати з кроком отриманих погодних карт від програмного продукту ZyGrib (FreeWare) [17] позицію судна вдовж маршруту, напрямки вітру та висоти хвиль, розрахований для цієї позиції параметр  $\Delta T_{swell}$ , як рекомендований для додавання до УКС, відповідні небезпечні зони для додаткового обмеження навігаційного простору, наприклад, при перевищенні ліміту висоти хвиль. У рамках дослідження не підіймалися питання впливу: курсових кутів та частоти хвиль – на величину поправки на хвилювання; ступеню завантаженості судна – на амплітуду коливань судна.

**Основна частина.** Для розрахунку подальших значень параметра  $\Delta T_{swell}$  (залежно від довжини судна та висоти хвиль) для продовження табл. 1 по висоті хвиль, а також отримання проміжних значень, можна використати емпіричні формули або апроксимацію на основі наданих даних табл. 1 і намагатися отримати значення з відносною похибкою менше 10%.

Для підвищення точності моделей потрібно отримати додаткові точки, наприклад, проміжні за допомогою методу двохвимірної інтерполяції. Спочатку інтерполюють по рядках (3):

$$\Delta T_{swell_{x,j}} = \Delta T_{swell_{i,j}} + \frac{x - l_i}{l_{i+1} - l_i} (\Delta T_{swell_{i+1,j}} - \Delta T_{swell_{i,j}}) \quad (3)$$

і вже потім – по стовпцях (4):

$$\Delta T_{swell_{x,y}} = \Delta T_{swell_{x,j}} + \frac{y - H_j}{H_{i+1} - H_i} (\Delta T_{swell_{x,j+1}} - \Delta T_{swell_{x,j}}), \quad (4)$$

де  $l_i$  – значення довжини судна  $i$ -го кроку, м;

$H_j$  – значення висоти  $i$  хвилі;

$\Delta T_{swell_{i,j}}$  – відоме значення  $\Delta T_{swell}$  у клітинці ( $i, j$ );

$x$  – точка для інтерполяції по рядках;

$y$  – точка для інтерполяції по стовпцях.

Далі, для побудови екстраполяційних даних  $\Delta T_{swell}$  потрібно з'ясувати можливий тип функції залежності від висоти хвилі. Для кожного розміру судна вона буде власна внаслідок різного результату впливу хвиль на судна різної довжини. Енергія морської хвилі пов'язана з її характеристиками, такими як висота, довжина, період і щільність води. Морські хвилі переносять енергію завдяки руху води. Якщо хвилі відносно невеликі, то їх вплив на судно можна описати квадратичною залежністю. Це пов'язано з тим, що енергія хвилі прямо пропорційна квадрату її висоти (5):

$$E \sim H^2; \quad E = \frac{1}{8} \rho g H^2, \quad (5)$$

де  $E$  – енергія хвилі на одиницю площі, Дж/м<sup>2</sup>;

$\rho$  – густина води, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$H$  – висота хвилі (різниця між гребенем і западиною, у метрах).

Судно «вписується» у хвилю, і його рух (кільова хитавиця, вертикальні коливання) залежить від енергії хвилі. Саме тому квадратична залежність добре описує вплив хвиль на судно.

За отриманими проміжними результатами будують графіки залежностей з використанням пакета прогнозу від MS Excel 2016 з максимально можливим значенням  $R^2$ .

Наступним кроком є побудова таблиці всіх проміжних результатів, розрахованих по отриманих залежностях з метою виявлення відносної похибки по всіх кроках моделювання (довжин суден і висоти хвиль) для порівняння. Умовою врахування гарного результату моделювання по кожній позиції є значення відносної похибки не більше 10%.

Якщо отримані залежності повністю задовольняють умові похибки до 10%, то цільові значення  $\Delta T_{swell}$  по всіх довжинах розраховують і надалі для більших висот хвиль за умовою, що отримане значення не більше амплітуди хвилі. При цьому, якщо розраховане значення  $\Delta T_{swell}$  при відповідній висоті хвилі досягає амплітуди хвилі, то всі подальші розрахунки, при тій самій довжині судна, повинні здійснюватися за правилом, що  $\Delta T_{swell}$  дорівнює амплітуди хвилі (6):

$$\Delta T_{swell_{i,j}} = \begin{cases} f_i(H_j), & f_i(H_j) < H_j/2 \\ \frac{H_j}{2}, & f_i(H_j) \geq H_j/2 \end{cases}, \quad (6)$$

де  $f_i(H_j)$  – отримана аналітична функція  $f_i$  для судна довжиною  $i$ , при висоті хвиль  $H_j$ ;

$H_j$  – хвиля висотою Significant height of waves  $j$  кроку.

Якщо значення має більшу за 10% похибку, потрібно з'ясувати значущість похибки для абсолютних значень: висоти хвилі, розрахованого  $\Delta T_{swell}$  і довжини судна.

Використовуючи метод найменших квадратів на базі еталонних значень табл. 1, будують емпіричні залежності для подальшого розрахування  $\Delta T_{swell}$  залежно від висоти хвиль для кожної довжини судна (табл. 3) з кроком 10 м з використанням MS Excel 2016. Діапазон хвиль обирають як найбільш поширений для комерційних суден з урахуванням умов штормів.

**Основні результати та їх обговорення.** Після розрахунку методом двохвимірної інтерполяції (3), (4) по даним табл. 1 з кроком довжини судна 10 м та кроком висоти хвиль 0,5 м отримано  $\Delta T_{swell}$  (табл. 2):

Таблиця 2 – Загальна таблиця поправки на хвилювання з інтерполяційними значеннями

Довжина судна, м	Significant height of waves, м						
	2	3	4	5	6	7	8
1	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>	<b>2.5</b>	<b>3</b>	<b>3.5</b>	<b>4</b>
<b>75</b>	<b>0.2</b>	0.45	<b>0.7</b>	0.95	<b>1.2</b>	1.6	<b>2</b>
<b>80</b>	0.2	0.44	0.68	0.93	1.18	1.56	1.94
<b>90</b>	0.2	0.42	0.64	0.89	1.14	1.48	1.82
<b>100</b>	<b>0.2</b>	0.4	<b>0.6</b>	0.85	<b>1.1</b>	1.4	<b>1.7</b>
<b>110</b>	0.18	0.37	0.56	0.8	1.04	1.33	1.62
<b>120</b>	0.16	0.34	0.52	0.75	0.98	1.26	1.54
<b>130</b>	0.14	0.31	0.48	0.7	0.92	1.19	1.46
<b>140</b>	0.12	0.28	0.44	0.65	0.86	1.12	1.38
<b>150</b>	<b>0.1</b>	0.25	<b>0.4</b>	0.6	<b>0.8</b>	1.05	<b>1.3</b>
<b>160</b>	0.1	0.24	0.38	0.58	0.78	1.02	1.26
<b>170</b>	0.1	0.23	0.36	0.56	0.76	0.99	1.22
<b>180</b>	0.1	0.22	0.34	0.54	0.74	0.96	1.18
<b>190</b>	0.1	0.21	0.32	0.52	0.72	0.93	1.14
<b>200</b>	<b>0.1</b>	0.2	<b>0.3</b>	0.5	<b>0.7</b>	0.9	<b>1.1</b>
<b>210</b>	0.09	0.2	0.3	0.49	0.68	0.88	1.08
<b>220</b>	0.08	0.19	0.3	0.48	0.66	0.86	1.06
<b>230</b>	0.07	0.19	0.3	0.47	0.64	0.84	1.04
<b>240</b>	0.06	0.18	0.3	0.46	0.62	0.82	1.02
<b>250</b>	<b>0.05</b>	0.18	<b>0.3</b>	0.45	<b>0.6</b>	0.8	<b>1</b>
<b>260</b>	0.04	0.16	0.28	0.43	0.58	0.77	0.96
<b>270</b>	0.03	0.15	0.26	0.41	0.56	0.74	0.92
<b>280</b>	0.02	0.13	0.24	0.39	0.54	0.71	0.88
<b>290</b>	0.01	0.12	0.22	0.37	0.52	0.68	0.84
<b>300</b>	<b>0.005</b>	0.1	<b>0.2</b>	0.35	<b>0.5</b>	0.65	<b>0.8</b>

- жовті клітинки – відомі значення  $\Delta T_{swell}$ ;
- помаранчеві клітинки – відомі значення параметрів;
- виділенням шрифтом – кроки довжини судна та висоти хвиль;
- всі інші значення – інтерпольовані двохвимірною інтерполяцією значення  $\Delta T_{swell}$ .

Побудовані графіки аналітичних залежностей з досить великою точністю  $R^2 \approx 1$  описують дані табл. 1 для значень  $\Delta T_{swell}$  (рис. 1) для кожного кроку довжини судна, які занесені також у табл. 3.

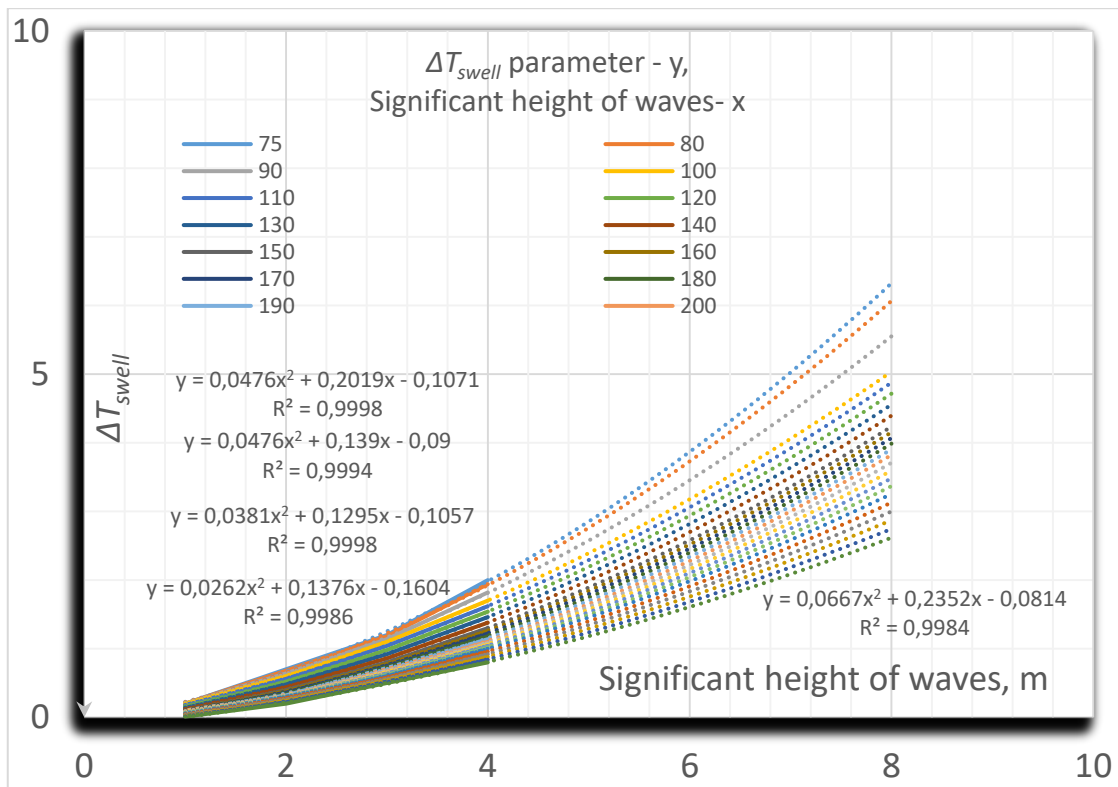


Рисунок 1 – Графік залежності  $\Delta T_{swell}$  від висоти хвиль для різних довжин судна

Використання пакета прогнозу від MS Excel надало можливість отримати конкретні аналітичні залежності для кожної довжини судна (табл. 3).

Таблиця 3 – Залежності  $\Delta T_{swell}$  від висоти Significant height of waves по кроках 10 м довжини суден

Довжина судна, м	Аналітична залежність $f_i$	Достовірність апроксимації	Довжина судна, м	Аналітична залежність, $f_i$	Достовірність апроксимації
1	2	3	4	5	6
75	$0.0714H^2 + 0.2286H - 0.075$	$R^2 = 0.9978$	190	$0.0476H^2 + 0.1162H - 0.0729$	$R^2 = 0.9982$
80	$0.0667H^2 + 0.2352H - 0.0814$	$R^2 = 0.9984$	200	$0.0476H^2 + 0.1048H - 0.0643$	$R^2 = 0.9972$
90	$0.0571H^2 + 0.2486H - 0.0943$	$R^2 = 0.9994$	210	$0.0452H^2 + 0.111H - 0.0746$	$R^2 = 0.9982$
100	$0.0476H^2 + 0.2619H - 0.1071$	$R^2 = 0.9999$	220	$0.0429H^2 + 0.1171H - 0.085$	$R^2 = 0.9991$
110	$0.0476H^2 + 0.2419H - 0.1071$	$R^2 = 0.9999$	230	$0.0405H^2 + 0.1233H - 0.0954$	$R^2 = 0.9996$
120	$0.0476H^2 + 0.2219H - 0.1071$	$R^2 = 0.9998$	240	$0.0381H^2 + 0.1295H - 0.1057$	$R^2 = 0.9998$
130	$0.0476H^2 + 0.2019H - 0.1071$	$R^2 = 0.9998$	250	$0.0357H^2 + 0.1357H - 0.1161$	$R^2 = 0.9996$
140	$0.0476H^2 + 0.1819H - 0.1071$	$R^2 = 0.9998$	260	$0.0338H^2 + 0.1361H - 0.1249$	$R^2 = 0.9998$
150	$0.0476H^2 + 0.1619H - 0.1071$	$R^2 = 0.9998$	270	$0.0319H^2 + 0.1365H - 0.1338$	$R^2 = 0.9998$
160	$0.0476H^2 + 0.1505H - 0.0986$	$R^2 = 0.9997$	280	$0.03H^2 + 0.1369H - 0.1426$	$R^2 = 0.9996$
170	$0.0476H^2 + 0.139H - 0.09$	$R^2 = 0.9994$	290	$0.0281H^2 + 0.1372H - 0.1515$	$R^2 = 0.9992$
180	$0.0476H^2 + 0.1276H - 0.0814$	$R^2 = 0.9989$	300	$0.0262H^2 + 0.1376H - 0.1604$	$R^2 = 0.9986$

За отриманими аналітичними залежностями зроблені розрахунки всіх значень  $\Delta T_{swell}$  у межах еталонних значень висот хвиль від 1 м до 4 м з кроками: 0,5 м – по хвилях та 10 м – по довжині судна (табл. 4). Метою побудови такої таблиці є визначення відносних похибок розрахованих значень  $\Delta T_{swell}$  (табл. 4) по аналітичних залежностях (табл. 3) стосовно до наданих еталонних даних (табл.1) та інтерполяційних (табл. 2). Виділеним шрифтом – для порівняння із еталонними значеннями табл. 1.

Таблиця 4 – Розраховані значення  $\Delta T_{swell}$  у межах еталонних значень висот хвиль та довжин судна

Довжина судна, м	Significant height of waves, м						
	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
75	0.23	0.43	0.67	0.94	1.25	1.6	1.98
80	0.22	0.42	0.66	0.92	1.22	1.56	1.93
90	0.21	0.41	0.63	0.88	1.17	1.48	1.81
100	0.2	0.39	0.61	0.85	1.11	1.39	1.7
110	0.18	0.36	0.57	0.8	1.05	1.32	1.62
120	0.16	0.33	0.53	0.75	0.99	1.25	1.54
130	0.14	0.3	0.49	0.7	0.93	1.18	1.46
140	0.12	0.27	0.45	0.65	0.87	1.11	1.38
150	0.1	0.24	0.41	0.6	0.81	1.04	1.3
160	0.1	0.23	0.39	0.58	0.78	1.01	1.27
170	0.1	0.23	0.38	0.56	0.76	0.98	1.23
180	0.09	0.22	0.36	0.54	0.73	0.95	1.19
190	0.09	0.21	0.35	0.52	0.7	0.92	1.15
200	0.09	0.2	0.336	0.5	0.68	0.89	1.12
210	0.082	0.19	0.328	0.49	0.67	0.87	1.09
220	0.08	0.19	0.32	0.48	0.65	0.85	1.07
230	0.07	0.18	0.31	0.47	0.64	0.83	1.05
240	0.06	0.17	0.31	0.46	0.63	0.81	1.02
250	0.055	0.17	0.3	0.45	0.61	0.8	1
260	0.045	0.16	0.28	0.43	0.59	0.77	0.96
270	0.03	0.14	0.27	0.41	0.56	0.73	0.92
280	0.02	0.13	0.25	0.39	0.54	0.7	0.89
290	0.01	0.12	0.24	0.37	0.51	0.67	0.85
300	0.0034	0.1	0.22	0.35	0.49	0.64	0.81

Розраховані значення відносних похибок для даних табл. 2 та табл. 4 занесені у табл. 5.

Таблиця 5 – Відносні похибки, %

Довжина судна, м	Significant height of waves, м						
	2	3	4	5	6	7	8
1	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
75	0	4.4	4.3	1.1	4.2	0	1
80	10	4.5	2.9	1.1	3.4	0	0.5
90	5	2.4	1.6	1.1	2.6	0	0.5
100	0	2.5	1.7	0	0.9	0.7	0
110	0	2.7	1.8	0	1	0.8	0
120	0	2.9	1.9	0	1	0.8	0
130	0	3.2	2.1	0	1.1	0.8	0
140	0	3.6	2.3	0	1.2	0.9	0
150	0	4	2.5	0	1.3	1	0
160	0	4.2	2.6	0	0	1	0.8
170	0	0	5.6	0	0	1	0.8
180	10	0	5.9	0	1.4	1	0.8
190	10	0	9.4	0	2.8	1.1	0.9
200	10	0	12	0	2.9	1.1	1.8
210	8.9	5	9.3	0	1.5	1.1	0.9
220	0	0	6.7	0	1.5	1.2	0.9
230	0	5.3	3.3	0	0	1.2	1
240	0	5.6	3.3	0	1.6	1.2	0
250	10	5.6	0	0	1.7	0	0
260	12.5	0	0	0	1.7	0	0
270	0	6.7	3.8	0	0	1.4	0
280	0	0	4.2	0	0	1.4	1.1
290	0	0	9.1	0	1.9	1.5	1.2
300	32	0	10	0	2	1.5	1.3

Результати покращуються при збільшенні висоти хвиль, крім висоти у 1 м. Значення похибки 32% здається завеликим, але, розглядаючи абсолютне значення показника у 0,5 см (0,005 м) на довжині судна у 300 м, це взагалі можна рахувати статистичною похибкою або не значущим. Ті ж пояснення і для значення 12,5% при довжині судна у 260 м. Взагалі 1 м хвилі не є небезпечними для комерційних суден внаслідок їх розміру, тому цієї висоті не приділяється увага у дослідженні.

Таблиця 6 – Розраховані значення  $\Delta T_{swell}$  по кроках

Довжина судна, м	Significant height of waves, м															
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
1	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>	<b>2.5</b>	<b>3</b>	<b>3.5</b>	<b>4</b>	<b>4.5</b>	<b>5</b>	<b>5.5</b>	<b>6</b>	<b>6.5</b>	<b>7</b>	<b>7.5</b>	<b>8</b>	
75	0.23	0.43	0.67	0.94	1.25	1.6	1.98	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	
80	0.22	0.42	0.66	0.92	1.22	1.56	1.93	2.25	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	
90	0.21	0.41	0.63	0.88	1.17	1.48	1.81	2.18	2.5	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	
100	0.2	0.39	0.61	0.85	1.11	1.39	1.7	2.04	2.39	2.75	3	3.25	3.5	3.75	4	
110	0.18	0.36	0.57	0.8	1.05	1.32	1.62	1.95	2.29	2.66	3	3.25	3.5	3.75	4	
120	0.16	0.33	0.53	0.75	0.99	1.25	1.54	1.86	2.19	2.55	2.94	3.25	3.5	3.75	4	
130	0.14	0.3	0.49	0.7	0.93	1.18	1.46	1.77	2.09	2.44	2.82	3.22	3.5	3.75	4	
140	0.12	0.27	0.45	0.65	0.87	1.11	1.38	1.68	1.99	2.33	2.7	3.09	3.5	3.75	4	
150	0.1	0.24	0.41	0.6	0.81	1.04	1.3	1.59	1.89	2.22	2.58	2.96	3.36	3.75	4	
160	0.1	0.23	0.39	0.58	0.78	1.01	1.27	1.54	1.84	2.17	2.52	2.89	3.29	3.71	4	
170	0.1	0.23	0.38	0.56	0.76	0.98	1.23	1.5	1.8	2.11	2.46	2.82	3.22	3.63	4	
180	0.09	0.22	0.36	0.54	0.73	0.95	1.19	1.46	1.75	2.06	2.4	2.76	3.14	3.55	3.99	
190	0.09	0.21	0.35	0.52	0.7	0.92	1.15	1.41	1.7	2.01	2.34	2.69	3.07	3.48	3.9	
200	0.09	0.2	0.33	0.5	0.68	0.89	1.12	1.37	1.65	1.95	2.28	2.63	3	3.4	3.82	
210	0.082	0.19	0.328	0.49	0.67	0.87	1.09	1.34	1.61	1.9	2.22	2.56	2.92	3.3	3.71	
220	0.08	0.19	0.32	0.48	0.65	0.85	1.07	1.31	1.57	1.86	2.16	2.49	2.84	3.21	3.6	
230	0.07	0.18	0.31	0.47	0.64	0.83	1.05	1.28	1.53	1.81	2.1	2.42	2.75	3.11	3.48	
240	0.06	0.17	0.31	0.46	0.63	0.81	1.02	1.25	1.49	1.76	2.04	2.35	2.67	3.01	3.37	
250	0.055	0.17	0.3	0.45	0.61	0.8	1	1.22	1.45	1.71	1.98	2.27	2.58	2.91	3.25	
260	0.045	0.16	0.28	0.43	0.59	0.77	0.96	1.17	1.4	1.65	1.91	2.19	2.48	2.8	3.13	
270	0.03	0.14	0.27	0.41	0.56	0.73	0.92	1.13	1.35	1.58	1.83	2.1	2.38	2.68	3	
280	0.02	0.13	0.25	0.39	0.54	0.7	0.89	1.08	1.29	1.52	1.76	2.01	2.29	2.57	2.87	
290	0.01	0.12	0.24	0.37	0.51	0.67	0.85	1.03	1.24	1.45	1.68	1.93	2.19	2.46	2.74	
300	0.003	0.1	0.22	0.35	0.49	0.64	0.81	0.99	1.18	1.39	1.61	1.84	2.09	2.35	2.62	

1	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14
210	4.13	4.5	4.75	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
220	4.01	4.44	4.75	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
230	3.88	4.29	4.73	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
240	3.75	4.15	4.56	5	5.25	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
250	3.62	4	4.39	4.81	5.24	5.5	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
260	3.47	3.84	4.22	4.62	5.03	5.46	5.75	6	6.25	6.5	6.75	7
270	3.33	3.68	4.04	4.42	4.82	5.23	5.65	6	6.25	6.5	6.75	7
1	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
280	3.19	3.52	3.87	4.23	4.6	4.99	5.4	5.82	6.25	6.5	6.75	7
290	3.04	3.36	3.69	4.03	4.39	4.76	5.14	5.54	5.95	6.38	6.75	7
300	2.9	3.2	3.51	3.84	4.17	4.52	4.89	5.26	5.65	6.06	6.47	6.9

Виділений шрифтом показані розраховані значення на місці еталонних значень з табл. 1 (винятком є значення при висоті хвиль 1 м і довжині судна 250 м, 300 м, які встановлені на рівні 5,5 см та 0,3 см, що у порівнянні із довжиною судна все одно мають статус статистичної похибки при розрахуванні  $\Delta T_{swell}$ ).

**Програмна реалізація.** На базі отриманих моделей розроблено програмне забезпечення у операційній системі Windows 11 з використанням програмної оболонки Spider v6.0 у середовищі Python v3.12.8. Аналіз структури файлів grb карт здійснювався за

описом стандартів та специфікацій [18, 19]. Всі розрахунки дистанцій за алгоритмом здійснюються по Great Circle, а маршрут з ECDIS відображається у локсодромії.

Порядок опрацювання маршруту курсантом:

1. Завантажується карта погоди Grib для відповідного прямокутника координат, при цьому може використовуватися Freeware програмне забезпечення, наприклад, zyGrib (біла частина карти – там де немає значень хвиль, в основному – Land).

2. Здійснюються налаштування щодо подальших розрахунків та відображення (наведені значення – значення за замовчуванням, подальші кроки – використання саме вказаних обмежень, рис. 2):

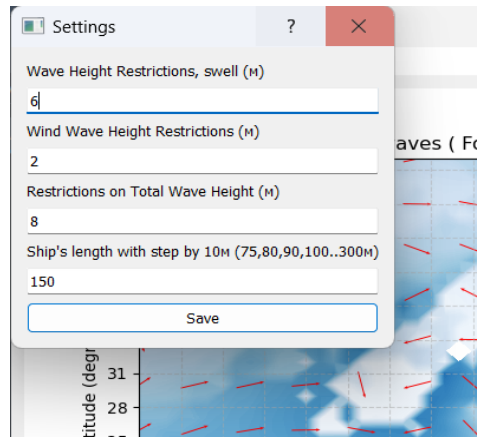


Рисунок 2 – Меню налаштувань обмежень та довжини судна

3. Здійснюється імпорт маршруту з ECDIS у форматі .RT3 і завантажується поверх карти погоди (рис. 3).

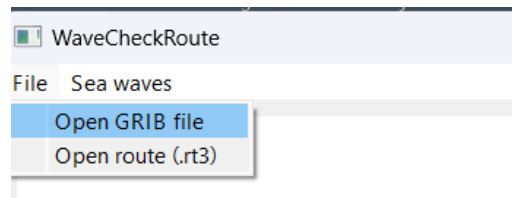


Рисунок 3 – Діалогове меню вибору файлів погоди у форматі .grb.bz2 і маршруту .RT3

4. Обирається розклад руху за маршрутом, якщо там декілька варіантів, програма їх відображає і вимагає вибору одного з них. Координати у рядку статусу наведені у десятковій та навігаційній формах. На карті координати надані у десятковій формі, яка використовується за відомими правилами при програмуванні: «-» – західна довгота та південна широта, «+» – східна довгота і північна широта (рис. 4).

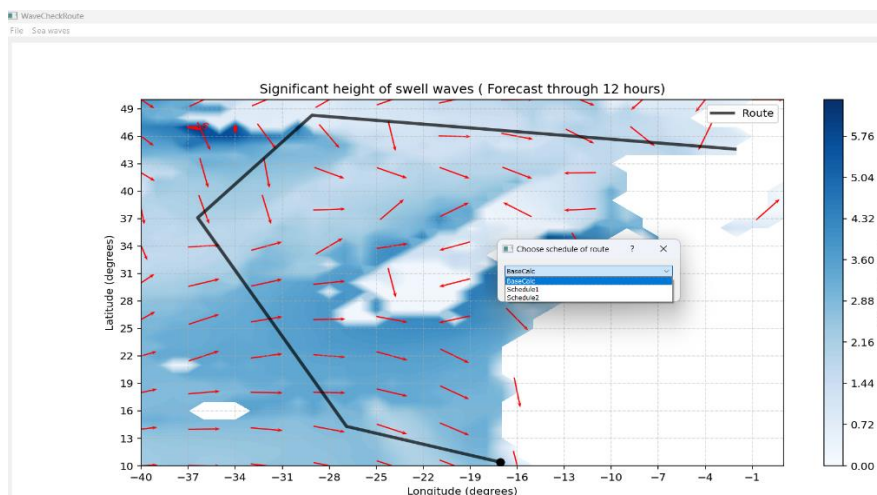


Рисунок 4 – Діалогове меню вибору розкладу руху

5. Розраховуються позиції судна за цим розкладом відповідно до кроку погодної карти.

6. Розраховується за даними хвиль (тип хвиль: swell, wind, їх напрямок руху) у той самий час і у тієї позиції значення висоти хвиль та можливе значення збільшення UKC (рис. 5).

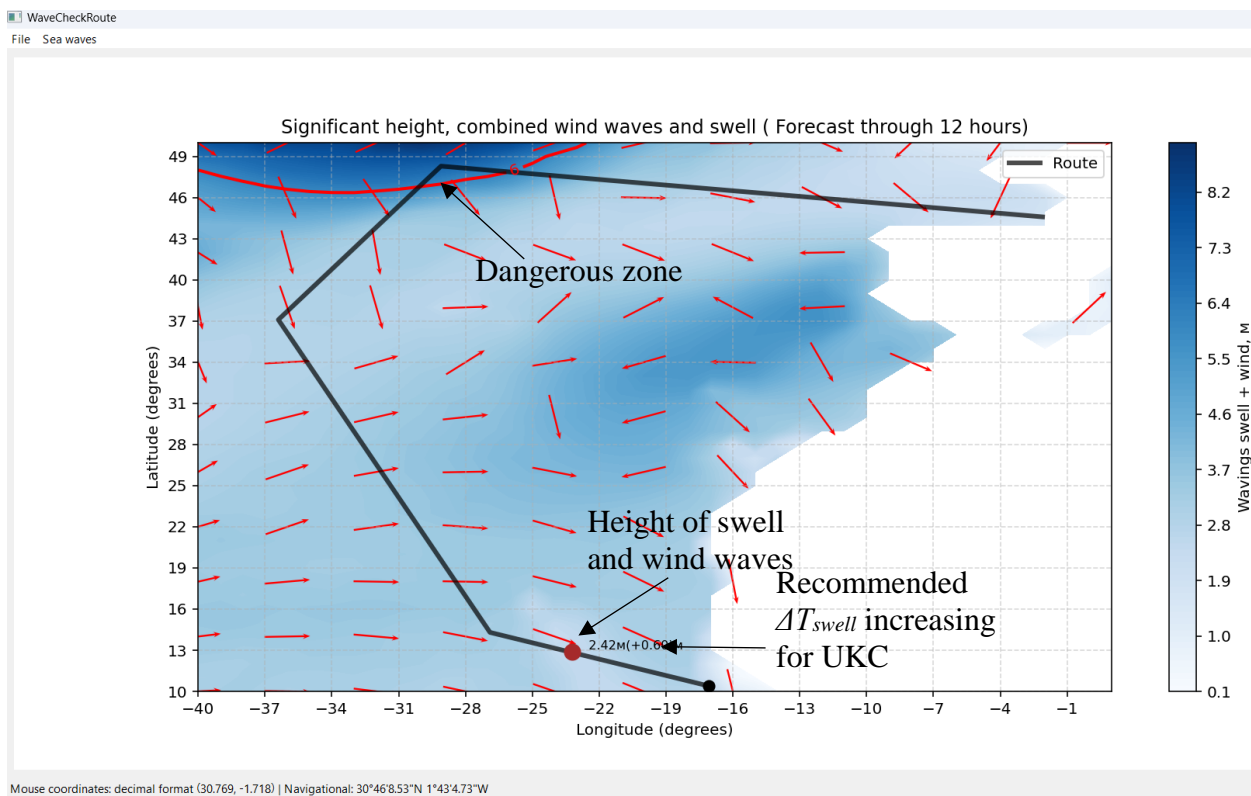


Рисунок 5 – Надання рекомендованого значення  $\Delta T_{swell}$  у відповідній позиції судна за часовим кроком карти прогнозу

Додатково показуються червоним контуром небезпечні зони з перевищенням значення параметра висоти хвиль обраної карти поточного часового кроку (довжина судна, небезпечна межа висоти хвиль налагоджується у налаштуваннях програми).

**Висновки.** У результаті дослідження були отримані аналітичні залежності для довжин суден у діапазоні [75; 300] м з кроком 10 м та висотами хвиль у діапазоні [1; 14] м з кроком 0,5 м. Виявлені випадки зниження точності моделювання на малих висотах хвиль до 1 м та для суден завдовжки 250 м, але практичної значущості на таких хвилях похибки не мають, оскільки різниця абсолютних значень складає менше 1 см, що для довжин суден у 250, 300 м взагалі можна рахувати статистичною похибкою. Таблиця розрахованих значень  $\Delta T_{swell}$  дозволяє використовувати значення одразу, без попередніх розрахунків інтерполяційним методом. Наприклад, таблиці різних морських альманахів, розраховують завчасно для подальшої економії часу штурманів при попередній прокладці. Розроблене програмне забезпечення є привабливим для використання у навчальних цілях:

- економія часу на визначення  $\Delta T_{swell}$  у кожному місцезнаходженні судна відповідно до його маршруту та часовому кроці погодної карти;
- можливість самостійно визначати курсантом більш точно параметр UKC на кожній ділянці маршруту, відповідно до рекомендацій програми та присутніх глибинах;
- наочність напрямку і висоти хвиль надає можливість прийняти відповідні рішення курсантом;
- надає ізолініями небезпечні контури зон, де є перевищення параметра хвиль, відповідно до карт: вітрових хвиль, мари, загальної висоти хвиль.

– додатково навчає курсантів користуватися різним програмним забезпеченням для підвищення безпеки навігаційної прокладки.

Оскільки на базі ХДМА ведуться дослідження з використанням тренажерів Wärtsilä (Transas) NaviTrainer 5000 (для моделювання) і NaviSailor 4000 (для курсантів) при моделюванні різних ситуацій в умовах обмеженої безпечної навігаційної частини акваторії для адаптації курсантів [20, 21], тому набуття додаткових навичок побудови попередньої прокладки разом з використанням погодних умов додатково підвищить кваліфікацію майбутніх спеціалістів і збільшить їх конкурентоздатність на ринку праці морського флоту.

Звісно, при реальному використанні потрібно на основі досвіду враховувати і напрямок, і глибину (для оцінки величини перенесення енергії хвилями), і період хвиль, їх довжину, остійність судна, наприклад, побудувати діаграму Богданова для оцінки небезпечних хвиль або дослідити діаграму Ремеза щодо качки, досліджувати вплив ступеня завантаженості судна на амплітуду коливань. Розроблені аналітичні залежності та програмне забезпечення передбачається для використання насамперед у тренажерних центрах та вищих навчальних закладах відповідної спеціалізації для набуття курсантами навичок перевірки і уточнення маршруту відповідно до поточних погодних умов. Для використання розробленого програмного забезпечення у професійних цілях потрібно обов'язково враховувати перелічені вище параметри оцінки взаємодії хвиль з судном.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження можуть призвести до необхідності побудови системи підтримки прийняття рішень, де враховується не тільки висота  $\Delta T_{swell}$ , а й напрямок хвиль і можливі наслідки для конкретного типу судна з урахуванням його зносу, ступеню втомленості металу та інше, можлива оцінка УКС за результатами досліджень [12].

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Safety Analysis of EMCIP Data. Analysis of Navigation Accidents. EMCIP Navigation Accidents-Summary report, Publisher: EMCIP, September 2022, p. 25. URL: <https://www.emsa.europa.eu/emcip/download/7310/4830/23.html> (дата звернення 11.01.2025).
2. Petrovskiy A. V., Isaychev A. G., Zlobin, Y. O. On the issue of adjustment and calculation of navigation depth parameters during route creating. Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences. 2023, Volume 47, pp. 324–335. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300119>.
3. Вагущенко Л. Л. Суднові навігаційно-інформаційні системи. Одеса, НУ «ОМА», 2016. 238 с.
4. Bowditch N. American practical navigator an epitome of navigation; Publisher: National geospatial-intelligence agency Springfield, Virginia, USA, 2019; Volume 1, p. 753 URL: [https://thenauticalalmanac.com/2019\\_Bowditch-\\_American\\_Practical\\_Navigator/Volume-\\_1/2019%20Bowditch\\_Vol\\_1\\_LoRes.pdf](https://thenauticalalmanac.com/2019_Bowditch-_American_Practical_Navigator/Volume-_1/2019%20Bowditch_Vol_1_LoRes.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
5. Cartwright B. K., Melchers R. E., Renilson M. Modelling Sea-Surface Wave Motion and Ship Response Using Smoothed Particle Hydrodynamics and Finite Element Analysis. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 1919. <https://doi.org/10.3390/jmse12111919>.
6. Seakeeping ship behaviour in rough weather: By A.R.J.M. Lloyd. Ellis Horwood, Chichester, 1989. p. 486.
7. Recommended practice: Environmental conditions and environmental loads. DNV-RP-C205. August 2017 ed., Publisher: DNV GL AS, Det Norske Veritas group, p. 259. URL: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689468335664874/DNVGL-RP-C205\\_2017-Environment.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689468335664874/DNVGL-RP-C205_2017-Environment.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
8. Burenkov O., Pipchenko O., Aleksishin A. PRACTICAL FEATURES OF ECDIS SAFETY DEPTH CALCULATION. *Shipping & Navigation*, 2020, pp. 16–26. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.16-26>.

9. ECDIS Procedures Guide, 2018 ed.; Publisher: Witherby Publishing Group Ltd, Scotland, UK, 2018, p. 176.
10. Independent investigation into the grounding of the Panamanian registered bulk carrier Pasha Bulker on Nobbys Beach, Newcastle, New South Wales, on 8 June 2007. The Australian Transport Safety Bureau. URL: [https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/media/1362985/mair243\\_001.pdf](https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/media/1362985/mair243_001.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
11. Gourlay T. P. Ship under-keel clearance in waves. Proc. Coasts and Ports, Melbourne, July 2007, pp. 1–6, URL: [https://cmst.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/4/2016/05/gourlay-2007-ship\\_underkeel\\_clearance\\_in\\_waves.pdf](https://cmst.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/4/2016/05/gourlay-2007-ship_underkeel_clearance_in_waves.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
12. Gallucci F., Vernengo G. Impact of direct seakeeping computation on ship Underwater Keel Clearance prediction. 12<sup>th</sup> International workshop on ship and marine hydrodynamics (IWSH-2023), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1288, Aalto University, Espoo, Finland, 28/08/2023, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1288/1/012031>.
13. MSC.1/Circ.1228. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions; Publisher: IMO, London, 11 January 2007, pp. 100–107. URL: [https://www.piclub.or.jp/wp-content/uploads/2019/04/Loss-Prevention-Bulletin-Vol.45-Light\\_6.pdf](https://www.piclub.or.jp/wp-content/uploads/2019/04/Loss-Prevention-Bulletin-Vol.45-Light_6.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
14. Lee S. W., Sasa K., Masagaki T., Chen C. Effects of swell waves caused by atmospheric depression on ships sailing in the North Pacific ocean. Ocean Engineering, Volume 312, Part 2, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119121>.
15. MSC circ. 1503 ECDIS – Guidance for Good Practice. IMO, Publisher: Albert Embankment, LONDON, 2017, p. 23. URL: [https://iho.int/uploads/user/About%20IHO/International\\_Organisations/ECDIS-ENC/English/MS.C.1-Circ.1503-Rev.1%20-%20Ecdis%20-%20Guidance%20For%20Good%20Practice.pdf](https://iho.int/uploads/user/About%20IHO/International_Organisations/ECDIS-ENC/English/MS.C.1-Circ.1503-Rev.1%20-%20Ecdis%20-%20Guidance%20For%20Good%20Practice.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
16. Recommendations for the Organization of the Navigation Service on Marine Vessels of Ukraine (RNSMV-98), South Research Institute of Marine Fleet, Odesa, 1990, c. 59.
17. zyGrib – GRIB File Viewer. Weather data visualization. URL: <https://www.zygrib.org>.
18. IHO TRANSFER STANDARD for DIGITAL HYDROGRAPHIC DATA, 3.1 ed. (2000-2014), Special Publication No. 57, Publisher: International Hydrographic Bureau, MONACO, 2014 p. 3-B-8. URL: <https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-57/31Main.pdf> (дата звернення 11.01.2025).
19. Manual on Codes, International Codes, Annex II to the WMO Technical Regulations Part B – Binary Codes, Part C – Common Features to Binary and Alphanumeric Codes. 2023 ed.; Publisher: WMO, Geneva, 2023, Volume I. 2, No. 306, p. 1407. URL: [https://library.wmo.int/records/item/35625-manual-on-codes-volume-i-2-international-codes?Language\\_id=13&back=&offset=](https://library.wmo.int/records/item/35625-manual-on-codes-volume-i-2-international-codes?Language_id=13&back=&offset=) (дата звернення 11.01.2025).
20. Voloshynov S., Petrovskyi A., Popova H., Cherniavskyi V., Pindosova T. Use of VR Technologies in the System of Quality Assessment of Seafarer’s Professional Competence Formation. Workshops. ICTERI 2021: Communications in Computer and Information Science., Publisher: Springer, Cham, Volume 1635., 2021, pp. 258–280, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-14841-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14841-5_17).
21. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mateychuk V. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O. Automatic collision avoidance with multiple targets, including maneuvering ones. Radio Electronics, Computer Science, Control, 2019, No.4, pp. 211–222. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-4-20>.

## REFERENCES

1. Safety Analysis of EMCIP Data (2022). Analysis of Navigation Accidents. EMCIP Navigation Accidents-Summary report, Publisher: EMCIP, p. 25. URL: <https://www.emsa.europa.eu/emcip/download/7310/4830/23.html> (дата звернення 11.01.2025).
2. Petrovskiy, A. V., Isaychev, A. G., Zlobin, Y. O. (2023). On the issue of adjustment and calculation of navigation depth parameters during route creating. Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences. Volume 47, pp. 324–335. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.47.2023.300119>.
3. Vahushchenko, L. L. (2016). Sudnovi naviatsiino-informatsiini systemy. Odesa, NU «OMA». 238 p.
4. Bowditch, N. (2019). American practical navigator an epitome of navigation; Publisher: National geospatial-intelligence agency Springfield, Virginia, USA, Volume 1, p. 753 URL: [https://thenauticalalmanac.com/2019\\_Bowditch-\\_American\\_Practical\\_Navigator/Volume-\\_1/2019%20Bowditch\\_Vol\\_1\\_LoRes.pdf](https://thenauticalalmanac.com/2019_Bowditch-_American_Practical_Navigator/Volume-_1/2019%20Bowditch_Vol_1_LoRes.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
5. Cartwright, B. K., Melchers, R. E., Renilson, M. (2024). Modelling Sea-Surface Wave Motion and Ship Response Using Smoothed Particle Hydrodynamics and Finite Element Analysis. *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 1919. <https://doi.org/10.3390/jmse12111919>.
6. Seakeeping ship behaviour in rough weather: By A.R.J.M. Lloyd. Ellis Horwood, Chichester, 1989. p. 486.
7. Recommended practice: Environmental conditions and environmental loads. DNV-RP-C205. August 2017 ed.; Publisher: DNV GL AS, Det Norske Veritas group, p. 259. URL: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689468335664874/DNVGL-RP-C205\\_2017-Environment.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689468335664874/DNVGL-RP-C205_2017-Environment.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
8. Burenkov, O., Pipchenko, O., Aleksishin, A. (2020). PRACTICAL FEATURES OF ECDIS SAFETY DEPTH CALCULATION. Shipping & Navigation, pp. 16–26. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.16-26>.
9. ECDIS Procedures Guide, 2018 ed.; Publisher: Witherby Publishing Group Ltd, Scotland, UK, p. 176.
10. Independent investigation into the grounding of the Panamanian registered bulk carrier Pasha Bulker on Nobbys Beach, Newcastle, New South Wales, on 8 June 2007. The Australian Transport Safety Bureau. URL: [https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/media/1362985/mair243\\_001.pdf](https://www.atsb.gov.au/sites/default/files/media/1362985/mair243_001.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
11. Gourlay, T. P. (2007). Ship under-keel clearance in waves. Proc. Coasts and Ports, Melbourne, pp. 1–6, URL: [https://cmst.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/4/2016/05/gourlay-2007-ship\\_underkeel\\_clearance\\_in\\_waves.pdf](https://cmst.curtin.edu.au/wp-content/uploads/sites/4/2016/05/gourlay-2007-ship_underkeel_clearance_in_waves.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
12. Gallucci, F., Vernengo, G. (2023). Impact of direct seakeeping computation on ship Underwater Keel Clearance prediction. 12<sup>th</sup> International workshop on ship and marine hydrodynamics (IWSH-2023), IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 1288, Aalto University, Espoo, Finland, 28/08/2023, pp. 1–10. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1288/1/012031>.
13. MSC.1/Circ.1228. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions; Publisher: IMO, London, 11 January 2007, pp. 100–107. URL: [https://www.piclub.or.jp/wp-content/uploads/2019/04/Loss-Prevention-Bulletin-Vol.45-Light\\_6.pdf](https://www.piclub.or.jp/wp-content/uploads/2019/04/Loss-Prevention-Bulletin-Vol.45-Light_6.pdf) (дата звернення 11.01.2025).
14. Lee, S. W., Sasa, K., Masagaki, T., Chen, C. (2024). Effects of swell waves caused by atmospheric depression on ships sailing in the North Pacific ocean. Ocean Engineering, Volume 312, Part 2, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119121>.
15. MSC circ. (2017). 1503 ECDIS – Guidance for Good Practice. IMO, Publisher: Albert Embankment, LONDON, p. 23. URL: [https://iho.int/uploads/user/About%20IHO/International\\_](https://iho.int/uploads/user/About%20IHO/International_)

Organisations/ECDIS-ENC/English/MSC.1-Circ.1503-Rev.1%20-%20Ecdis%20-%20Guidance%20%20Good%20Practice.pdf (дата звернення 11.01.2025).

16. Recommendations for the Organization of the Navigation Service on Marine Vessels of Ukraine (RNSMV-98), South Research Institute of Marine Fleet, Odesa, 1990, с. 59.

17. zyGrib – GRIB File Viewer. Weather data visualization. URL: <https://www.zygrib.org>.

18. IHO TRANSFER STANDARD for DIGITAL HYDROGRAPHIC DATA, 3.1 ed. (2000-2014), Special Publication No. 57, Publisher: International Hydrographic Bureau, MONACO, 2014, p. 3-B-8. URL: <https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/s-57/31Main.pdf> (дата звернення 11.01.2025).

19. Manual on Codes, International Codes, Annex II to the WMO Technical Regulations Part B – Binary Codes, Part C – Common Features to Binary and Alphanumeric Codes. 2023 ed.; Publisher: WMO, Geneva, 2023, Volume I. 2, No. 306, p. 1407. URL: [https://library.wmo.int/records/item/35625-manual-on-codes-volume-i-2-international-codes?language\\_id=13&back=&offset=](https://library.wmo.int/records/item/35625-manual-on-codes-volume-i-2-international-codes?language_id=13&back=&offset=) (дата звернення 11.01.2025).

20. Voloshynov, S., Petrovskiy, A., Popova, H., Cherniavskiy, V., Pindosova, T. (2021). Use of VR Technologies in the System of Quality Assessment of Seafarer's Professional Competence Formation. Workshops. ICTERI 2021: Communications in Computer and Information Science., Publisher: Springer, Cham, Volume 1635., pp. 258–280, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-14841-5\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14841-5_17).

21. Zinchenko, S. M., Nosov, P. S., Mateychuk, V. M., Mamenko, P. P., Grosheva, O. O. (2019). Automatic collision avoidance with multiple targets, including maneuvering ones. Radio Electronics, Computer Science, Control, No.4, pp. 211–222. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-4-20>.

**Petrovskiy A., Ben A. THEORETICAL MODELS OF APPROXIMATION OF WAVE CORRECTIONS IN UNDER KEEL CLEARANCE CALCULATIONS**

*Year after year, maritime transportation continues to grow, with an increasing count of ships and their displacement requiring enhanced navigational skills and precision. Weather factors such as wind and waves significantly influence a vessel's ability to maintain position and accurately determine safe depths, making them critical for safe navigation.*

*This article aims to derive analytical dependencies for the Swell parameter based on vessel length and wave height within the most common operational ranges for ships. It also provides tabulated Swell values and a software product designed for cadet training alongside the NaviSailor 4000 simulator. The article analyzed existing accounting methods for wave-induced increases in vessel clearance. It was found that no proposed method provides practical recommendations for calculating the Swell parameter for any ship length or wave height. Although tables containing the desired parameter exist, additional interpolation calculations are required to determine the Swell value. To address this, preliminary calculations were performed using interpolation of known values for this parameter. Then, ensuring maximum alignment with reference data, mathematical models were developed for each 10-meter increment in vessel length and each 0.5-meter increment in wave height. Through extrapolation, with constraints on wave amplitude values, specific Swell parameter values were determined by tabulating functions. The resulting table of Swell values allows for direct application without the need for prior interpolation calculations. Based on these models, the WaveCheckRoute software was developed. This tool enables users to work with weather maps in .grib format for any forecast step, overlay routes in .rt3 format, select vessel schedules, and analyze dangerous wave heights along a route at estimated arrival times. The analysis is conducted based on weather forecast intervals and vessel speed, enhancing passage planning and safety in maritime navigation.*

**Key words:** UKC; swell; Safety Contour; Safety Depth; ECDIS Safety Parameters; Passage planning; effect of wave induce motion on UKC.

© Петровський А. В., Бень А. П.

Статтю прийнято до редакції 09.03.2025

## ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ АВТОМОБІЛІВ З АНТИКРИЛОМ

**Русанов С. А.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: ohupbm@i.ua, ORCID: 0000-0002-1003-4867;

**Клюєв О. І.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: kluevoi@ukr.net, ORCID: 0000-0001-6803-0706;

**Шильцин Я. В.**, студент Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: yaroslav.shyltsyn@gmail.com, ORCID: 0009-0004-1896-3398;

**Дроздов М. С.**, бакалавр з автомобільного транспорту, студент Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: mykya12drozdov.grass816@simplelogin.com, ORCID: 0009-0004-9994-0429.

*Стаття стосується особливостей розрахунків аеродинаміки автомобілів з антикрилом. Ставиться та розв'язується питання – наскільки близька до адитивності задача окремого розрахунку антикрила та автомобіля без антикрила. У зв'язку з високою нелінійністю рівнянь Нав'є-Стокса, і тим більше з врахуванням додаткових рівнянь моделей турбулентності, повна адитивність, звичайно, відбуватися не може. Однак це питання важливе, особливо враховуючи той факт, що виробники антикрил як додаткових навісних елементів, вказують очікувані значення притискної сили, які отримані для антикрила без врахування взаємного впливу системи «автомобіль – антикрило». Для вирішення цього питання нами було проведено серію чисельних розрахунків засобами CFD, що відповідають експериментам в аеродинамічній трубі. Розрахунки виконувались на основі рішення зовнішньої аеродинамічної задачі з використанням  $k-\epsilon$  моделі турбулентності. Послідовно вирішувалась задача обтікання автомобіля без антикрила, безпосередньо самого антикрила, та автомобіля з антикрилом, після чого результати порівнювались. За результатами розрахунків встановлено, що притискна сила антикрила, встановленого на автомобіль, більша, ніж притискна сила антикрила встановленого у вільному потоці. Аналогічно, аеродинамічний опір антикрила, що встановлене на автомобіль, більший, ніж аеродинамічний опір антикрила, що встановлене у вільному потоці. Вказані особливості є результатом коригування картини течії в присутності автомобіля, при цьому швидкість повітря, що надходить на антикрило, у присутності автомобіля більша, ніж відповідна швидкість у вільному потоці. Окрім того, у просторі між антикрилом та кузовом автомобіля спостерігається значне вихроутворення, що знижує тиск позаду антикрила та у вказаному просторі, тим самим збільшуючи відповідні сили у порівнянні з їх значенням у вільному потоці.*

**Ключові слова:** аеродинаміка; турбулентність; автомобіль; антикрило; притискна сила.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.237-246**

**Вступ.** Точне прогнозування аеродинамічних характеристик транспортних засобів, особливо у контексті використання додаткових навісних елементів, таких як спойлери, сплітери, юбки, дифузори, антикрила, є сучасною актуальною задачею [1]. Вказані елементи використовують для удосконалення аеродинамічних властивостей автомобілів, що завжди було одним з ключових напрямів сучасного інженерного проектування, особливо в галузі спортивного та високошвидкісного транспорту [2–4]. Ці конструктивні елементи здатні суттєво змінювати розподіл тиску навколо автомобіля, впливаючи на притискну силу, а отже на керуваність і стабільність руху на високих швидкостях. У зв'язку з цим актуальним є питання адекватного моделювання взаємодії між основним кузовом автомобіля та встановленим антикрилом [5, 6].

**Аналіз публікацій.** Проблематика аеродинаміки автомобіля та впливу окремих аеродинамічних елементів, зокрема антикрил, на загальні характеристики потоку повітря та сили, що виникають при русі, розглядається у значній кількості праць, як класичних, так і сучасних. Відомі фундаментальні роботи [4, 5, 7] містять узагальнені підходи до оцінки аеродинамічного опору та притискної сили, розглядають вплив форми кузова, висоти дорожнього просвіту та наявності додаткових елементів. Специфіка сучасного

математичного та комп'ютерного CFD моделювання стосовно вирішення задач аеродинаміки автомобіля викладена в роботах [8–10]. Аналіз ефективності впливу навісних зовнішніх елементів за допомогою розрахунків у CFD-системах викладено в [11, 12]. Безпосередньо тематика антикрил та спойлерів стосовно симуляції їх аеродинамічного впливу засобами CAE розглядається в [13–15]. Загалом, акцент на ефективності та актуальності чисельного моделювання аеродинамічних аспектів сучасних транспортних засобів у проєкції на енергоефективність та паливну економічність підіймається в роботах [6, 9], безпеку, екологічність – [11, 16]. Проте безпосередньо питання адитивності ефектів при роздільному розрахунку антикрила і кузова лишається недостатньо вивченим. Вказане питання є достатньо важливим, особливо враховуючи те, що виробники антикрил, як додаткових навісних елементів, вказують очікувані значення притискної сили, які отримані для антикрила без врахування взаємного впливу системи «автомобіль – антикрило». Це питання і планується висвітлити в даній роботі.

**Метою роботи** є дослідження впливу взаємодії між автомобілем і антикрилом на аеродинамічні характеристики транспортного засобу шляхом чисельного моделювання з аналізом притискної сили та аеродинамічного опору в умовах, що моделюють експерименти в аеродинамічній трубі з використанням  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності, а також оцінка ступеня адитивності при окремому розрахунку аеродинаміки антикрила та автомобіля без антикрила.

#### **Завдання роботи:**

- реалізувати чисельне моделювання обтікання окремих позицій, а саме: автомобіля без антикрила, окремо антикрила у вільному потоці, автомобіля з встановленим антикрилом;
- проаналізувати розподіли швидкості, тиску та структуру течії у зонах взаємодії потоку з антикрилом і кузовом;
- порівняти результати розрахунків притискної сили та аеродинамічного опору в кожному випадку;
- оцінити ступінь відхилення результатів сумарного моделювання від умовної адитивності при роздільному обчисленні;
- зробити висновки щодо доцільності використання роздільних розрахунків при інженерному аналізі аеродинамічної ефективності антикрил як навісних елементів.

**Виклад основного матеріалу.** Для вирішення завдання роботи щодо оцінки сумарного ефекту системи «автомобіль – антикрило» за допомогою послідовного моделювання окремих компонентів нами була проведена серія сесій продувки віртуальної моделі автомобіля, антикрила, та повної системи «автомобіль – антикрило». Комп'ютерне моделювання обтікання автомобіля проводилось шляхом імітації набігання повітряного потоку на транспортний засіб із фіксованою швидкістю 45 м/с ( $\approx 160$  км/год), що відповідає віртуальній моделі аеродинамічної труби. Для реалізації цього підходу було створено тривимірну геометричну концепт-модель автомобіля (рис. 1). З моделі, призначеної для аеродинамічного розрахунку, було вилучено дрібномасштабні елементи, оскільки вони істотно ускладнювали б побудову сітки скінченних об'ємів. Вказана stl-модель була занурена в просторову область навколо неї, в якій здійснювався розрахунок продувки, при цьому у зв'язку з симетрією задачі розрахунок проводився тільки для половини моделі за площиною симетрії (рис. 2).

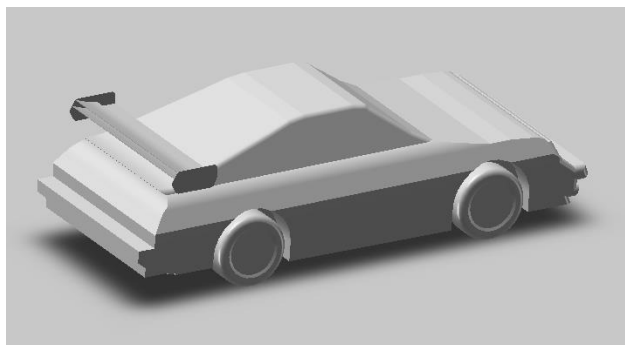


Рисунок 1 – Базова версія геометрії автомобіля з встановленим антикрилом

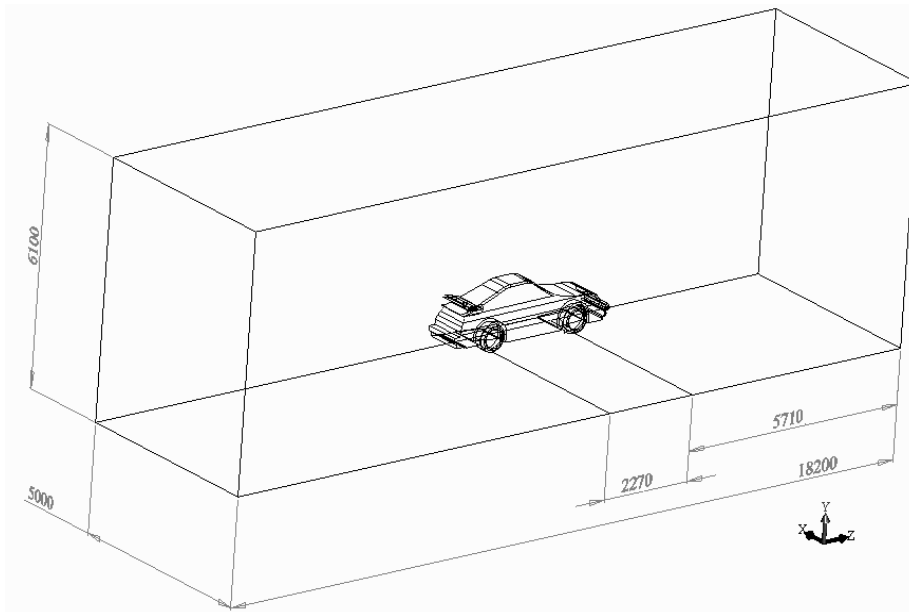


Рисунок 2 – Обчислювальна область із характерними розмірами

Поставлена задача відповідає зовнішній задачі аеродинаміки, тобто задачі моделювання зовнішніх течій, де обмежувальні умови накладаються на віддалені межі обчислювального домену, що імітує нескінченне середовище. Відповідно до цього просторова область, в якій проводилося чисельне моделювання, формувалась у реальному масштабі, як ортогональний домен розміром  $18 \times 6 \times 5$  м. Розміри домену, що зайнятий повітрям, є функцією колісної бази та визначалися орієнтовно за рекомендаціями [12] таким чином, щоб адекватно змоделювати аеродинамічний слід позаду автомобіля, та вловити випрямлення ліній току зверху та збоку транспортного засобу. Достатньо велика протяжність області дозволяє уникнути штучного впливу граничних умов на результати моделювання, особливо в зоні низьких швидкостей та збуреного потоку. Такий стандартний підхід забезпечує фізично обґрунтоване відображення структури течії повітря для зовнішньої задачі та дозволяє більш точно оцінити розподіл тиску на поверхні кузова. Домен, що моделює кузов транспортного засобу надалі віднімався з домену моделюючого вільний простір булевськими операціями.

В якості антикрила використовувалась модель фіксованого антикрила (Fixed Wing) плоско-випуклого профілю. Цей профіль дозволяє створити значне притискне зусилля, при цьому відповідна модель потребує відносно незначних машинних витрат на побудовання сітки та чисельні розрахунки. Стійка антикрила спрощено моделювалась прямокутним профілем. Характерні габаритні розміри профілю антикрила показані на рис. 3.

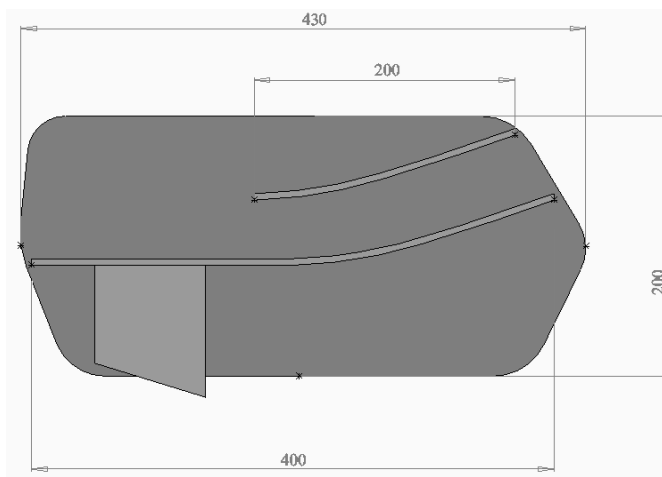


Рисунок 3 – Профіль антикрила з характерними розмірами

Для чисельних розрахунків застосовано неструктуровану сітку скінченних об'ємів, здатну адаптуватися до геометрії будь-якої складності. Ефекти пограничного шару враховувалися за допомогою інфляційного впровадження призматичних комірок по всьому кузову транспортного засобу разом з навісними елементами, що забезпечує адекватне врахування градієнтів швидкості в області пограничного шару відповідно до підходу функції стінки. Шар вказаних комірок складався з 5 елементів зі швидкістю росту 1,2 і постійною висотою першого шару 1,5 мм на стінці кузова з контролем параметру  $y^+$  при подальших розрахунках. Були створені окремі сітки для кузова автомобіля та додаткові аеродинамічні елементи, які пізніше накладені один на одного. Згущення сітки проводилось для високоградієнтних зон, а саме зон близьких до антикрила та зони під днищем автомобіля.

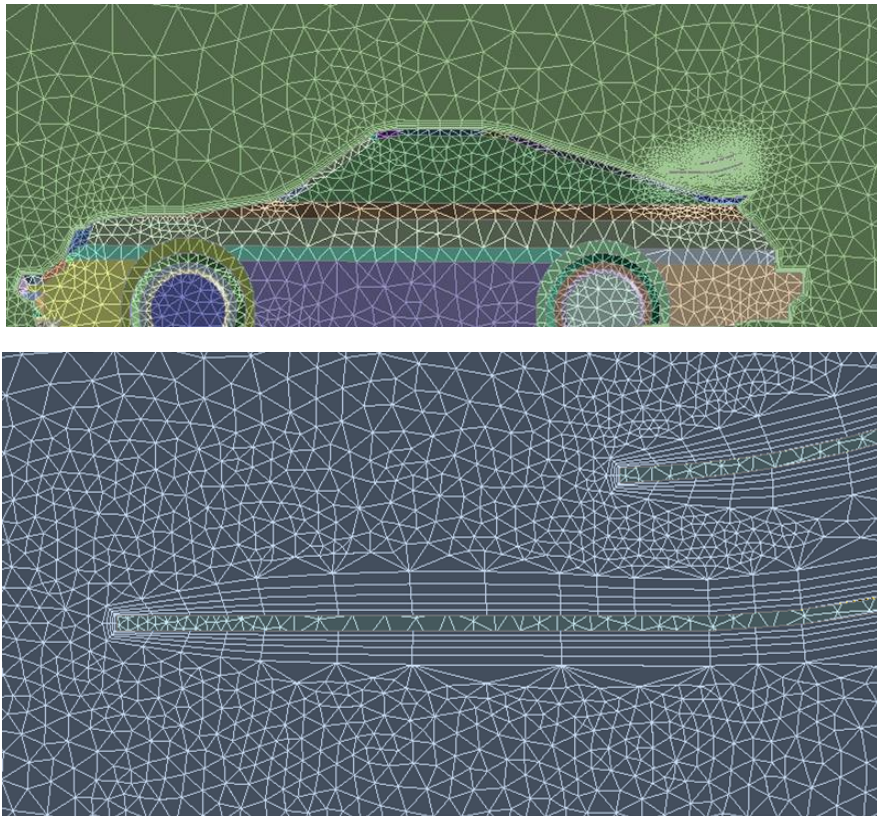


Рисунок 4 – Сітка скінченних об'ємів із шаром призматичних комірок

Для розрахунків нами було використано  $k-\varepsilon$  модель турбулентності [17]. Задача вирішувалась у стаціонарній постановці, якій відповідають рівняння нерозривності (1) та руху (2) (проводиться підсумовування за повторюваними індексами):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} p^* + \frac{\partial}{\partial x_j} (v_\varepsilon \tau_{ij}) + f_i, \tag{2}$$

де

$$p^* = p + \frac{2}{3} \rho k, \tau_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}, v_\varepsilon = \nu + \nu_t,$$

$\nu$  – кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $\nu_t$  – турбулентна в'язкість,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,  $k$  – питома кінетична енергія турбулентності,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ ,  $u_i$  – осереднені компоненти вектора швидкості в декартовій системі координат,  $\text{м}/\text{с}$ ,  $p$  – осереднений тиск, Па,  $f_i$  – вектор масових сил,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Додаткові рівняння  $k-\varepsilon$  моделі турбулентності мають вигляд балансових рівнянь для питомої кінетичної енергії турбулентності та швидкості дисипації турбулентної енергії (3–5):

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( k u_j - \nu_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) = H_k; \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \varepsilon u_j - \nu_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) = H_\varepsilon; \quad (4)$$

$$\nu_t = C_\mu \frac{k}{\varepsilon}, \quad (5)$$

де  $\varepsilon$  – швидкість дисипації турбулентної енергії,  $\text{m}^2/\text{c}^3$ ,

$$H_k = G - \varepsilon, H_\varepsilon = C_{\varepsilon 1}^* \frac{\varepsilon}{k} G - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, G = \nu_t \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, C_{\varepsilon 1}^* = C_{\varepsilon 1} - \eta \frac{1 - \eta/\eta_0}{1 + \beta \eta^3}, \eta = \sqrt{\frac{G}{C_\mu \varepsilon}},$$

$$\nu_k = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}, \nu_\varepsilon = \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}.$$

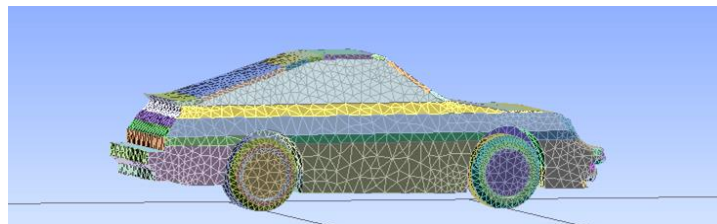
Емпіричні константи в наведених рівняннях дорівнюють:

$$C_\mu = 0,0845, C_{\varepsilon 1} = 1,42, C_{\varepsilon 2} = 1,68, \sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0,72, \eta_0 = 4,38, \beta = 0,015.$$

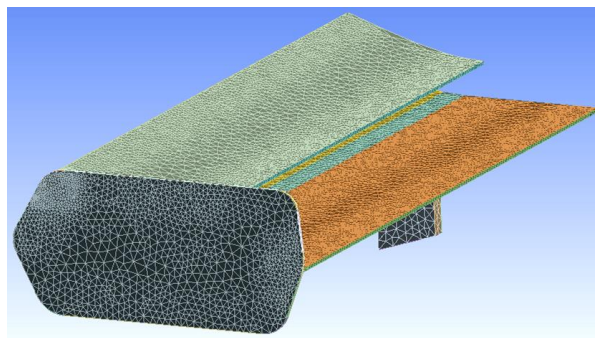
Треба зазначити, що  $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентності дає задовільний збіг з експериментальними даними для областей із розвиненою турбулентністю, а саме, коли виконується  $\nu_t \gg \nu$  [17]. Біля стінки кузова автомобіля, де ця оцінка порушується, визначення параметрів турбулентності проводиться у вигляді пристінних функцій.

Граничні умови для обчислювального домену задають швидкість на вході в домен, умови симетрії на бічних і верхній стінках, а також атмосферний тиск на виході з домену. На стінці кузова автомобіля задавалася умова прилипання. Уздовж нижньої стінки домену, що моделює трасу, задавалася умова не проникнення (нульова вертикальна складова швидкості). Додатково до граничної умови швидкості на вході задано рівень турбулентності 5% і просторовий масштаб турбулентності 0,005 м за рекомендаціями [12].

Для вирішення задачі щодо ступеня адитивності при окремому розрахунку аеродинаміки антикрила та автомобіля без антикрила, що покладено в мету роботи, нами була побудована модель того самого автомобіля без антикрила (рис. 5, а) і окремо антикрило (рис. 5, б) за інших рівних умов. Вказані моделі були занурені в той самий домен, що моделює навколишнє повітря розміром  $18 \times 6 \times 5$  м.



а)



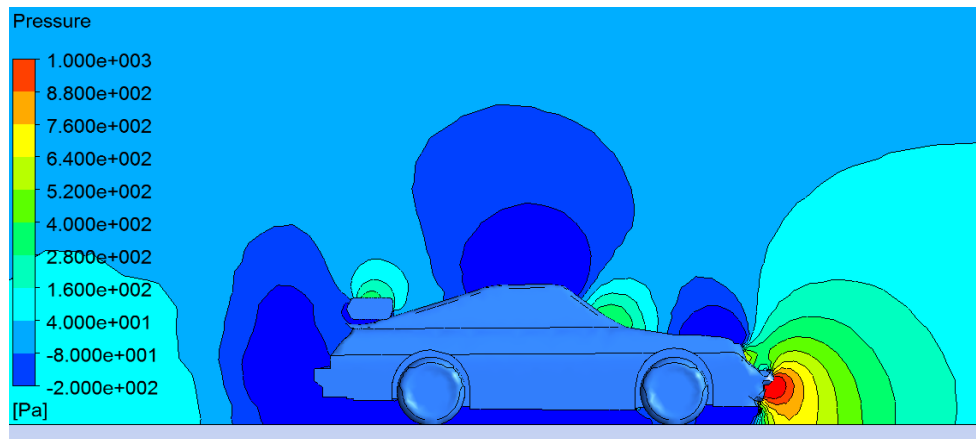
б)

Рисунок 5 – Автомобіль без антикрила (а) та окреме антикрило (б) у повітряному домені

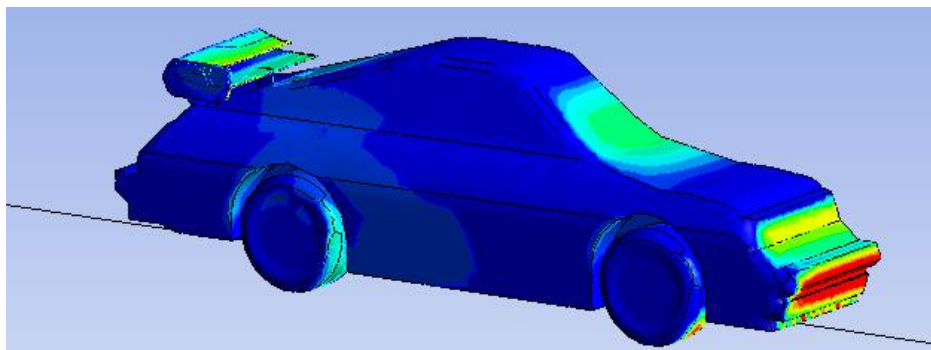
Граничні умови для вказаних моделей аналогічні попереднім.

Результати деяких розрахунків представлено далі у вигляді трасування тисків, ліній току та ізоповерхонь.

**Результати та їх обговорення.** Розрахункова область для задачі за рис. 4 налічувала понад 2,5 млн скінченних об'ємів.



а)



б)

Рисунок 6 – Трасування тисків у повітряному домені (а) та по кузову автомобіля (б)

Результати чисельного моделювання, представлені у вигляді розподілу тиску навколо автомобіля в повітряному домені та по кузову автомобіля показані на рис. 6, а) та б) відповідно. Бачимо класичну картину розподілу тисків по поверхні автомобіля. У фронтальній частині автомобіля спостерігається зона високого тиску, що зумовлено прямим впливом повітряного потоку на передню поверхню, що є характерною ознакою лобового опору, який відіграє ключову роль у загальному аеродинамічному опорі транспортного засобу. На верхній частині кузова, зокрема в зоні даху, тиск значно знижується, що вказує на прискорення потоку внаслідок ефекту обтікання. Така зміна тиску створює область розрідження, що впливає на підйомну силу. Аналогічна ситуація спостерігається й під днищем автомобіля: там формується область пониженого тиску, яка вказує на реалізацію ефекту притискання. Навколо коліс також видно локальні зони турбулентності з низьким тиском. Ці зони сприяють підвищенню загального аеродинамічного опору. Найбільш виражені вихрові структури спостерігаються у хвостовій частині автомобіля, де повітряний потік відривається від поверхні. Утворена зона низького тиску позаду авто свідчить про наявність відривного потоку, який також сприяє виникненню значного поздовжнього опору. Відзначимо розподіл тиску навколо антикрила – на його верхній поверхні фіксується область підвищеного тиску, тоді як нижня частина перебуває в зоні розрідження, що й обумовлює ефект додаткового притискання. Окремо треба виділити вихрові структури, які утворюються у зазорі між нижньою стороною антикрила та кузовом автомобіля (рис. 7).

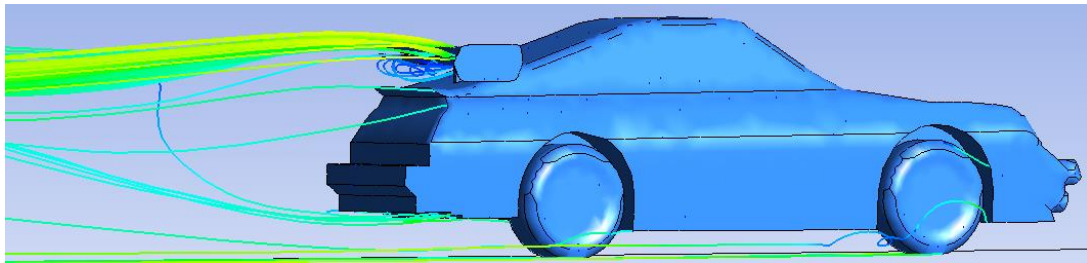


Рисунок 7 – Вихрові структури, що утворюються у зазорі між нижньою стороною антикрила та кузовом автомобіля

Отримані значення аеродинамічного опору автомобіля та притискної сили, що діє на автомобіль, становлять  $F_{ac} = 1200$  Н та  $F_{ay} = 854$  Н відповідно.

Результати чисельного моделювання аналогічної задачі для автомобіля без антикрила та для антикрила у вільному потоці у вигляді розподілу тисків показано на рис. 8 а) та б) відповідно. Порівняння рис. 6, а) та рис. 8, а) дає розуміння додаткової підвантажуючої дії антикрила на автомобіль. Окрім того, привертає до себе увагу додаткове розрідження позаду антикрила на рис. 6, а), що впливає в зону розрідження позаду автомобіля.

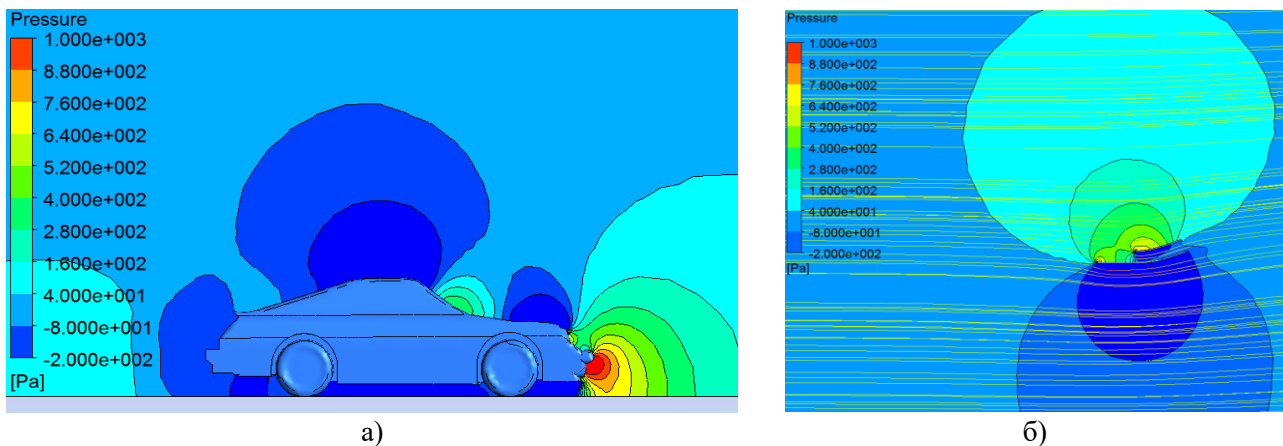


Рисунок 8 – Трасування тисків у повітряному домені для автомобіля без антикрила (а) та для антикрила (повернуто) у вільному потоці (б)

Отримане значення аеродинамічного опору автомобіля без антикрила становить  $F_c = 932$  Н. При цьому на автомобіль без антикрила діє незначна підйомна сила  $F_y = 222$  Н. Антикрило у вільному потоці має аеродинамічний опір  $F_{wc} = 140$  Н та притискну силу  $F_{wy} = 966$  Н.

Таким чином маємо відповідні нерівності (6) та (7), які показують, що, як і передбачалося, точна адитивність не виконується.

$$F_c + F_{wc} = 1072 \text{ Н} < F_{ac} = 1200 \text{ Н}, \quad (6)$$

$$-F_y + F_{wy} = 744 \text{ Н} < F_{ay} = 844 \text{ Н}. \quad (7)$$

Похибки майже однакові та становлять  $\approx 10\%$  для лобового опору та  $\approx 12\%$  для притискної сили. Ці похибки є результатом коректування картини течії в зазорі між антикрилом та кузовом автомобіля, при цьому швидкість повітря, що надходить на антикрило, у присутності автомобіля більша, ніж відповідна швидкість у вільному потоці. Окрім того, у просторі між антикрилом та кузовом автомобіля спостерігається значне вихроутворення (рис. 7), яке відсутнє в тій частині для автомобіля та антикрила окремо (рис. 9), що знижує тиск позаду антикрила та у вказаному просторі, тим самим збільшуючи відповідні сили у порівнянні з їх значенням у вільному потоці.

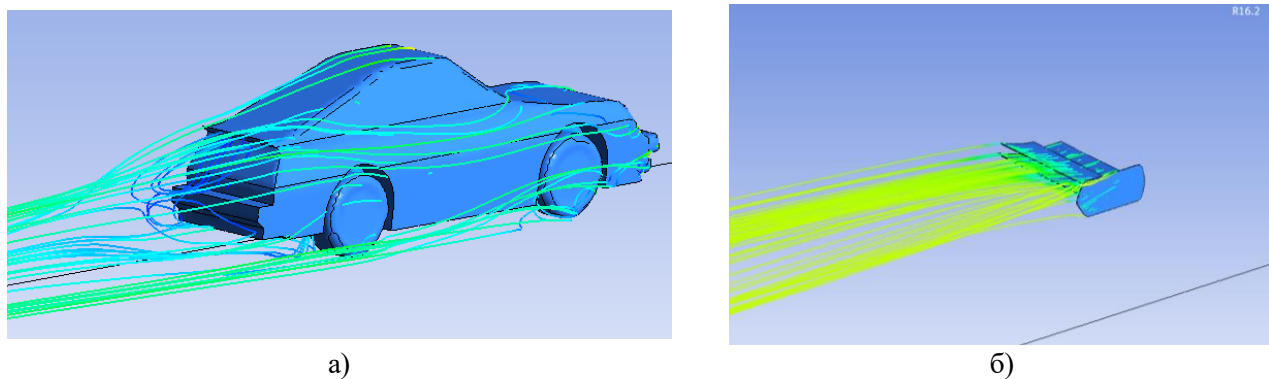


Рисунок 9 – Лінії току при обтіканні автомобіля без антикрила (а) та для антикрила у вільному потоці (б)

Виконані розрахунки підтверджують, що хоча безпосередньо адитивність опорів та притискної сили не виконується, але однак, для орієнтовних розрахунків у першому наближенні гіпотеза адитивності може бути прийнятна з похибкою  $\approx 10\div 12\%$ .

#### Висновки.

1. Наведено результати чисельного моделювання обтікання окремих позицій, а саме: автомобіля без антикрила, окремо антикрила у вільному потоці, автомобіля з встановленим антикрилом. За результатами розрахунків проаналізовано розподіли швидкості, тиску та структуру течії у зонах взаємодії потоку з антикрилом і кузовом. Порівняно результати розрахунків притискної сили та аеродинамічного опору в кожному випадку. Вказане порівняння демонструє, що безпосередньо адитивність опорів та притискної сили не виконується. Використання адитивних розрахунків можливо тим не менш як перше наближення, у цьому випадку гіпотеза адитивності може бути прийнятна з похибкою  $\approx 10\div 12\%$  у бік більших силових факторів для повної задачі, ніж окремих компонентів.

2. Розкрито механізм невиконання адитивності, який, з одного боку може бути сформульований у термінах нелінійності системи рівнянь, що описують турбулентне обтікання автомобіля, з іншого боку, більш наочно він обґрунтовується результатом корегування картини течії в зазорі між антикрилом та кузовом автомобіля, де спостерігається значне вихроутворення, яке відсутнє в тій частині для автомобіля та антикрила окремо, що знижує тиск позаду антикрила та у вказаному просторі, тим самим збільшуючи відповідні сили у порівнянні з їх значенням у вільному потоці.

**Напрямки подальших досліджень.** Подальші дослідження доцільно спрямувати для накопичення даних щодо похибок гіпотези адитивності для різних кузовів автомобілів і в широкому діапазоні швидкостей, що буде потребувати великої кількості окремих чисельних розрахунків. Вказані дослідження можуть надати окрім числових даних ще й тенденційні закономірності щодо можливостей поліпшення аеродинаміки шляхом зовнішніх навісних елементів для кузовів різних типів.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Edgar J. A Century of Car Aerodynamics: the Science and Art of Cars and Airflow. Amazon Digital Services LLC, 2021. 218 p.
2. Волков В. П., Вільський Г. Б. Теорія руху автомобіля: підручник. Суми : Університетська книга, 2010. 320 с.
3. Katz J. Automotive aerodynamics. Chichester: John Wiley & Sons, 2016. 590 p.
4. McBeath S. Competition car aerodynamics: A practical handbook. Haynes Publishing, 2006. 232 p.
5. Katz J. Race car aerodynamics: Designing for speed. Cambridge: Bentley Publishers, 1995. 271 p.
6. Shkvar Y., Kandume J., Redchys D. The key role of modern aerodynamic trends in

increasing the energy efficiency of high-speed vehicles. *Transport Problems*. 2024. Vol. 19 (1). P. 63–70. <https://doi.org/10.20858/tp.2024.19.1.09>.

7. Hucho W.-H. *Aerodynamics of Road Vehicles*. 4th ed. SAE International, 1998. 918 p.

8. Genta G. *Motor Vehicle Dynamics – Modeling and Simulation*. World Scientific Publishing Company, 2006. 539 p.

9. Zhang Y., Jian J., Wang G., Jia Y., Zhang J. Research on vehicle aerodynamics and thermal management based on 1D and 3D coupling simulation. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 18. P. 6783. <https://doi.org/10.3390/en15186783>.

10. Janson T., Piechna J. Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristics of a High-Speed Car with Movable Bodywork Elements. *Archives of Mechanical Engineering*. 2015. Vol. 62, No. 4. P. 451–476.

11. Єгоров А. А., Куличенко П. Н., Русанов С. А., Лобов О. О. Використання деталей складних профілів для зменшення аеродинамічного опору. *Вісник ХНТУ*. 2019. № 3(70). С. 22–30.

12. Piechna J., Kurec K., Broniszewski J., Remer M., Piechna A., Kamieniecki K., Bibik P. Influence of the car movable aerodynamic elements on fast road car cornering. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 3. P. 689. <https://doi.org/10.3390/en15030689>.

13. Roberts L. S., Correia J. J., Mark V., Finnis M. V., Knowles K. Aerodynamic characteristics of a wing & flap configuration in ground effect & yaw. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2015. Vol. 230. P. 841–854. <http://doi.org/10.1177/0954407015596274>.

14. Kurec K., Piechna J. Influence of side spoilers on the aerodynamic properties of a sports car. *Energies*. 2019. Vol. 12. P. 4697. <http://doi.org/10.3390/en12244697>.

15. Szudarek M., Piechna J. CFD analysis of the influence of the front wing setup on a time attack sports car's aerodynamics. *Energies*. 2021. Vol. 14. P. 7907. <http://doi.org/10.3390/en14237907>.

16. Русанов С. А., Шильцин Я. В., Шатохіна І. А., Дроздов М. С. Моделювання аеродинаміки автомобілів з врахуванням антикрила для покращення зчеплення з трасою. *Матеріали XII Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти та молодих вчених з автоматичного управління, присвяченої Дню ракетно-космічної галузі України*. Херсон–Хмельницький. 2025. С. 154.

17. Mohammadi B., Pironneau O. *Analysis of the K-Epsilon turbulence model*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 1994. 205 p.

## REFERENCES

1. Edgar, J. (2021). *A century of car aerodynamics: The science and art of cars and airflow*. Amazon Digital Services LLC.

2. Volkov, V. P., & Vilskyi, H. B. (2010). *Teoriia rukhu avtomobilia: pidruchnyk*. Sumy: Universytetska knyha.

3. Katz, J. (2016). *Automotive aerodynamics*. Chichester: John Wiley & Sons.

4. McBeath, S. (2006). *Competition car aerodynamics: A practical handbook*. Haynes Publishing.

5. Katz, J. (1995). *Race car aerodynamics: Designing for speed*. Cambridge: Bentley Publishers.

6. Shkvar, Y., Kandume, J., & Redchyts, D. (2024). The key role of modern aerodynamic trends in increasing the energy efficiency of high-speed vehicles. *Transport Problems*, 19(1), 63–70. <https://doi.org/10.20858/tp.2024.19.1.09>

7. Hucho, W.-H. (1998). *Aerodynamics of road vehicles* (4th ed.). SAE International.

8. Genta, G. (2006). *Motor vehicle dynamics – Modeling and simulation*. World Scientific Publishing Company.

9. Zhang, Y., Jian, J., Wang, G., Jia, Y., & Zhang, J. (2022). Research on vehicle

aerodynamics and thermal management based on 1D and 3D coupling simulation. *Energies*, 15(18), 6783. <https://doi.org/10.3390/en15186783>.

10. Janson, T., & Piechna, J. (2015). Numerical analysis of aerodynamic characteristics of a high-speed car with movable bodywork elements. *Archives of Mechanical Engineering*, 62(4), 451–476.

11. Yehorov, A. A., Kulychenko, P. N., Rusanov, S. A., & Lobov, O. O. (2019). Vykorystannia detaley skladnykh profiliiv dlia zmenshennia aerodynamichnoho oporu [Use of complex-profile parts to reduce aerodynamic drag]. *Visnyk KhNTU*, (3)70, 22–30.

12. Piechna, J., Kurec, K., Broniszewski, J., Remer, M., Piechna, A., Kamieniecki, K., & Bibik, P. (2022). Influence of the car movable aerodynamic elements on fast road car cornering. *Energies*, 15(3), 689. <https://doi.org/10.3390/en15030689>.

13. Roberts, L. S., Correia, J. J., Mark, V., Finnis, M. V., & Knowles, K. (2015). Aerodynamic characteristics of a wing & flap configuration in ground effect & yaw. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 230, 841–854. <https://doi.org/10.1177/0954407015596274>.

14. Kurec, K., & Piechna, J. (2019). Influence of side spoilers on the aerodynamic properties of a sports car. *Energies*, 12, 4697. <https://doi.org/10.3390/en12244697>.

15. Szudarek, M., & Piechna, J. (2021). CFD analysis of the influence of the front wing setup on a time attack sports car's aerodynamics. *Energies*, 14, 7907. <https://doi.org/10.3390/en14237907>.

16. Rusanov, S. A., Shyltsyn, Ya. V., Shatokhina, I. A., & Drozdov, M. S. (2025). Modeliuvannia aerodynamiky avtomobiliv z vrahuvanniam antykryla dlia pokrashchennia shcheplyennia z trasoiu. *Materialy XII Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii здобувачив вищої освіти та молодих вчених з автотранспортного управління, прясвіаченої Дніу ракетно-космічної галузі України* (p. 154). Kherson–Khmelnitskyi: Vydavnytstvo FOP Vyshemyrskyi V. S.

17. Mohammadi, B., & Pironneau, O. (1994). *Analysis of the K-Epsilon turbulence model*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.

**Rusanov S. A., Kliuiev O. I., Shyltsin Ya. V., Drozdov M. S. SPECIFICS OF MATHEMATICAL AND COMPUTATIONAL MODELING OF CAR AERODYNAMICS WITH A REAR WING**

*This article explores the specifics of mathematical and computational modeling of automotive aerodynamics involving a rear wing. The main focus is on assessing the degree to which the aerodynamic effects of the rear wing and the vehicle body can be considered additive when analyzed separately. Due to the inherent nonlinearity of the Navier–Stokes equations, and even more so with the inclusion of turbulence modeling equations, complete additivity is theoretically unattainable. Nevertheless, this question remains practically important, particularly given that rear wings are often sold as aftermarket aerodynamic components with manufacturer-quoted downforce values derived from simulations or tests performed in isolation from the vehicle.*

*To investigate this issue, a series of numerical experiments were conducted using CFD techniques that replicate wind tunnel testing conditions. The simulations addressed an external flow problem using the k-ε turbulence model. Three configurations were modeled and compared: the vehicle without the rear wing, the standalone rear wing in free stream, and the complete vehicle with the rear wing installed.*

*The results show that the downforce generated by the wing when mounted on the vehicle is greater than that produced by the same wing in an isolated flow. Similarly, the aerodynamic drag of the rear wing increases when it is installed on the car. These differences arise due to modifications in the flow field caused by the presence of the vehicle body. Specifically, the airflow velocity approaching the wing is higher when the wing is mounted on the vehicle than under free stream conditions. Additionally, significant vortex structures are formed in the space between the wing and the vehicle body, which contribute to a localized pressure drop behind the wing and in this intermediate region. This intensified vortex activity results in greater aerodynamic forces compared to those observed in the isolated case.*

**Key words:** aerodynamics; turbulence; car; wing; downforce.

© Русанов С. А., Ключев О. И., Шильцин Я. В., Дроздов М. С.

Статтю прийнято до редакції 09.06.2025

## ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПОЛОЖЕННЯ БАЗОВИХ ТОЧОК ЗМІСТОВНОЇ МОДЕЛІ ПОВОРОТУ СУДНА

**Товстокорий О. М.**, к.т.н., капітан далекого плавання, завідувач кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028.

*Об'єктом дослідження є процес повороту судна. Стаття присвячена питанням здійснення чисельних розрахунків положення всіх базових точок змістовної моделі повороту судна.*

*Застосування змістовної моделі повороту судна і методів розрахунку положення базових точок дозволяє розрахувати процес повороту судна і визначити положення базових точок. Положення центра ваги знімається з вантажного плану судна. Положення полюсу повороту і положення центра обертання визначаються простими експериментальними та експериментально-розрахунковими методами.*

*Визначення положення центру обертання і полюсу повороту надає можливість значно точніше визначати положення судна при повороті, що підвищить безпеку плавання.*

*Визначення абсциси полюсу повороту по тангенційним швидкостям носа та корми можна використовувати для судна з будь-яким типом і кількістю головних двигунів і будь-яким типом і кількістю рушіїв.*

*Визначення зміщення центру обертання від центру ваги шляхом порівняння положень абсциси полюсу повороту при нульовій і максимальній швидкостям судна, визначеним по тангенційним швидкостям носа та корми можна використовувати для судна, у якого бокова сила утворюється різними шляхами, але в одному й тому ж місці як при нульовій швидкості, так і при швидкості повного ходу.*

**Ключові слова:** навігаційна безпека; змістовна модель повороту судна; визначення положення полюсу повороту; визначення положення центру обертання; маневрування в стиснених водах.

**DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.247-257**

**Вступ.** Знання закономірності руху судна при поворотах підвищує точність розрахунку шляху судна. Знаючи закономірності руху судна, потрібно вирахувати чисельні значення переміщення його базових точок [центра ваги (ЦВ), центра обертання (ЦО) і полюсу повороту (ПП)], що підвищить точність визначення руху судна, що, в свою чергу, підвищить безпеку.

Положення центра ваги знімається з вантажного плану судна. Потрібно розглянути яким чином на практиці можна розрахувати положення базових точок змістовної теорії повороту судна: ЦО та ПП для підвищення точності визначення положення судна при русі по криволінійній траєкторії і таким чином підвищення навігаційної безпеки плавання.

Положення полюсу повороту і положення центра обертання пропонується визначати простими експериментально-розрахунковими методами. Використовуючи такі методи, визначення зміщення центру обертання від центру ваги і визначення положення полюсу повороту можна використовувати для судна з будь-яким типом і кількістю головних двигунів і будь-яким типом і кількістю рушіїв.

Потрібно розглянути яким чином на практиці можна розрахувати положення базових точок змістовної теорії повороту судна: ЦО та ПП для підвищення точності визначення положення судна при русі по криволінійній траєкторії і таким чином підвищення навігаційної безпеки плавання.

**Постановка проблеми.** Згідно з інформацією джерела [1] стосовно змістовної моделі повороту судна, відомо, як переміщується положення базових точок: ЦО та ПП. Проте, слід зазначити, що в зазначених умовах, дійсне зміщення ЦО та ПП не відоме, що і є проблемою, яку потрібно вирішити.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Визначення і розрахунки положень центру обертання і полюсу повороту раніше розглядалося багатьма авторами. Ми пропонуємо розглянути, як різні автори пропонували визначати положення полюсу повороту або центру обертання.

Так, у статті [1] була запропонована змістовна модель повороту судна, яка описує процес повороту судна, використовуючи 3 базові точки: ЦВ, ЦО та ПП.

Капітан Х. Хойер у [2] вважає, що полюс повороту, який він називає центром обертання, знаходиться на відстані від чверті до третини довжини судна від кінців судна при русі судна вперед або назад, відповідно.

Капітани Дьомін С. І. і Мальцев А. С. у роботах [3] та [4] вважають, що при русі судна вперед на повному ходові полюс повороту зміщується в точку, яка розташована на відстані 0,1 довжини судна від форштевню.

Також капітан Дьомін С. І. у роботі [3] пропонує визначення положення ПП для стоячого судна розрахунковим шляхом. Автором знайдена залежність між відносним положенням полюсу повороту  $\bar{X}_{nn}$  і відносним плечем бокової сили  $\bar{X}_p$

$$\bar{X}_p = \frac{\frac{1}{6} \bar{X}_{nn}^4 - \frac{1}{4} \bar{X}_{nn}^2 - \frac{1}{32}}{\frac{2}{3} \bar{X}_{nn}^3 + \frac{1}{2} \bar{X}_{nn}}. \quad (1)$$

Ця залежність також представлена у вигляді графіка, наведеного в [3].

Artyszuk J. у [5] пропонує розраховувати положення абсциси та ординати полюсу повороту за наступними формулами:

$$V_y + R_x \omega_z = 0 \rightarrow R_x = -\frac{V_y}{\omega_z}; \quad (2)$$

$$V_x - R_y \omega_z = 0 \rightarrow R_y = \frac{V_x}{\omega_z}. \quad (3)$$

Капітан Х. Кавьє в [6] вважає, що центр обертання може зміщуватися відносно центра ваги максимум на 10% довжини судна.

Автори в [7] показують рух судна лагом під впливом дії 2 буксирів і пояснюють, де знаходиться полюс повороту.

S. G. Seo в [8] вважає, що залежно від форми корпусу полюс повороту на повному ходові вперед може розташовуватися на відстані від 0,3299 до 0,3984 довжини судна від форштевня, причому, чим більшим є коефіцієнт загальної повноти, тим полюс повороту буде розташовуватися ближче до носу.

Автори в [9] та [10] пропонують визначати положення полюсу повороту по тангенціальним швидкостям носа та корми без урахування течії та в [11] та [12] з урахуванням течії відповідно.

Змість складних математичних розрахунків можна запропонувати експериментальне визначення положення ПП за тангенціальними швидкостями носа та корми [9, 10].

Визначають тангенціальні швидкості носа  $V_H$  та корми  $V_K$  судна (рис. 1) [9].

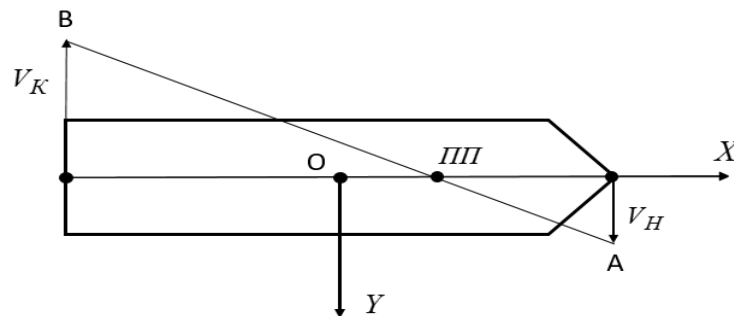


Рисунок 1 – Схема визначення положення полюсу повороту по тангенціальним швидкостям носа і корми судна

Визначення положення абсциси ПП можна виконати за наступною формулою

$$X_{ПП} = \left( \frac{V_K + V_H}{V_K - V_H} \right) \frac{L}{2}, \quad (4)$$

де  $X_{ПП}$  – абсциса полюсу повороту;  
 $V_H$  – тангенційна швидкість носа;  
 $V_K$  – тангенційна швидкість корми;  
 $L$  – довжина судна між перпендикулярами.

При наявності течії, тангенціальні швидкості носу і корми судна відносно ґрунту будуть відрізнятися від тангенціальних швидкостей носу і корми на величину швидкості течії, а також будуть відрізнятися і положення ПП [11, 12]. На рис. 2 показані тангенціальні швидкості носу  $V_{HT}$  і корми  $V_{KT}$  судна, а також положення полюсу повороту  $ПП_T$  при наявності течії [11].

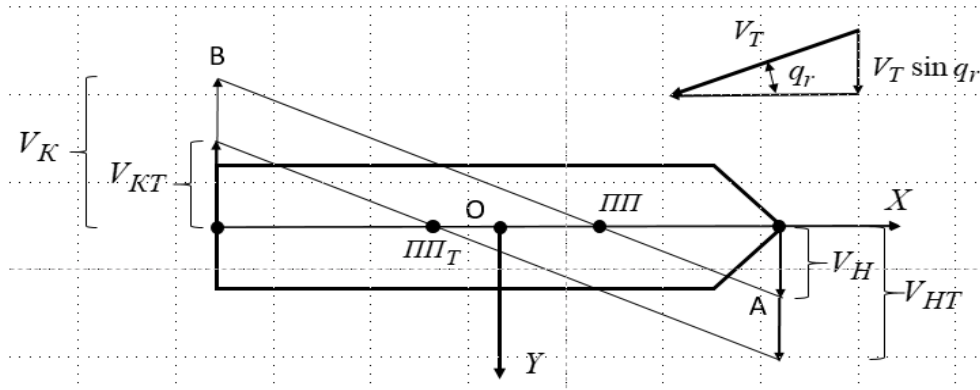


Рисунок 2 – Тангенціальні швидкості носу і корми судна та положення полюсу повороту при наявності течії

Тангенціальні складові швидкості відносно води визначаємо як

$$V_H = V_{HT} - V_{TT}, \quad V_K = V_{KT} - V_{TT}, \quad (5)$$

де  $V_H$  – тангенційна швидкість носа без течії;  
 $V_K$  – тангенційна швидкість корми без течії;  
 $V_{HT}$  – тангенційна швидкість носа з течією;  
 $V_{KT}$  – тангенційна швидкість корми з течією;  
 $V_T$  – тангенційна швидкість течії.

Автори в [13] пропонують визначення положення центра обертання залежно від поздовжньої швидкості і вважають, що максимальне зміщення центра обертання від центра ваги при необмеженій швидкості може досягти половини довжини корпусу судна.

Автори в [14] пропонують визначити зміщення центра обертання для конкретної швидкості судна в відсотках від швидкості повного ходу.

Оскільки положення точки повороту обчислюється від центру обертання, який також зміщується залежно від швидкості судна, важливо знати рух точки повороту відносно фіксованої точки на корпусі судна, наприклад, міделю. Як видно з рисунка 4, ця відстань дорівнює

$$R_{mid} = \Delta x + R. \quad (6)$$

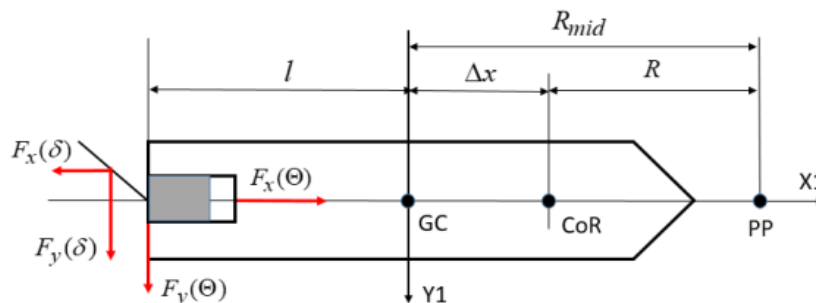


Рисунок 3 – Схема керування конвенційним одногвинтовим судном

Переміщення центру обертання відносно центру ваги можна розрахувати за формулою

$$\Delta x = \frac{L}{2} \left( 1 - \frac{V_{max}}{\eta V_x + V_{max}} \right), \quad (7)$$

або у відносних величинах

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{\eta \overline{V}_x + 1} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\eta \overline{V}_x}{\eta \overline{V}_x + 1} \right), \quad (8)$$

де  $\overline{V}_x = \frac{V_x}{V_{max}}$  – приведена поздовжня швидкість судна;

$$\eta = \frac{2\xi}{1-2\xi};$$

$\xi$  – є коефіцієнтом, який визначається відношенням максимального переміщення центру обертання до довжини судна.

Автори в [15] пропонують визначити зміщення центру обертання розрахунково-експериментальним шляхом.

Автор у [16] та в [17] показує положення полюсу повороту на судні, що не має ходу відносно води [16] та при русі судна вперед та назад [17].

У статті [18] автор вважає, що наявна модель повороту судна не відповідає дійсності і пропонують її переглянути.

У статті [19] автор вважає, що коли судно повертається носом або кормою, полюс повороту досягає розташування десь між 1/3 і 1/6 довжини судна від носа або корми, залежно від форми корпусу, швидкості та застосованого моменту керма. Розташування полюсу повороту визначає радіус кола, завершеного або спрямованого під час повороту. Менше коло досягається, полюс повороту знаходиться ближче до носа або корми, для повороту вперед або назад відповідно. Для полюсу повороту, розташованого далі від носа, коло більше. З точки зору форми корпусу, судно повнішої форми, як-от балкер або танкер, має полюс повороту ближче до носа, ніж більш стрункі судна.

Таким чином, різні автори пропонують різні методи визначення базових точок повороту судна.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є визначення методів отримання позицій базових точок.

Це дасть змогу створити систему винайдення положення базових точок і підвищення точності керування судном у стиснених водах, що призводить до підвищення безпеки судноводіння в цілому.

Поставлена мета досягається шляхом визначення числових значень базових точок нової змістовної моделі повороту судна, розробленої на основі 3-х точкової схеми повороту, із врахуванням останніх поглядів на теорію повороту судна і зведення їх у систему.

Задачею дослідження є визначення числових значень базових точок нової змістовної моделі: Центра Обертання та Полюсу Повороту для будь-яких суден, з будь-якою кількістю і будь-яким типом рушіїв.

**Викладення основного матеріалу.** Чисельне визначення базових точок повороту судна. Експериментальне визначення положення Полюсу Повороту по тангенційним швидкостям носа та корми судна. Положення абсциси полюсу повороту по тангенційним швидкостям носа та корми можна визначити за методикою, описаною в роботах [9] та [11] за формулами (4) та (5) – варіант 1.

Також положення абсциси полюсу повороту можна визначити за формулами (2) та (3), запропонованими в роботі [6] – варіант 2.

Якщо відбувається визначення положення ПП на одnogвинтовому конвенційному судні, то можна використати обидва методи з позитивним результатом.

Але вже при двогвинтовому конвенційному судні виникає потреба враховувати дві сили. При розрахунку за формулами, запропонованими в роботі [6], потрібно додаткові розрахунки для отримання результуючої сили.

Також потреба в додаткових розрахунках виникає при використанні додатково носового підрулюючого пристрою, або іншої додаткової бокової сили (наприклад, буксирів).

При використанні азимутальних поворотних колонок виникає потреба в урахуванні різних сил, а також напрямків упору цих сил.

Такі ж самі потреби виникають при використанні крильчастих рушіїв.

При використанні вітрильного оснащення потрібно враховувати результуючу силу вітру, яка змінює силу і напрямок залежно від кількості вітрил і напрямку вітру.

Можна також привести й інші приклади, але всі вони показують, що використання методу по варіанту 2 крім одnogвинтового конвенційного судна завжди потрібні додаткові розрахунки і в деяких випадках вони можуть бути досить складними.

Формули визначення положення абсциси полюсу повороту по варіанту 1 не включає ніяких натяків на кількість і якість використаних рушіїв, беруться тільки дані про геометричне переміщення носа та корми судна, які можуть визначатися різними методами (GPS, Допплер-лаг тощо), без будь-якого зв'язку з кількістю і якістю двигунів і рушіїв. І по суті, немає значення, який двигун і рушій (включаючи вітрило) має судно, має значення тільки тангенційні швидкості носа і корми. Тобто, цей метод є універсальним.

Отже, визначення абсциси полюсу повороту по тангенційним швидкостям носа та корми можна використовувати для судна з будь-яким типом і кількістю головних двигунів і будь-яким типом і кількістю рушіїв. Цього раніше не казали.

Визначення положення абсциси полюсу повороту на повному ходові при перекладці керма можна визначити по тангенційним швидкостям носа та корми.

Визначити положення полюсу повороту по тангенційним швидкостям носа та корми при нульовій швидкості неможливо визначити тільки завдяки перекладки керма. Потік води не буде набігати на кермо і не буде утворювати бокової сили. Тому цю бокову силу потрібно створити в тому ж місці, де її створює кермо. Наприклад, шляхом використання буксира, який працює з кормового клюзу на одній лінії з пером керма під кутом  $90^\circ$  до ДП судна (рис. 4).

Іншим методом визначення абсциси полюсу повороту є розрахунковий метод визначення її положення на стоячому судні, який запропонований у роботі [3].

**Експериментальне визначення положення центра обертання.** Положення ЦО залежить від поздовжньої швидкості судна. Положення ПП залежить від плеча бокової сили відносно ЦО. При прикладенні бокової сили в одній і тій же точці, положення полюсу повороту має бути також в одній і тій же точці. Але, якщо визначити значення положення абсциси ПП при просто при нульовій швидкості, або при відсутній швидкості  $X_{ПП1}$  і при максимальній швидкості (швидкість повного ходу)  $X_{ПП2}$ , то положення полюсу повороту буде різним. За гіпотезою автора різниця цих значень і буде величиною зміщення ЦО -  $\Delta X$ .

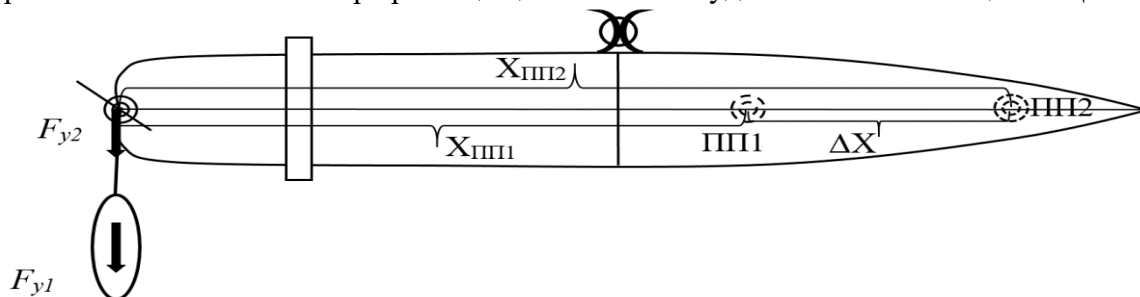


Рисунок 4 – Порядок знаходження величини зміщення Центру Обертання (ЦО) -  $\Delta X$

$$\Delta X = X_{ПП2} - X_{ПП1} . \quad (9)$$

Значення  $\Delta X$  можна визначити за значенням  $X_{ПП1}$ , взятим з графіка залежності положення полюсу повороту від плеча бокової сили і значенням  $X_{ПП2}$ , отриманим експериментально. Таким чином, визначення положення центра обертання можливо розрахунково-експериментальним методом, який описаний у статті [16].

Так, у цій статті максимальна величина зміщення центру обертання, визначена розрахунково-експериментальним методом, дорівнює:

$$\Delta X = X_{\text{пш2}} - X_{\text{пш1}} = 0,37L - 0,17L = 0,2L.$$

У разі руху судна зі швидкістю менше максимальної величини зміщення ЦО вираховується за формулою (8). Значення положення центру обертання для різних швидкостей можна розрахувати заздалегідь і використовувати при реальних маневрах.

Графік з джерела [3] побудований для усередненого судна. Для більш точного визначення максимального зміщення ЦО можна знайти це експериментальним шляхом:

– Положення ПП при нульовій швидкості визначити за допомогою буксиру методом, який описаний вище;

– Положення ПП при швидкості повного ходу, що є реальною максимальною швидкістю для кожного конкретного судна, можна визначити, як описано в роботі [9].

Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що авторами експериментально доведено зміщення полюсу повороту для максимальної швидкості циркуляції, а також висловлено припущення, що причиною такого зміщення є зміщення центру обертання.

Метод визначення максимального зміщення ЦО шляхом порівняння положення полюсу повороту при нульовій швидкості і швидкості повного ходу, отриманих експериментально, є новим і не пропонувався раніше.

Положення ЦО та ПП при розгляді випадку з 2 буксирами, які просувають зупинене судно лагом. Можна розглянути випадок з судном, яке зупинилося і його штовхають або тягнуть лагом два буксири з однаковою силою і з однаковими відстанями від точки прикладення сили до міделю судна, яке сидить на рівному кілі (Рисунок 5). Цей випадок розглядали задовго до мене такі добре відомі автори, як Ноoyer Н. Н. у [2]; Dr. Seong-Gi SEO та Captain Kevin EARL у [7].

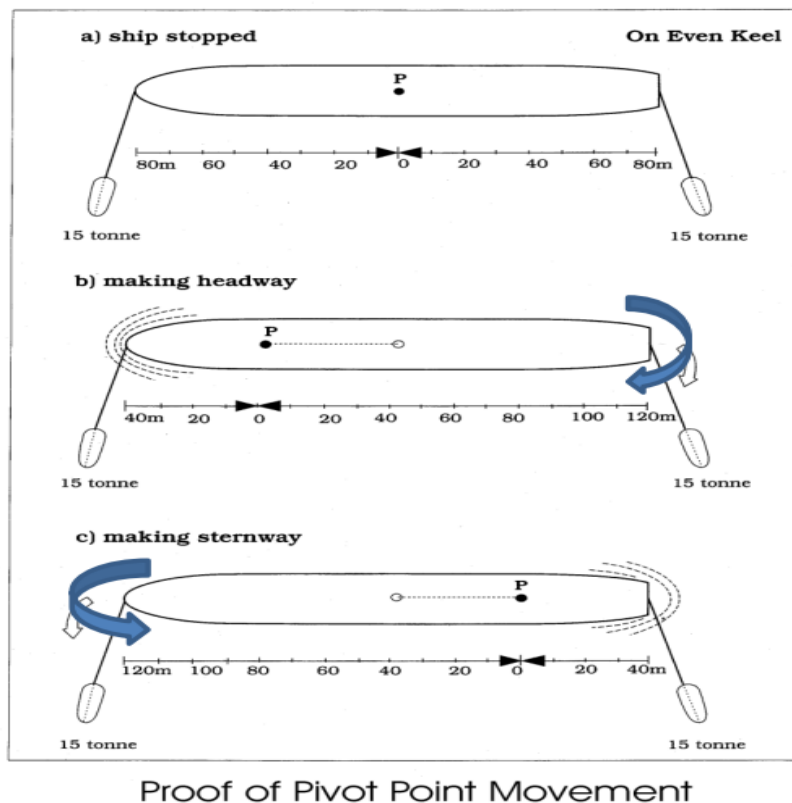


Рисунок 5 – Два буксири тягнуть судно лагом з рівною потужністю [7]

У цьому випадку положення точки P не є положенням полюсу повороту, бо в полюсі повороту бокова швидкість судна має дорівнювати 0.

Для більш наочного пояснення цього я пояснюю це на рисунку 6, де при тих же умовах показані тангенційні швидкості носа та корми, а також положення ЦВ та ЦО і тангенційні швидкості цих точок. Ні одна з вищевказаних точок, ні в носовій, ні в кормовій частині судна не мають тангенційної швидкості, яка дорівнює 0. Тобто, у цьому випадку в межах корпусу немає ні однієї точки, де тангенційна швидкість була б рівною 0.

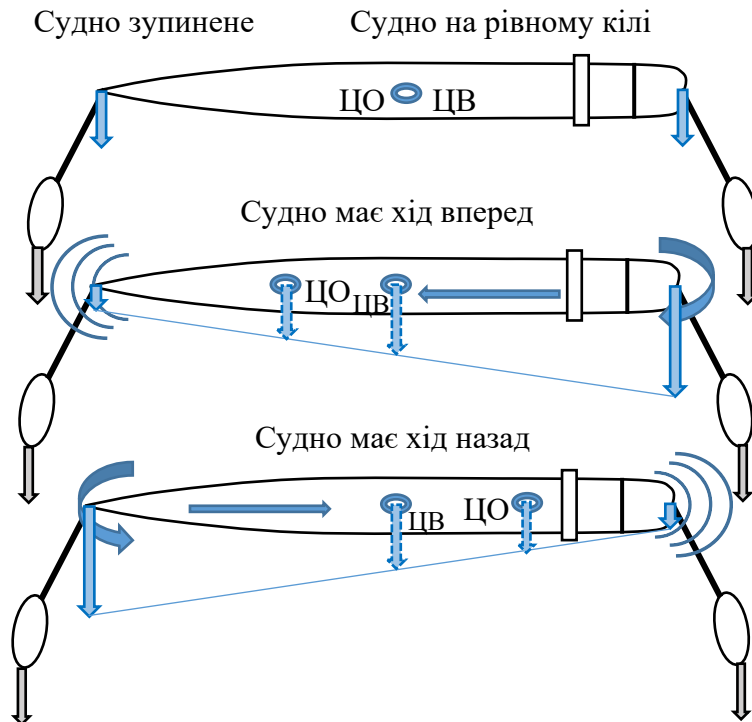


Рисунок 6 – Два буксири тягнуть судно лагом з рівною потужністю

Як насправді виглядає ця картина, показано на рисунку 7. Візьмемо положення, коли буксири тягнуть з однаковою силою, а корма рухається з тангенційною швидкістю  $V_K$ , яка більше носової швидкості  $V_H$ .

Судно на рівному кілі      Судно має хід вперед

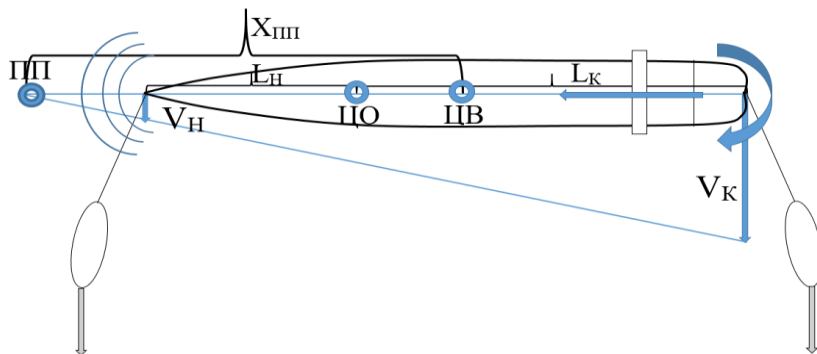


Рисунок 7 – Розташування ЦО та ЦВ при русі судна вперед

При зупинці судна ЦО збігається з ЦВ. Поля тиску навколо корпусу однакові з усіх боків. Коли судно йде вперед (рис. 7), поля тиску навколо корпусу змінюються. У носовій частині ми маємо зону високого тиску, навколо бортів тиск низький. За таких обставин центр бокового опору (ЦБО) рухається до області високого тиску [6]. Деякі автори вважають точку ЦО на цьому рисунку точкою ЦБО, бо в ній прикладена гідродинамічна сила спротиву води і, відповідно, момент цієї сили, але в точці ЦВ – найменший момент інерції судна незалежно від зовнішніх сил і моментів з боку середовища. За думкою автора ЦО є компромісом ЦВ і ЦБО. Можна припустити, що вказану точку слід називати ЦБО. Основною ідеєю є те, що

вона існує, і від неї відраховуються всі важелі бокових сил, прикладених до судна. Розрахунки положення ЦО, з урахуванням вказаного, наведені вище. У будь-якому випадку точки ЦБО і ЦО не виходять за межі корпусу судна. Обертальний рух судна залежить від крутних моментів, прикладених буксирами, які, у свою чергу, залежать від прикладених сил і важелів цих сил. Сили рівні. Це означає, що важелі різні. Коли судно рухається вперед, крутний момент буксира, що працює в кормі, сильніший, ніж крутний момент буксира, розташованого в носові. Судно обертається за годинниковою стрілкою. Коли судно має рух назад, ситуація протилежна, судно обертається проти годинникової стрілки. Положення ЦО залежить від відношення плеч сил.

Але ми також можемо знайти на цьому рисунку положення ПП. Для цього ми будемо використовувати метод тангенційних швидкостей носа і корми [8], який використовує у своїх відео професор Кнуд Бенедикт [15], [16].

Використовуючи величини тангенційних швидкостей  $V_N$  і  $V_K$  також можна знайти положення РР за формулою (4). Ця точка буде в іншому місці, ніж точка Р з рисунка 5.

У випадку, коли носова швидкість  $V_N$  менша за кормову швидкість  $V_K$  і вони обидві спрямовані в одному напрямку (що відповідає положенню судна), положення  $X_{PP}$  знаходиться попереду носової частини судна. Він також може перебувати в різному положенні залежно від поперечної швидкості носа та корми, але загалом ПП та ЦО є різними точками, і вони залежать від різних фізичних принципів.

У випадку, коли носова швидкість  $V_N$  більша за кормову швидкість  $V_K$  і вони обидві спрямовані в одному напрямку, положення  $X_{PP}$  буде за кормою судна.

**Основні результати та їх обговорення.** Основними результатами є отримання методів визначення положення ПП та ЦО.

ПП можна визначати двома методами: експериментально-розрахунковим та експериментальним.

Зміщення положення ЦО пропонується визначати як різницю між положенням ПП при нульовій та при поточній швидкостях. Це пропонується як гіпотеза автора.

#### **Висновки.**

1. Положення абсциси полюсу повороту можна експериментально визначити по тангенційним швидкостям носа та корми судна на будь-якій швидкості, включаючи нульову швидкість і швидкість повного ходу. Визначення абсциси полюсу повороту по тангенційним швидкостям носа та корми можна використовувати для судна з будь-яким типом і кількістю головних двигунів і будь-яким типом і кількістю рушіїв. Раніше ніде не писалось, що метод тангенційних швидкостей носа та корми можна використовувати для будь-яких суден.

2. Для кожного судна можна визначити положення абсциси ПП стоячого судна експериментальним шляхом, наприклад, використавши буксир, який закріпив буксирний трос через кормовий клюз на одній лінії з пером керма і виконує тягу під кутом  $90^\circ$  і виконавши розрахунок положення ПП по тангенційним швидкостям носа і корми. Це підвищить точність визначення положення абсциси ПП. Визначивши положення абсциси полюсу повороту для нульової швидкості, можна використовувати його весь час. Визначення положення ПП стоячого судна пропонується вперше.

3. Для кожного судна можна визначити положення абсциси ПП стоячого судна за графіком на рис. 1.

4. Порівнявши положення ПП стоячого судна з експериментальними даними положення ПП при русі судна, згідно з гіпотезою автора, можна визначити величину зміщення ЦО. Це можна робити не тільки для максимальної швидкості, але й для поточної, уникаючи, таким чином, перерахунку за формулою (8). Визначення величини максимального зміщення ЦО експериментальним методом запропоновано вперше.

5. Метод визначення положення ЦО шляхом порівняння положення абсциси полюсу повороту при нульовій швидкості і швидкості повного ходу, отриманих експериментально, є новим і не пропонувався раніше.

6. Визначення зміщення ЦО від ЦВ шляхом порівняння положень абсциси ПП при нульовій і максимальній швидкостям судна по тангенційним швидкостям носа та корми можна використовувати для судна, у якого бокова сила утворюється різними шляхами, але в одному й тому ж місці як при нульовій швидкості, так і при швидкості повного ходу.

7. Таким чином, створена система винайдення числових значень базових точок повороту судна простими, часто геометричними методами, які дають можливість використовувати змістовну модель повороту судна [17] при маневруванні в реальних умовах. Така система запропонована вперше.

8. Визначення чисельних значень зміщення центра обертання і полюсу повороту значно підвищує точність процесу маневрування і взагалі безпеку плавання, особливо в стиснених водах.

**Перспективи подальших досліджень.** При подальших дослідженнях можна зосередитися на визначенні практичних засобів використання змістовної моделі повороту судна у різних випадках морської практики.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tovstokoryi O. M. Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice.
2. Behavior and Handling of Ships. Henry H. Hooyer (Author). Cornell Maritime Press; 1<sup>st</sup> edition (November 1, 1983), 152 p.
3. Дьомін С. І. Управління судном / Дьомін С. І., Жуков Є. І. та ін. М.: Транспорт, 1991. 359 с.
4. Вільський Г. Б., Мальцев А. С., Бездольний В. В., Гончаров Є. І. Навігаційна безпека при лоцманській проводці суден. // Під ред. А. С. Мальцева, Г. Б. Вільського. Одеса-Миколаїв: Фенікс, 2007. 456 с.
5. Artyszuk J. Pivot point in ship manoeuvring. Scientific Journals Maritime University of Szczecin. 2010. Vol. 20, No 92. P. 13–24.
6. Cauvier H. The Pivot Point. The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association. p. 295. 2008. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.
7. A Paradigm Shift in Shiphandling (The Pivot Point) Dr. Seong-Gi SEO Captain Kevin EARL. 15<sup>th</sup> April 2015. Warsash Maritime Academy, Southampton Solent University.
8. Seo S. G. Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 10, Issue 4, 605–612. 2016. <https://doi.org/12.12716/1001.10.04.09>.
9. Товстокорій О. Н. Експериментальне визначення положення полюсу повороту по тангенційним швидкостям носа та корми. Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал, №1(10). 2014. С. 57–63.
10. Патент на корисну модель № 100293. Україна. МПК (2015.01) G08G 3/00. Спосіб інформаційного забезпечення процесу управління судном / Товстокорій О. М., Мальцев С. Е., Бень А. П.: власник Херсонська державна морська академія – у 2014 12711, заявлено 26.11.2014; опубліковано 27.07.2015. Бюл. № 14.
11. Товстокорій О. М., Мальцев С. Е. Визначення положення полюсу повороту за допомогою доплерівського лагу // Судноводіння: Сб. наукових праць /НУ «ОМА», Вип. 26. Одеса: «ИздатИнформ», 2016, С. 183–190.
12. Патент на корисну модель № 114868. Україна. МПК (2017.01) G08G 3/00. Спосіб інформаційного забезпечення маневрування морського судна / Товстокорій О. М., Мальцев С. Е., Бень А. П.: власник Херсонська державна морська академія – у 2016 09646, заявлено 19.09.2016; опубліковано 27.03.2017. Бюл. № 6.

13. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Nosov P., Popovych I., Kyrychenko K. Pivot Point position determination and its use for manoeuvring a vessel. *Ships and Offshore Structures*. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>.
14. Kobets V., Popovych I., Zinchenko S., Nosov P., Tovstokoryi O., Kyrychenko K. Control of the Pivot Point Position of a Conventional SingleScrew Vessel. *ICST 2023. Information Control Systems & Technologies 2023. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference "Information Control Systems & Technologies"* Odesa, Ukraine.
15. Товстокорій О. М., Зінченко С. М., Нагрибельний Я. А., Тимофєєв К. В. Розрахунок величини зміщення центру обертання судна <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.044-055>. Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 26–27 (2023). С. 44–55.
16. Pivot Point Special 1 – Position at Stopped ship: only thusters, no propulsion. By Dr. Knud Benedict. Hochschule Wismar/ Institute ISSIMS, Department of Marine Studies. 2020 <https://www.youtube.com/watch?v=EYTF91NUEt8>.
17. Pivot Point Specials 2 – position for ship moving ahead or astern. By Dr. Knud Benedict. Hochschule Wismar / Institute ISSIMS, Department of Marine Studies. 2020 <https://www.youtube.com/watch?v=v1I8c6aaFgo&t=16s>.
18. Cummins T. Scientific Fact: The ‘traditional’ understanding of the ship’s pivot point is wrong! A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.
19. Ghosh S. What Is The Pivot Point of a Vessel?, *Marine Navigation*. 2024. [https://www.marineinsight.com/marine-navigation/pivot-point-of-a-vessel/#google\\_vignette](https://www.marineinsight.com/marine-navigation/pivot-point-of-a-vessel/#google_vignette).

## REFERENCES

1. Tovstokoryi, O. M. Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice.
2. *Behavior and Handling of Ships*. Henry H. Hooyer (Author). Cornell Maritime Press; 1<sup>st</sup> edition (November 1, 1983), 152 p.
3. Domin, S. I. (1991). *Upravlinnya sudnom / Domin S. I., Zhukov E. I. ta in. M.: Transport*, 359 s.
4. Vilskiy, G. B., Maltsev, A. C., Btzdolnyi, V. V., Goncharov, E. I. (2007). *Navigatsiyna bezpeka pry lotsmanskiiy provodtsi suden. // Pid red. A. C. Maltseva, G. B. Vilskego. Odesa – Mykolaiv: Fenix*, 456 s.
5. Artyszuk, J. (2010). Pivot point in ship manoeuvring. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. Vol. 20, No 92. P. 13–24.
6. Cauvier, H. (2008). The Pivot Point. *The PILOT*. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots’ Association. p. 295. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.
7. A Paradigm Shift in Shiphandling (The Pivot Point) Dr. Seong-Gi SEO Captain Kevin EARL. 15<sup>th</sup> April 2015. Warsash Maritime Academy, Southampton Solent University.
8. Seo, S. G. (2016). Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept, *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, Vol. 10, Issue 4, 605–612. <https://doi.org/12.12716/1001.10.04.09>.
9. Tovstokoryi, O. M. (2014). Eksperimentalne vyznachennya polozhennya polyusu povorotu po tangentsiynym shvidkostyam noca na kormy. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii: naukovyi zhurnal*, #1(10). s. 57–63.
10. Patent na korysnu model #100293. Ukraina. MPK (2015.01) G08G 3/00. Sposib informatsiynogo zabezpechennya protsesu upravlinnya sudnom/ Tovstokoryi O. M., Maltsev S. E., Ben A. P.: vlasnyk Khersonska derzhavya morskya akademiya – u 2014 12711, zayavleno 26.11.2014; opublikovano 27.07.2015. bul.#14.

11. Tovstokoryi, O. M., Maltsev, S. E. (2016). Vyznachennya polozhennya polyusu povorotu za dopomogoyu dopplerovsrogo lagu// Sudnovodinnya: Cb. Naukovykh prats/ NU "OMA", vyp. 26. Odesa: "IzdatInform", S. 183–190.
12. Patent na korysnu model #114868. Ukraina. MPK (2017.01) G08G 3/00. Sposib informatsiynogo zabezpechennya manevruvannya morskogo sudna/ Tovstokoryi O. M., Maltsev S. E., Ben A. P.: vlasnyk Khersonska derzhavya morskya akademiya – u 2016 09646, zayavleno 19.11.09.2016; opublikovano 27.03.2017. bul.#6.
13. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., Kyrychenko, K. Pivot Point position determination and its use for manoeuvring a vessel. Ships and Offshore Structures. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>.
14. Kobets, V., Popovych, I., Zinchenko, S., Nosov, P., Tovstokoryi, O., Kyrychenko, K. (2023). Control of the Pivot Point Position of a Conventional SingleScrew Vessel. ICST 2023. Information Control Systems & Technologies 2023. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference "Information Control Systems & Technologies" Odesa, Ukraine.
15. Tovstokoryi, O. M., Zinchenko, S. M., Nagrybelnyi, Y. A., Timofeev, K. V. Pozpahunok velychyny zmishchennya tsentru obertannya sudha <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.044-055>. Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii: naukovyi zhurnal, #26–27(2023) s. 44–55.
16. Pivot Point Special 1 – Position at Stopped ship: only thusters, no propulsion. By Dr. Knud Benedict. Hochschule Wismar/ Institute ISSIMS, Department of Marine Studies. 2020 <https://www.youtube.com/watch?v=EYTF9INUEt8>.
17. Pivot Point Specials 2 – position for ship moving ahead or astern. By Dr. Knud Benedict. Hochschule Wismar / Institute ISSIMS, Department of Marine Studies. 2020 <https://www.youtube.com/watch?v=v1I8c6aaFgo&t=16s>.
18. Cummins, T. (2020). Scientific Fact: The ‘traditional’ understanding of the ship’s pivot point is wrong! A review of the ship’s pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.
19. Ghosh, S. (2024). What Is The Pivot Point of a Vessel?, Marine Navigation. [https://www.marineinsight.com/marine-navigation/pivot-point-of-a-vessel/#google\\_vignette](https://www.marineinsight.com/marine-navigation/pivot-point-of-a-vessel/#google_vignette).

**Tovstokoryi O. M. PRACTICAL METHODS FOR CALCULATING THE POSITION OF THE BASIC POINTS OF THE SUBSTANTIVE MODEL OF THE SHIP'S TURN**

*The object of the study is the process of turning the ship. It is necessary to numerically calculate the positions of all the base points of the substantive model.*

*Knowledge of the substantive model of ship turning and methods for calculating the positions of the base points allow us to calculate the process of turning the ship and determine the positions of the base points. The position of the center of gravity is taken from the ship's cargo plan. The position of the pivot point and the position of the center of rotation are determined by simple experimental and experimental-calculation methods.*

*Determining the position of the center of rotation and the pivot point makes it possible to determine the position of the ship during turning much more accurately, which will increase the safety of navigation.*

*Determination of the abscissa of the pivot point by the tangential speeds of the bow and stern can be used for a vessel with any type and number of main engines and any type and number of thrusters.*

*Determination of the displacement of the center of rotation from the center of gravity by comparing the positions of the abscissa of the pole of rotation at zero and maximum vessel speeds, determined by the tangential speeds of the bow and stern, can be used for a vessel in which the lateral force is generated in different ways, but in the same place both at zero speed and at full speed.*

**Key words:** *navigational safety substantive model of vessel rotation; determination of the position of the pivot point; determination of the position of the center of rotation; maneuvering restricted waters.*

© Товстокорій О. М.

Статтю прийнято до редакції 16.02.2025

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

До друку приймаються статті українською чи англійською мовами, що містять результати власних оригінальних досліджень, які мають наукову і практичну цінність і не публікувалися досі. До друку **не приймаються суто оглядові статті**. Відповідальність за зміст статті несе автор.

Згідно з вимогами п. 3 Постанови Президії Вищої Атестаційної Комісії України № 7-05/1 від 15.01.2003 р., наукові статті, що надаються до друку, повинні містити наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які посилається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки щодо даного дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку.

**Обсяг статей** – 10...15 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути не більше 30% обсягу основної частини.

**Оформлення статті.** На першій сторінці рукопису зазначається код УДК, назва роботи, прізвище, ініціали та науковий ступінь (звання) автора(ів).

**Код УДК** – по лівому краю, розмір шрифту – 10.

**Назва** – по центру друкованими літерами (шрифт жирний, розмір шрифту – 14).

**Інформація про автора(ів):** прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, посада, повна назва установи або громадської організації, держава, e-mail, ORCID автора – курсивом, по лівому краю, розміром шрифту 12.

**Текст** надається у форматі редактора MS Word шрифтом Times New Roman, розмір шрифту – 12, інтервал – 1.

**Параметри сторінки** (опція меню ФАЙЛ, Параметри сторінки):

розмір паперу – А4: 210\*297 мм;

орієнтація аркуша – книжна (альбомна не допускається);

поля – 2,00 см;

палітурка – 0,00 см;

колонтитули – 1,30 см;

абзацний відступ – 1,25 см, вирівнювання за шириною, сторінки не нумерувати.

*У статті наводяться тільки ті формули, рисунки, таблиці, що забезпечують розкриття змісту представленого дослідження, всі вони повинні мати посилання в тексті статті.*

**Формули** повинні бути набрані за допомогою вбудованого редактора формул Equation Editor. Всі формули вставляються в таблицю з неокресленим контуром, що складається з двох колонок: у першій знаходиться формула без абзацу і вирівняна по центру, у другій – номер формули теж без абзацу і з вирівнюванням по центру. Межа між колонками таблиці встановлюється на позначці 14 см.

Це стосується також формул і символів формул, які стоять по тексту. Параметри в редакторі формул повинні в точності відповідати наведеним нижче. Розміри (опція меню редактора Equation Editor: РОЗМІР, Визначити ...):

- Звичайний 12 пт.
- Крупний індекс 7 пт.
- Дрібний індекс 5 пт.
- Крупний символ 18 пт.
- Дрібний символ 12 пт.

**Таблиці** набираються у Microsoft Word.

**Рисунки** повинні бути чорно-білими, бажано прозорими, і вставлені у файл статті. Формат рисунків (tif, psx, bmp тощо) повинен бути сумісний з редактором тексту Microsoft Word. Роздільна здатність рисунків – не менше 300 dpi.

**Структура статті:**

- вступ;
- постановка проблеми;
- аналіз останніх досліджень та публікацій;
- мета та задачі дослідження;
- виклад основного матеріалу (методи дослідження, розв'язання задач для забезпечення досягнення поставленої мети);
- основні результати та їх обговорення;
- висновки;
- перспективи подальших досліджень;
- список використаної літератури.

Основні розділи можуть мати назви, дещо відмінні від приведених вище найменувань зі збереженням їх загальної логічної послідовності.

**Список використаної літератури** подається загальним списком у кінці рукопису (послідовність – у порядку згадування по тексту) згідно зі встановленими вимогами стандарту ДСТУ 8302:2015. Список має налічувати 15...30 найменувань, з яких мінімум 2/3 опублікованих за останні 10 років, з них не менше 5 закордонних. Не менше 3 посилань має бути на статті з видань, що індексуються базами Scopus та/або Web of Science Core Collection. Обсяг самоцитуювання (посилання на свої попередні публікації) допускається не більше 1/3 загальної кількості джерел.

До статті також наводиться перелік літератури латиницею (**References**), для його оформлення використовується АРА-стиль. Список літератури транслітерується або перекладається англійською мовою. Транслітерувати інформацію необхідно відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27.01.2010 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (транслітерацію української мови можна здійснити за посиланням <http://ukrlit.org/transliteratsiia#source=0JzQsNGA0YLQuNGI0LXQstGB0YzQutC40Lk=> [обрати стандарт: Паспортний (КМУ 2010)]). Транслітерувати джерела, які пишуться латиницею не потрібно.

**Структуровані анотації** українською мовою обсягом від 150 до 250 слів та англійською мовою обсягом не менше 1800 знаків надаються: на мові оригіналу статті перед вступом, на іншій мові – після тексту статті. У кінці анотацій наводяться ключові слова.

**Основні вимоги до анотацій:**

- анотація має бути написана так, щоб мати можливість бути представленою і сприйнятою читачем окремо від статті;
- анотація має бути позбавленою дублювання інформації, що наведена в заголовку статті;
- анотація має бути інформативною, змістовною, містити коротку інформацію про дослідження, що представлені в анованій роботі – галузь, до якої відноситься робота, актуальність, застосовані методи, основні результати, їх значення для теорії та практики;
- речення, використані в анотації мають містити 10...20 слів, бути зрозумілими для читача без зайвої примітивізації;
- у тексті анотації слід використовувати ключові слова з тексту статті;
- анотація англійською мовою не має бути сліпим дублюванням анотації українською мовою, а бути самостійним цілісним текстом.

**Документи, що подаються до редакції.**

Для публікації автор повинен надати до редакції електронною поштою (на пошту [journalnvksma@gmail.com](mailto:journalnvksma@gmail.com)) електронний варіант наступних документів:

- комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft Word;
- файл кожного рисунка, включеного в статтю, окремо.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

- структурована анотація та ключові слова українською і англійською мовами, включаючи назву статті та прізвища авторів двома мовами – на окремій сторінці;
- ліцензійний договір підписаний усіма авторами;
- відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, наукові інтереси авторів, ORCID автора(ів)) – на окремій сторінці.

Статті, подані на розгляд, проходять перевірку на плагіат та подвійне сліпе рецензування. Для рецензування редакційна колегія може залучати сторонніх фахівців за відповідним напрямом.

Редакційна колегія залишає за собою право приймати рішення щодо відповідності представлених робіт напрямом журналу. Матеріали, що не оформлені згідно наведених правил, містять плагіат, чи не відповідають напрямом журналу будуть відхилені.

***Положення про конфіденційність***

Імена та електронні адреси, вказані користувачами на сайті цього журналу, будуть використані виключно для виконання внутрішніх технічних завдань цього журналу; вони не будуть поширюватись та передаватись стороннім особам.

## DESIGN REQUIREMENTS FOR SCIENTIFIC WORKS

Only articles in Ukrainian or English containing the results of authors own original research, which have scientific and practical value and have not been published yet, could be accepted for publication. Purely review articles are not accepted for publication. The author is responsible for the content of the article.

According to the requirements of item 3 of the Resolution of the Presidium of the Supreme Certifying Commission of Ukraine No. 7-05/1 dated 15.01.2003, scientific articles submitted for publication should contain the following elements: statement of the problem in a general form and its connection with important scientific or practical tasks; analysis of the recent studies and publications in which the solution to the problem, which the author refers to, was initiated; selection of previously unresolved parts of a general problem, to which the article is devoted; formulation of article goals (statement of the task); presentation of the main material of the study with a full justification of obtained scientific results; conclusions and prospects for further scientific research in this area.

**Article total volume** allowed is 10...15 pages with all materials embodied, including tables, figures, graphs and reference list. The sum of figures and tables should be no more than 30% of the research body.

**Article design.** The following information shall be placed on the first page of the manuscript: Universal Decimal Classification (UDC) index, article title, surname, initials, and scientific degree (academic status) of the author (s).

Universal Decimal Classification (UDC) index is to be placed on the left side, font size – 10 pt.

**Article title** is to be placed in the centre in block letters (bold type, font size – 14 pt.).

**Information about an author (s):** surname, initials, academic degree, academic status, occupational title, full name of institution or public organization, country, e-mail address, author's ORCID is to be indicated in Italics, on the left side, font size – 12 pt.

**The text** is to be given in MS Word document format, font – Times New Roman, font size – 12 pt., line spacing – 1.

Page setup (menu option FILE, Page setup):

paper size – A4: 210\*297 mm;

paper layout – book (album is forbidden);

margins – 2.00 cm;

casework – 0.00 cm;

page header/footer – 1.30 cm;

paragraph indent – 1.25 cm, full justification, no page numbering is required.

*The article is to contain only those formulas, figures, tables that provide disclosure of the content of the presented research, all of them must be referenced in the text of the article.*

**Formulas** should be typed using the built-in Equation Editor formula editor. All formulas are to be inserted into a table with no outline, consisting of two columns: the first column is to contain a formula without a paragraph and centre justified, the second one is to contain a formula number (if any), without a paragraph and centre justified. The border between the columns of the table is to be set at 14 cm.

This also applies to formulas and formula characters that appear in the text. The parameters in the formula editor must exactly match the following:

Sizes (Equation Editor menu option: SIZE, Determine ...):

- Regular 12 pt.
- Large index 7 pt.
- Small index 5 pt.
- Large character 18 pt.
- Small character 12 pt.

**Tables** are to be made up in Microsoft Word.

**Figures** should be black and white, preferably transparent, and inserted into the file and article print. Figure format (tif, pcx, bmp, etc.) must be compatible with the Microsoft Word text editor. Figure resolution is to be at least 300 dpi.

**Article structure:**

- introduction;
- statement of the problem;
- analysis of the recent research and publications;
- the purpose and objectives of the research;
- statement of the main material (research methods, problems solutions to ensure the achievement of the objectives);
- discussion of results;
- conclusions;
- directions for further research;
- reference list.

The main sections may have names that are slightly different from the names given above while maintaining the general logical sequence.

**Reference list** is to be given in the form of a general list at the end of the manuscript (the sequence is to be in the order of citation) in accordance with the established requirements of DSTU 8302: 2015 standard. The list should contain total 15...30 titles, of which at least 2/3 published in the last 10 years, of which at least 5 foreign. There should be at least 3 references to articles from publications indexed by the Scopus and/or Web of Science Core Collection databases. The amount of self-citation (links to your previous publications) is allowed to be no more than 1/3 of the total number of sources.

The article is to be followed by the reference list in Roman alphabet (**References**). ARA-style is to be used when executing it. The reference list is to be transliterated or translated into English. Information transliteration is required to be in accordance with the Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated 27.01.2010 “Concerning the regulation of Ukrainian alphabet transliteration by Roman alphabet” (Ukrainian language transliteration can be done at [http://ukrlit.org/transliteratsiia#source=0JzQsNGA0YLQuNGI0LXQstGB0YzQutC40Lk=\[selectstandard:Passport\(CMU2010\)\]](http://ukrlit.org/transliteratsiia#source=0JzQsNGA0YLQuNGI0LXQstGB0YzQutC40Lk=[selectstandard:Passport(CMU2010)])).

It is not required to transliterate the sources written in Roman alphabet.

**Structured abstracts** in Ukrainian (150 to 250 words) and English (not less than 1800 words) languages are given as follows: an abstract is given before the introduction if it has been executed in article source language, but if an abstract has been executed in a language different from article source one, an abstract is given after the text of the article. Keywords list is given under the abstract.

**Basic requirements for abstracts:**

- the abstract must be written in such a way as to be able to be presented and perceived separately from the article;
- the abstract must be devoid of duplication of information given in the title of the article;
- the abstract should be informative, meaningful, contain brief information about the research presented in the annotated paper - the field to which the work belongs, relevance, applied methods, main results, their significance for theory and practice;
- the sentences used in the abstract should contain 10...20 words, be understandable to the reader without excessive primitiveness;
- keywords from the text of the article should be used in the text of the abstract;
- the abstract in English should not be a blind duplication of the abstract in Ukrainian, but should be an independent, complete text.

The documents to be submitted to the editorial office.

In order to be published, the author is required to submit electronic (to [journalnvksma@gmail.com](mailto:journalnvksma@gmail.com)) version of the following documents to the editorial office:

- electronic article – a file, typed in Microsoft Word editor;
- a separate file of each figure included in the article.

Along with the article text, the author (s) must submit:

- structured abstract with keywords list in both Ukrainian and English languages, including article's title and author (s) surname (s) in three languages – on a separate page;
- license contract;
- information about authors (surname, name, middle name, academic degree, academic title, place of employment, occupation title, home or work address, contact telephone number, e-mail address, scientific interests of authors, author (s) ORCID – on a separate page.

Articles submitted for consideration are checked for plagiarism and double-blind peer review. For review, the editorial board can involve external experts in the relevant direction.

The editorial board reserves the right to make decisions regarding the compliance of the presented works with the directions of the magazine. Materials that are not designed according to the above rules, contain plagiarism, or do not correspond to the directions of the journal will be rejected.

#### ***Privacy Statement***

The names and email addresses provided by users on journal's site, shall be used solely to perform the internal technical tasks of this journal; they shall not be distributed or transmitted to any outside parties.

## ЗМІСТ

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

- Kozachok Y., Simanenkov A., Zinchenko S.** 6  
COLLECTIVE CYBERSECURITY OF AUTONOMOUS MARITIME  
VESSELS BASED ON DECENTRALIZED INTELLIGENT ANALYSIS
- Зінченко С. М., Товстокорий О. М., Носов П. С., Онишко Д. М., Козачок Ю. А.** 16  
АВТОМАТИЧНЕ НАЛАШТУВАННЯ НАДЛИШКОВОЇ СТРУКТУРИ  
СИСТЕМИ ДИНАМІЧНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ ПО ДЕТЕРМІНАНТУ
- Лебеденко Ю. О., Тимофеев К. В., Вороненко С. В., Бігун С. В.** 31  
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА  
ДІАГНОСТИКИ ТА МОНІТОРИНГУ ГІБРИДНОГО СУДНОВОГО  
ТУРБОКОМПРЕСОРА З НЕЧІТКОЮ МОДЕЛЛЮ

### *ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ*

- Андреев А. М., Стовба Т. А.** 46  
МЕЖІ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЗМІНИ ОСАДКИ  
МОРСЬКОГО СУДНА ВНАСЛІДОК ЗМІНИ ГУСТИНИ ВОДИ
- Булгаков М. П., Мельник О. М., Алексішин А. В.,  
Мазур О. М., Онищенко О. А.** 59  
ІНТЕГРАЦІЯ РИЗИК-АНАЛІЗУ В ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ  
СУДЕН ПРИ ЗМІНІ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ
- Жуков Д. С., Алексеичук Б. М.** 69  
ФОРМУВАННЯ ПОЛЯ ТОЧНОСТІ ОБСЕРВАЦІЇ СУДНА ЗА ДЕКІЛЬКОМА  
ОРІЄНТИРАМИ
- Нікольський В. В., Слободянюк М. В., Левінський М. В., Нікольський М. В.** 80  
ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ  
БЕЗДРОТОВИХ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ
- Петровський А. В.** 92  
МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ІМІТАЦІЇ ВІДБИТТЯ ЛУНА-СИГНАЛУ РАДАРА  
ВІРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА
- Тимофеев К. В., Вороненко С. В., Лебеденко Ю. О.** 102  
ФУНКЦІОНАЛЬНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ СУДНОВИХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

### *МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО*

- Проценко В. О., Касян О. А.** 118  
ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБЛЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ВИРОБІВ З НОВИХ  
КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

**СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН**

**Бень А. П., Матейчук В. М.** 133  
СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ВИБОРУ МАНЕВРУ СУДНА ЗГІДНО З ВИМОГАМИ МПЗЗС-72

**Бень А. П., Пелихівський Л. О., Соловей О. С.** 145  
СУЧАСНІ МЕТОДИ ЗАПОБІГАННЯ ЗІТКНЕННЯ СУДЕН ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В УПРАВЛІННІ АВТОНОМНИМИ СУДНАМИ

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

**Kochubei P., Nosov P.** 158  
DETERMINING THE IMPACT OF THE HUMAN OPERATOR FACTOR USING A NAVIGATION SIMULATOR

**Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A., Movchan P.** 171  
MULTI-CRITERION OPTIMIZATION OF SITUATIONAL MANAGEMENT OF MARITIME TRANSPORTATION UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

**Slavych V. P.** 187  
MODEL AND METHOD FOR CALCULATING MATRICES OF CORRESPONDENCES TAKING INTO ACCOUNT TIME LIMITS OF TRAVEL BENEFITS

**Бурлаченко Д. А., Мельник О. М.** 195  
МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ТА ІМІТАЦІЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ДЛЯ АВТОНОМНОГО СУДНА З ОЦІНКОЮ СТАБІЛЬНОСТІ ТРАЄКТОРІЇ РУХУ

**Никитюк П. В., Мельник О. М.** 209  
СТВОРЕННЯ ІНТЕГРОВАНОЇ МОДЕЛІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНА

**Петровський А. В., Бень А. П.** 222  
ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ АПРОКСИМАЦІЇ ПОПРАВКИ НА ХВИЛЮВАННЯ ПРИ РОЗРАХУНКУ ГЛИБИНИ ПІД КІЛЕМ

**Русанов С. А., Ключев О. І., Шильцин Я. В., Дроздов М. С.** 237  
ОСОБЛИВОСТІ МАТЕМАТИЧНОГО ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІКИ АВТОМОБІЛІВ З АНТИКРИЛОМ

**Товстокорий О. М.** 247  
ПРАКТИЧНІ МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПОЛОЖЕННЯ БАЗОВИХ ТОЧОК ЗМІСТОВНОЇ МОДЕЛІ ПОВОРОТУ СУДНА

**ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ** 258

## CONTENTS

### *AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES*

**Kozachok Y., Simanenkov A., Zinchenko S.** 6  
COLLECTIVE CYBERSECURITY OF AUTONOMOUS MARITIME  
VESSELS BASED ON DECENTRALIZED INTELLIGENT ANALYSIS

**Zinchenko S. M., Tovstokoryi O. M., Nosov P. S.,  
Onyshko D. M., Kozachok Yu. A.** 16  
AUTOMATIC ADJUSTMENT OF THE DYNAMIC POSITIONING SYSTEM  
REDUNDANT STRUCTURE BY DETERMINANT

**Lebedenko Yu. O., Tymofeev K. V., Voronenko S. V., Bihun S. V.** 31  
INTELLIGENT INFORMATION-MEASUREMENT SYSTEM FOR  
DIAGNOSTICS AND MONITORING OF A HYBRID MARINE  
TURBOCHARGER WITH A FUZZY MODEL

### *ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY*

**Andreev A. M., Stovba T. A.** 46  
LIMITS OF THE APPLICATION OF METHODS FOR DETERMINING  
THE CHANGE IN THE DRAFT OF A SEA VESSEL DUE TO A CHANGE  
IN THE DENSITY OF WATER

**Bulgakov M., Melnyk O., Aleksishyn A., Mazur O., Onishchenko O.** 59  
INTEGRATION OF RISK ANALYSIS IN THE ASSESSMENT OF ENERGY  
EFFICIENCY OF SHIPS AT CHANGING SPEED REGIMES

**Zhukov D. S., Aliksieichuk B. M.** 69  
FORMATION OF THE SHIP'S OBSERVATION ACCURACY FIELD USING  
MULTIPLE LANDMARKS

**Nikolskyi V. V., Slobodyanyuk M. V., Levinskyi M. V., Nikolskyi M. V.** 80  
OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF MARINE DIESEL ENGINES USING  
WIRELESS MONITORING SYSTEMS

**Petrovskyi A.** 92  
MATHEMATICAL MODELS FOR SIMULATING RADAR ECHO SIGNALS  
IN A VIRTUAL TRAINING SYSTEM

**Tymofeiev K. V., Voronenko S. V., Lebedenko Y. O.** 102  
FUNCTIONAL DIAGNOSTICS OF SHIPBOARD HIGH-VOLTAGE  
ELECTRICAL MACHINES

### *MATERIALS SCIENCE*

**Protsenko V. O., Kasyan O. A.** 118  
NEW COMPOSITE MATERIALS MADE PRODUCTS DEVELOPMENT  
AND IMPLEMENTATION FEATURES

**NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING**

- Ben A. P., Mateichuk V. M.** 133  
 DECISION SUPPORT SYSTEM FOR SELECTING A VESSEL MANEUVER  
 ACCORDING TO THE REQUIREMENTS OF THE COLREG-72
- Ben A. P., Pelykhivskiy L. O., Solovey O. S.** 145  
 MODERN METHODS OF PREVENTING SHIP COLLISIONS AND THEIR  
 APPLICATION IN CONTROLLING AUTONOMOUS SHIPS

**TRANSPORT TECHNOLOGIES**

- Kochubei P., Nosov P.** 158  
 DETERMINING THE IMPACT OF THE HUMAN OPERATOR FACTOR USING  
 A NAVIGATION SIMULATOR
- Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A., Movchan P.** 171  
 MULTI-CRITERION OPTIMIZATION OF SITUATIONAL MANAGEMENT  
 OF MARITIME TRANSPORTATION UNDER CONDITIONS OF  
 UNCERTAINTY
- Slavych V. P.** 187  
 MODEL AND METHOD FOR CALCULATING MATRICES OF  
 CORRESPONDENCES TAKING INTO ACCOUNT TIME LIMITS  
 OF TRAVEL BENEFITS
- Burlachenko D., Melnyk O.** 195  
 BEHAVIOR MODELING AND EMERGENCY SIMULATION FOR  
 A MARITIME AUTONOMOUS VESSEL WITH TRAJECTORY STABILITY  
 ASSESSMENT
- Nykytyuk P., Melnyk O.** 209  
 CREATION OF AN INTEGRATED MODEL FOR ENSURING OPERATIONAL  
 SHIP SAFETY
- Petrovskiy A., Ben A.** 222  
 THEORETICAL MODELS OF APPROXIMATION OF WAVE CORRECTIONS  
 IN UNDER KEEL CLEARANCE CALCULATIONS
- Rusanov S. A., Kliuiev O. I., Shyltsin Ya. V., Drozdov M. S.** 237  
 SPECIFICS OF MATHEMATICAL AND COMPUTATIONAL MODELING  
 OF CAR AERODYNAMICS WITH A REAR WING
- Tovstokoryi O. M.** 247  
 PRACTICAL METHODS FOR CALCULATING THE POSITION OF THE BASIC  
 POINTS OF THE SUBSTANTIVE MODEL OF THE SHIP'S TURN
- DESIGN REQUIREMENTS FOR SCIENTIFIC WORKS** 261

Наукове видання

**НАУКОВИЙ ВІСНИК**  
**ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ**

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (30)

Видається з 2009 року

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*  
Технічний редактор *Г. А. Врублевська*  
Коректура англійської мови *А. С. Волкова*

Формат 60x84/16. Папір офсетний.  
Ум. др. арк. 16,75.  
Підписано до друку 23.07.2025.  
Тираж 100 прим.

Видавець і виготовлювач  
Херсонська державна морська академія,  
просп. Незалежності, 20, м. Херсон, 73000  
Ел. адреса: [rvv@ksma.ks.ua](mailto:rvv@ksma.ks.ua)

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої  
справи до Державного реєстру  
ДК № 4319 від 10.05.2012