

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

№ 2 (29)

Видається з 2009 року

Херсон
2024

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії
(протокол № 5 від 24.12.2024 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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

SCIENTIFIC BULLETIN

KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

Science journal

Published twice a year

№ 2 (29)

Issued from 2009

Kherson
2024

Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy : science journal. – Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2024. № 2 (29). – 198 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 № 5 from 24.12.2024)*

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

DEVELOPMENT OF A NAVIGATOR QUALIFICATION MODEL FOR AUTOMATED SHIP HANDLING CONTROL TASKS

Ponomaryova V., Graduate student, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: vikkiivan@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9660-1772;

Nosov P., Ph.D., Associate Professor, Department of Innovative Technologies and Technical Devices of Navigation, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766.

The study aims to develop a comprehensive qualification model for navigators in automated ship control, evaluating technical, cognitive, and behavioral competence to enhance real-time decision-making in variable navigational environments.

The main challenge is integrating advanced technologies like artificial intelligence and fuzzy logic to accurately monitor risks arising from human factors.

The methodology involves creating a model that assesses navigator competencies by integrating various aspects. Data from ECDIS and other sensors are processed into a feature vector. The Mamdani algorithm aggregates fuzzy rules defining qualification parameters, while neural networks model complex interrelationships. The model uses fuzzy membership functions to assess risks considering speed, under-keel depth, weather conditions, and collision probability.

Results show the model detects potential risks timely and automates decision-making, reducing navigator workload in challenging conditions. It effectively predicts ship trajectory, identifies risky zones, and provides safety recommendations.

Practically, it enhances maritime safety through personalized navigator assessment. Integration with existing systems like ECDIS offers flexibility without major infrastructural changes. The system individualizes recommendations, reducing accident risk and improving training efficiency. Future research includes expanding the training database, refining algorithms, and studying the impact of the navigator's psychophysiological state on ship management effectiveness.

Key words: steering control; optimization of control processes; automatic control module; emergency situations; traffic flows; information support; Safety Depth; ECDIS; maneuvering in confined waters; recognition system.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.006-023

Introduction. With global maritime traffic increasing by over 60% and navigational situations becoming more complex, modern shipping faces challenges that demand high navigator preparedness and rapid adaptation. Key issues include managing ships during complex maneuvers – such as navigating narrow straits, limited visibility, high traffic density, and changing weather conditions. Despite advanced decision support and navigational information systems, much responsibility relies on the navigator's qualifications, decision-making abilities, and quick analysis of surrounding factors.

Existing systems like ECDIS, AIS, GPS, and autopilots provide extensive data but often neglect the navigator's cognitive and behavioral aspects, which are crucial in complex situations. Overreliance on automated decision support can lead to excessive dependence, insufficient situational awareness, and potential loss of control during critical moments, especially in difficult sailing conditions. This problem is particularly acute concerning possible collisions, limited under-keel depth, and risks from heavy traffic in high-danger zones.

Traditional decision support systems may not fully account for rapid external changes – like sudden weather shifts or other vessels' course changes – and often emphasize theoretical knowledge over behavioral model development. The absence of a comprehensive navigator model that includes both technical and cognitive aspects poses significant risks to maritime safety and complicates automated control under increased workloads.

Therefore, developing a navigator qualification model for automated ship control tasks is urgently needed to provide objective assessments and enhance the efficiency and reliability of automated ship control systems in complex navigational conditions.

Problem Statement. An analysis of scientific sources shows various approaches to automation and risk assessment in maritime navigation, with a particular emphasis on the use of fuzzy logic, neural networks, and artificial intelligence.

In article [1], an adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) is proposed for a ship's autopilot in unstable environments. Advantages include adaptability to external conditions and the ability to model complex maneuvers thanks to six degrees of freedom. However, the complexity of the system and dependence on precise parameter tuning may limit its application for assessing the navigator's qualification. Work [2] presents a method of multisensor data fusion for detecting moving objects using fuzzy logic. This increases the reliability of target detection, which is useful for the navigator's situational awareness. However, the focus on automatic determination of object positions without considering the human factor limits its application for qualification assessment. In article [3], a risk assessment model is proposed for marine aquaculture platforms, using AIS data to analyze shipping traffic. The model considers numerous environmental factors but is more oriented towards objective data and less towards the behavioral aspects of the navigator. Study [4] examines the implementation of fuzzy logic controllers in automatic navigation using IoT and genetic algorithms. Although aimed at automotive navigation, the principles can be adapted for the marine environment. However, the lack of emphasis on behavioral indicators and the specificity of the marine environment require additional adaptation. Article [5] presents a method of risk assessment using 3,4-quasi-level fuzzy sets and a multicriteria decision-making system. The approach demonstrates flexibility and improved accuracy in risk determination, which is valuable for assessing the navigator's qualification in complex conditions. However, the complexity of customization for the maritime environment and limitations in assessing behavioral characteristics can be obstacles. Article [6] proposes a model that uses AIS data and global optimization algorithms to mitigate conflicts between ships. Advantages include integration of situational awareness and assessment of high-risk zones. However, the lack of attention to behavioral characteristics of the navigator and real-time limitations may reduce the practicality of the method for qualification assessment. In study [7], the perception of navigators towards the collision avoidance decision support system (AIM) is analyzed. The system enhances situational awareness and promotes compliance with COLREGs rules. However, dependence on automatic recommendations and a limited role of traditional skills may limit its effectiveness in the context of qualification assessment.

Article [8] explores modern visual navigation systems for "smart" ships, focusing on the integration of data from various sensors and intelligent algorithms. This promotes increased navigation safety and can be integrated into qualification models for developing environmental analysis skills. However, dependence on technologies and high resource requirements can become obstacles. In work [9], a hybrid model is proposed for assessing navigation risks of autonomous ships by combining STPA and hidden Markov models. This allows identifying risk factors in dynamic conditions. However, the complexity of integrating behavioral aspects and dependence on data accuracy limit its application for qualification assessment. Article [10] explores the impact of augmented reality (AR) on navigator performance. The use of AR enhances situational awareness and can be useful for assessing the ability to effectively manage navigation. However, potential cognitive overload and lack of standardization require further research. In article [11], possibilities for standardizing ECDIS through the implementation of S-Mode are analyzed, aimed at reducing human errors by unifying the interface. This can help in assessing adaptability and competence of the navigator in using standardized systems. However, challenges related to the need for specific training and problems adapting to older models are present. Work [12] presents the RA4MAIS method for identifying risks of integrated AI-based systems for remotely controlled ships. The method considers internal failures, human errors, and environmental conditions. However, limited practical testing and the complexity of integration with traditional risk analysis methods may be obstacles.

In [13], a methodology for merging AIS and radar data is investigated to enhance situational awareness on inland waterways. This improves the accuracy of navigational data and helps in

detecting potential hazards. However, the complexity of algorithms and sensitivity to data quality may complicate practical application. Article [14] examines the interaction of watch officers with the ECDIS system and the impact of interface variability from different manufacturers on navigation safety. Standardization of the interface can reduce the number of human errors, but the lack of a unified standard and complexity in real-world use limit the effectiveness of the approach. Study [15] proposes a model for enhancing navigation safety by analyzing errors in the use of AIS. Emphasis on additional training and standardization of educational programs contributes to improving technical awareness of navigators. However, the narrow focus on AIS errors and lack of attention to cybersecurity reduce the comprehensiveness of the approach. In article [16], a method for predicting navigational behavior of ships based on AIS data using the Attention-LSTM neural network is proposed. This achieves high prediction accuracy, which can improve maritime traffic monitoring. However, high resource requirements and dependence on data quality are limitations.

Article [17] describes a method based on computer vision for assessing the risk of collision between ships, using the YOLOv7 model and the StrongSORT algorithm. Advantages include high accuracy in object detection and tracking, allowing assessment of the navigator's skills in hazard detection. Disadvantages include sensitivity to weather conditions and dependence on camera stability. Articles [18–21] explore the adaptive capabilities of Learning Management Systems (LMS) and their application for improving navigator training. The use of early success prediction models and a systematic approach to LMS implementation can increase learning efficiency. However, the complexity of managing large data volumes and lack of standardization may limit effectiveness. In work [22], a dynamic ship domain model is proposed that takes into account traffic, speed, and the navigator's state. This allows assessing the navigator's adaptability to external conditions. However, computational complexity and dependence on data quality limit practical application.

Articles [23–25] are devoted to improving OCR technologies for processing textual data, which can be useful for automating the processing of navigational documents. However, dependence on image quality and high resource requirements may limit application in the maritime environment.

In article [26], the use of mixed reality for improving maritime navigation is investigated, especially under conditions of remote piloting. Advantages include increased situational awareness, but high hardware requirements and possible visual overload are disadvantages. Article [27] analyzes the implementation of competency-based education in the training of maritime specialists. This promotes increased qualification and navigation safety but requires overcoming financial and organizational barriers.

Overall, the analyzed sources demonstrate a wide range of modern technologies and methods that can be integrated to develop effective models for assessing the navigator's qualification, considering technical and behavioral aspects.

Research Purpose and Objectives. The purpose of the study is the development of a qualification model of the navigator for automated ship control, which will provide a comprehensive assessment of his professional competencies, including technical, cognitive, and behavioral aspects. The model should enhance the efficiency of decision-making in real-time, taking into account changing environmental conditions and the specific skills of the navigator for safe navigation.

Research tasks. The research aims to develop a comprehensive qualification model for navigators by:

Reviewing modern qualification assessment approaches to identify methods using fuzzy logic, neural networks, and artificial intelligence that integrate technical and behavioral aspects.

Formulating model components for systematic assessment, considering input data, hazard level evaluation, qualification parameters, and the navigator's intuitive and cognitive features.

Developing a hazard level assessment module utilizing fuzzy logic for multicriteria navigational risk evaluation, adaptable to external factors and changing conditions.

Creating algorithms to identify navigator qualification parameters based on training, test results, and real navigational scenarios to determine competencies critical for safe navigation.

Developing a cognitive module to analyze navigators' intuitive actions in critical situations, accounting for human factors and assessing risks associated with intuitive decision-making.

Creating modules for ship trajectory prediction and decision-making to analyze trajectories, identify potentially dangerous zones, and provide recommendations to enhance navigation safety.

Ensuring integration with existing navigation systems, particularly ECDIS and AIS, for accurate real-time data processing and timely assessment of the navigator's qualification level and safety.

Primary Research Material. The development of a Navigator Qualification Model (NQM) is based on four key principles:

Comprehensive Assessment: Consider both technical and human factors in evaluating navigational situations.

Adaptability: Adjust to changing navigation conditions and individual navigator characteristics.

Safety Enhancement: Improve safety through risk prediction and providing recommendations.

Real-Time Support: Utilize modern technologies to aid decision-making in real time.

The NQM is structured into six main modules:

1. Input Data and Navigation Parameters

1.1 Data Collection: Gather navigational data (speed, course, position), information from ECDIS and AIS systems, and training results; synchronize and aggregate this data.

1.2 Data Processing: Normalize and filter data to remove noise and outliers.

1.3 Feature Extraction: Extract relevant features to form the system's state vector.

2. Hazard Level Assessment Module

2.1 Fuzzy Logic Risk Assessment: Use membership functions and expert-based fuzzy rules to evaluate risks, resulting in a numerical risk value.

2.2 Mathematical Risk Model: Calculate risk levels using normalized parameters and weight coefficients to model the impact of individual factors.

3. Navigator Qualification Parameters Module

3.1 Qualification Identification: Collect data on test results, training activities, and simulator performance; normalize and filter to create feature vectors.

3.2 Competency Modeling: Define competencies and levels using fuzzy logic; apply neural networks to model complex relationships.

3.3 Model Training: Train neural networks with historical data; optimize weights and validate the model.

3.4 Gap Analysis: Identify competencies below threshold levels; develop improvement plans and update the model with new data.

4. Cognitive Module of Intuitive Actions

4.1 Criteria Generalization: Consolidate intuitive actions into main categories (e.g., perception, decision-making) for simplified analysis.

4.2 Impact Modeling: Define criteria for each category; assess their impact on safety and model them as variables affecting risk levels.

5. Navigational Data and Geolocation Processing Module

5.1 Automated Processing: Capture ECDIS screenshots; preprocess images; use OCR for text recognition.

5.2 Data Analysis: Structure textual data; calculate distances between coordinates; detect deviations from planned routes.

5.3 Visualization: Create interactive maps displaying routes and risk zones to enhance situational awareness.

5.4 System Integration: Transfer processed data to other modules for comprehensive analysis and recommendation generation.

6. Forecasting and Decision-Making Module

6.1 Trajectory Prediction: Use machine learning algorithms to predict future ship positions; adapt models to specific ship conditions.

6.2 Risk Detection: Analyze predicted trajectories for potential hazards; consider uncertainties and human factors.

6.3 Decision Support Integration: Incorporate forecasting results into decision support systems; generate recommendations based on data analysis.

6.4 Recommendation Delivery: Provide timely advice to optimize decisions; display recommendations on interfaces and interactive maps.

An important condition in the development of the NQM is considering the interaction between its components. The development of the NQM involves creating the following connections (Figure 1):

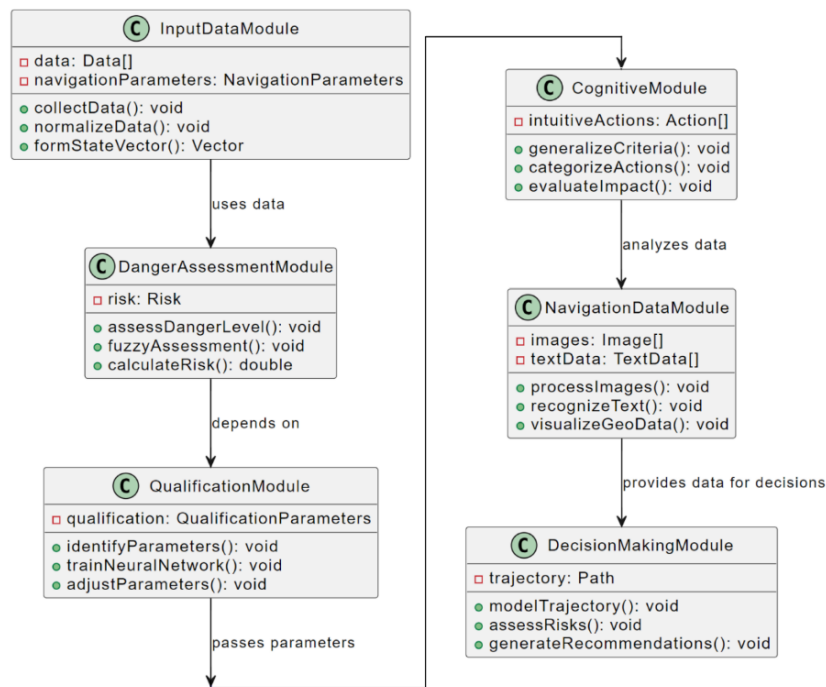


Figure 1 – Scheme of interaction between components of the navigator's qualification model

Input data provide information for all modules, supporting the relevance and accuracy of the analysis.

The hazard level assessment module uses data from navigational parameters and the navigator's qualification to calculate risks.

The module for identifying qualification parameters influences risk assessment, considering the navigator's level of competencies.

The cognitive module of intuitive actions takes into account the human factor and can adjust forecasting and recommendations.

The navigational data processing module provides current and accurate data for the forecasting and decision-making modules.

The forecasting and decision-making module integrates information from all modules for comprehensive analysis and navigator support.

Let us consider each module of the NQM model in detail.

2. Description of NQM Input Data and Navigation Parameters (Figure 2).

2.1. Data Collection.

Navigational parameters: (Ship speed $S(t)$; Ship course $\theta(t)$; Ship position $(x(t), y(t))$; Proximity to other ships $P(t)$; Technical condition of the ship $T_s(t)$; Weather conditions $W(t)$; Time

of day $C(t)$; Under-keel clearance $H(t)$; Current $V_{\text{current}}(t)$; Wind $V_{\text{wind}}(t)$; Visibility $Vis(t)$; Traffic intensity $D(t)$; Hazardous zones $Z_{\text{danger}}(x,y)$; Ship draft D_{draft} ; Ship maneuvering characteristics $M(t)$.

Data from ECDIS and AIS Systems (Detailed electronic navigation charts; Data about other ships: position, course, speed, type) [28].

Data from LMS Moodle (Test results R_{test} ; Navigator's activity $ALMS$; Learning history H_{learning}).

Data from Simulators and VR Systems (Navigator's reactions in various scenarios $R_{\text{sim}}(t)$; Reaction time $T_{\text{reaction}}(t)$; Maneuvering accuracy $Acc_{\text{maneuver}}(t)$).

2.2. Data Preprocessing and Integration into the Model.

A description of how collected data from various sources are preprocessed and integrated into the navigator's qualification model for real navigational situations.

2.2.1. Data Synchronization and Aggregation.

Time Synchronization: Since data arrive from different sources with various timestamps and update frequencies, it is necessary to synchronize them to a common time step Δt . A common time scale is established t_1, t_2, \dots, t_T , where T is the number of time intervals.

Interpolation and Discretization: Data with a higher frequency are aggregated to Δt by averaging. Data with a lower frequency are interpolated to obtain values at each t_k .

Data Aggregation: All parameters for each time moment t_k are combined into a single state vector $x(t_k)$.

2.2.2. Normalization and Scaling of Parameters.

To ensure the correctness and stability of the model operation, all parameters are normalized to the range $[0,1]$ or standardized (Z -score normalization).

$$\text{Min-Max Normalization: } x_{\text{norm}} = \frac{x - x_{\text{min}}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}}, \text{ Z-Score Normalization: } x_{\text{std}} = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x},$$

where μ_x is the mean value of parameter xxx, and x, σ_x is the standard deviation.

Application of Normalization: Navigational parameters $S(t), \theta(t), P(t), T_s(t), W(t), H(t), V_{\text{current}}(t), V_{\text{wind}}(t), Vis(t), D(t)$ are normalized using the appropriate methods.

2.2.3. Data Processing and Filtering.

Noise Filtering: Low-pass filters or the Kalman filter are applied to smooth data and remove noise.

Outlier Detection and Processing: Statistical methods are used to detect abnormal values (e.g., quartile method). Outliers can be replaced with the median value or removed from the dataset.

2.2.4. Extraction of Relevant Features.

Based on the normalized and cleaned data, features are formed to be used in the model.

Navigational Features: Ship speed $S_{\text{norm}}(t)$; Ship course: $\theta_{\text{norm}}(t)$; Deviation from planned course: $\Delta\theta_{\text{norm}}(t) = \theta_{\text{norm}}(t) - \theta_{\text{planned, norm}}(t)$; Proximity to other ships: $P_{\text{norm}}(t)$; Under-keel clearance: $H_{\text{norm}}(t)$; Visibility: $Vis_{\text{norm}}(t)$.

Environmental Features – Weather conditions: parameters $W_{\text{norm}}(t)$ are split into separate features (wind, waves, etc.). Current and wind $V_{\text{current, norm}}(t), V_{\text{wind, norm}}(t)$.

Technical Features: Technical condition of the ship: $T_{s, \text{norm}}(t)$; Maneuvering characteristics: parameters $M_{\text{norm}}(t)$ may include turning radius, stopping distance, etc.

Qualification Features: test results: aggregated into a single indicator or vector $R_{\text{test, norm}}$; Activity in LMS Moodle: $ALMS_{\text{norm}}$; Data from simulators and VR systems: $R_{\text{sim, norm}}(t), T_{\text{reaction, norm}}(t), Acc_{\text{maneuver, norm}}(t)$.

2.2.5. Formation of the System State Vector.

All extracted features are combined into a single state vector for each moment in time t : $x(t) = [S_{\text{norm}}(t), \theta_{\text{norm}}(t), P_{\text{norm}}(t), H_{\text{norm}}(t), Vis_{\text{norm}}(t), V_{\text{current, norm}}(t), V_{\text{wind, norm}}(t), T_{s, \text{norm}}(t), R_{\text{sim, norm}}(t), T_{\text{reaction, norm}}(t), Acc_{\text{maneuver, norm}}(t), R_{\text{test, norm}}, ALMS_{\text{norm}}, \dots]$.

2.2.6. Mathematical Formalization of the Model

The navigator's qualification model in a real situation can be represented as a function: $k(t) = f(\mathbf{x}(t), \Theta^*)$,

where: $k(t) \in [0,1]$ - is the navigator's qualification assessment at time t .

$\mathbf{x}(t)$ - is the system state vector at time t .

Θ^* are the model parameters requiring adjustment (weight coefficients, activation function parameters, etc.).

Possible Forms of Function f :

Linear Regression: $k(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(t) + b$, where \mathbf{w} - is the weight coefficient vector, and b is the bias.

Nonlinear Model (Neural Network): $k(t) = \sigma(\mathbf{w}_2^T \phi(\mathbf{W}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{b}_1) + \mathbf{b}_2)$, where: $\mathbf{W}_1, \mathbf{w}_2$ - are the weight matrix and vector, respectively.

$\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2$ - are bias vectors.

$\phi(\cdot)$ - is the activation function of the hidden layer (e.g., ReLU).

$\sigma(\cdot)$ - is the sigmoid function to limit the output in the range $[0,1]$.

Fuzzy Logic Model: Fuzzy rules are used to model the relationships between features and qualification. Defuzzification of results is performed to obtain a numerical value $k(t)$.

2.2.7. Determination of Model Parameters.

Model Training: Historical data with known qualification assessments $k_{true}(t)$ are used to adjust parameters Θ^* .

$$\text{Minimization of Loss Function: } L = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (k(t) - k_{true}(t))^2$$

Parameter Optimization: Performed using gradient descent methods or its variations.

Regularization: To prevent overfitting, regularization methods are used (L_1, L_2 regularization, Dropout in the case of neural networks).

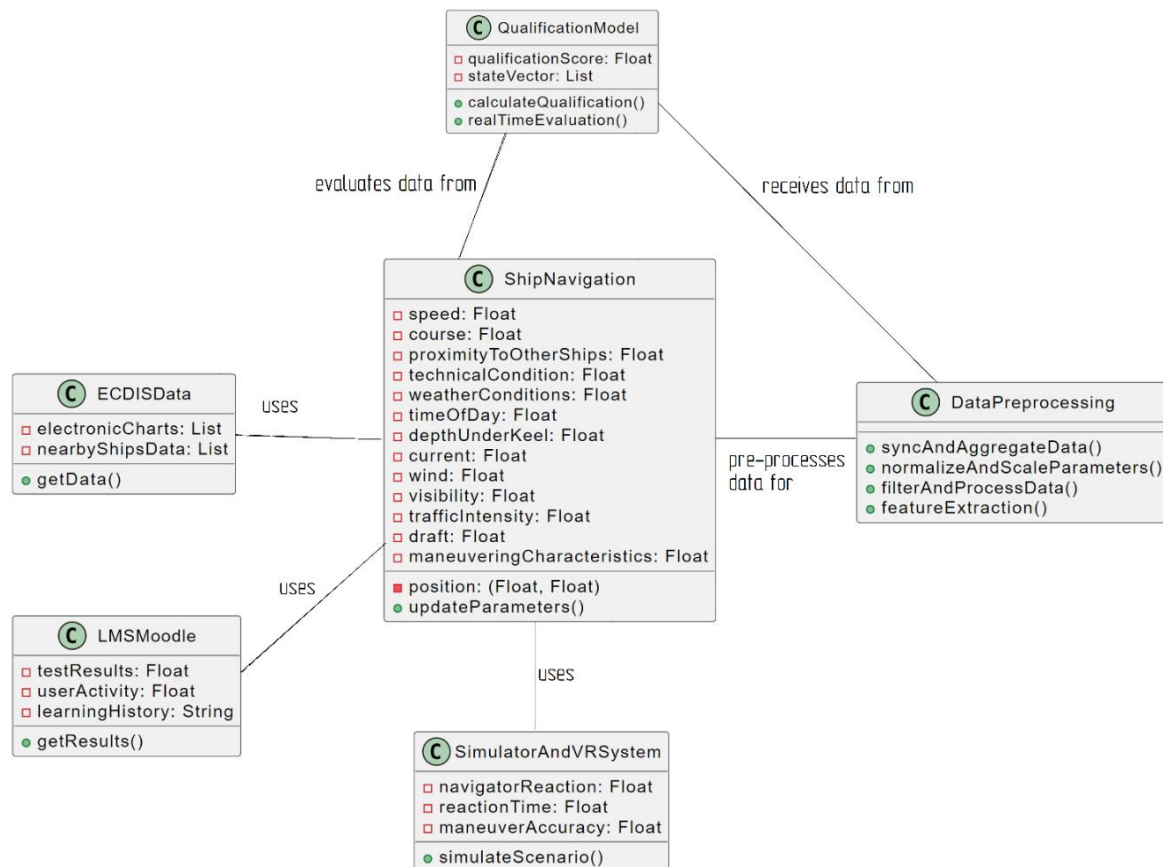


Figure 2 – Data Collection Module for the Navigator's Qualification Model

2.2.8. Model Validation and Testing.

Data Partitioning: Data are divided into training, validation, and test sets. Evaluation of Model Quality Metrics. Mean Squared Error (MSE). Coefficient of Determination (R^2).

2.2.9. Real-Time Model Usage.

Real-Time Qualification Assessment: is calculated in real-time based on current parameter values $k(t)$, $x(t)$.

Integration with Navigation Automation System: If $k(t)$ falls below a certain threshold $k_{thresholdk}$, the system can activate additional control or support mechanisms.

Consideration of Psychophysiological State: The parameter $k(t)$ can be adjusted taking into account the navigator's psychophysiological $S(t)$, as described earlier.

3. Hazard Level Assessment Module (Figure 3).

3.1. Fuzzy Logic and Multicriteria Risk Assessment.

3.1.1. Membership Functions for Each Parameter.

For the parameter x_i , Gaussian, triangular membership functions, and others are used:

$$\text{Gaussian Function: } \mu_i(x_i) = e^{-\frac{(x_i - c_i)^2}{2\sigma_i^2}},$$

where c_i – is the mean value, σ_i – is the standard deviation.

Triangular membership functions and others can also be applied.

3.1.2. Fuzzy Rules (Knowledge Base Rules).

"If-then" type rules that take into account maritime transportation experience:

Rule 1: If $S(t)$ is high, and $P(t)$ is low, and $Vis(t)$ is poor, then the risk is critical.

Rule 2: If $H(t) - D_{draft}$ is small (under-keel clearance is low) and $V_{current}(t)$ is strong current, then the risk is high.

3.1.3. Aggregation and Defuzzification.

Aggregation: Performed using T -norm (minimum) or S -norm (maximum)

Defuzzification using the Center of Gravity Method

$$R = \frac{\int r \cdot \mu_R(r) dr}{\int \mu_R(r) dr}$$

3.2. Mathematical Risk Model Using Analytical Functions.

We describe the risk as a function:

$$R(t) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot f_i(x_i(t))}{\sum_{i=1}^n w_i}.$$

where: w_i – are weighting coefficients determined by experts.

$f_i(x_i(t))$ – are normalized risk functions for each parameter.

Example of a Risk Function for Under-Keel Clearance:

$$f_H(H(t)) = \begin{cases} 1, & H(t) - D_{draft} \leq H_{min} \\ \frac{H(t) - D_{draft} - H_{min}}{H_{safe} - H_{min}}, & H_{min} < H(t) - D_{draft} < H_{safe} \\ 0, & H(t) - D_{draft} \geq H_{safe} \end{cases}$$

4. Module for Identifying the Navigator's Qualification Parameters

4.1. Algorithm for Identifying Qualification Parameters

4.1.1. Problem Statement

The goal of this module is to develop a mathematical model and algorithm for the automated identification of the navigator's qualification parameters based on the training program for specialization 271.01 "Navigation and Control of Marine Vessels." The model should consider all aspects of professional competence provided by the program and utilize various data sources to assess the navigator's level of preparation.

4.1.2. Data Collection and Preliminary Processing

Data Sources:

a) Learning Management System (LMS Moodle): Test Results: $R_{test} = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$, where: $r_j \in [0, 100]$ – is the percentage result of the j -th test. Navigator's Activity: $ALMS = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, where: a_i – are activity indicators in LMS (number of logins, time spent on the platform, completed tasks, etc.). Learning History: $H_{learning}$ – records of completed courses, obtained certificates, etc.

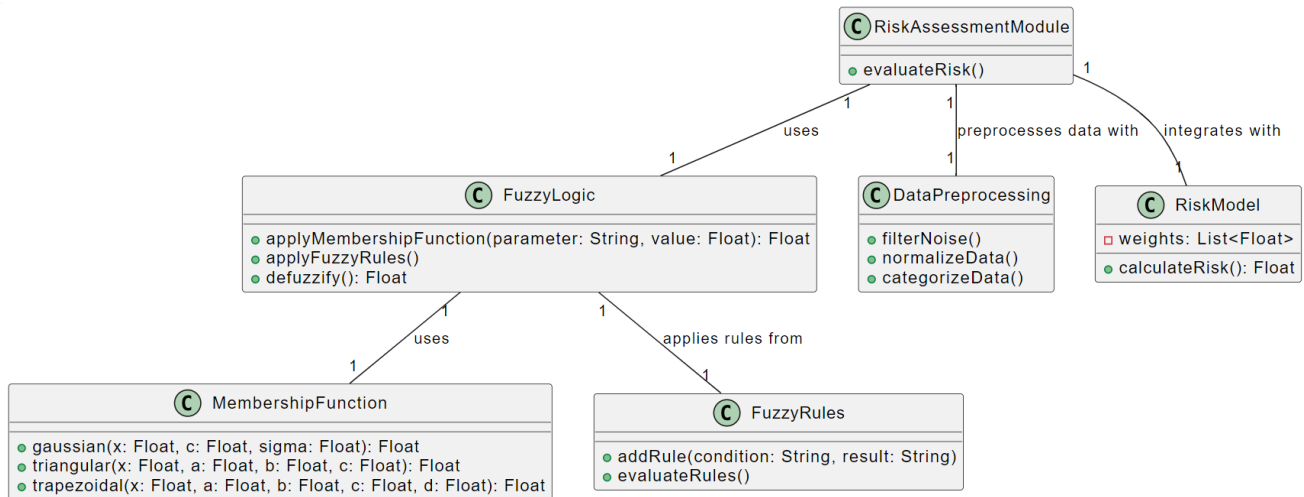


Figure 3 – Scheme of the Hazard Level Assessment Module

b) Тренажери та VR-системи: Navigator's Reactions in Simulated Situations: $R_{sim} = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$, where: s_k – is a set of indicators for the k -th simulated situation.

Reaction Time: $T_{reaction} = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$, where: t_k is the reaction time to the k -th situation.

Maneuvering: $Acc_{maneuver} = \{acc_1, acc_2, \dots, acc_k\}$, where: $acc_k \in [0, 1]$ – is the accuracy of executing the k -th maneuver.

c) Data from Real Navigational Operations: Actions During Watch: $D_{actions} = \{d_1, d_2, \dots, d_l\}$, where: d_l is a set of actions performed during the l -th watch.

Deviation from Planned Route: $\Delta_{route} = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_l\}$, where: δ_l is the deviation from the route during the l -th watch.

Decisions Made in Critical Situations: $D_{decisions} = \{dec_1, dec_2, \dots, dec_p\}$, where: dec_p is the quality assessment of the decision in the p -th critical situation.

Preliminary Data Processing. Normalization: Bringing data to a common scale $[0, 1]$ to ensure correctness in subsequent calculations.

Normalized indicator: $x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$, where: x is the original value; x_{min} , x_{max} – are the

minimum and maximum values of the indicator.

Filtering: Removal of noise and anomalous values using the Kalman filter or other methods.

Feature Extraction: Forming a feature vector X for each navigator: $X = [x_1, x_2, \dots, x_M]$ – is the total number of features obtained from all data sources.

4.1.3. Mathematical Model of Qualification Parameters

Definition of Qualification Parameters. Let there be a set of qualification parameters $K = \{k_1, k_2, \dots, k_M\}$, where: $k_i \in [0, 1]$ is the level of proficiency in the i -th competence. M is the number of competencies defined based on the training program.

Sets of Qualification Parameters: k_1 : Knowledge of International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREG); k_2 : Skills in maneuvering under complex conditions; k_3 : Ability to make decisions in critical situations; k_4 : Technical proficiency in using navigation equipment; k_5 : Level of fatigue and psychophysiological state.

Formation of Membership Functions.

For each qualification parameter k_i membership functions $\mu_{ki}(x)$, are defined, reflecting the navigator's degree of proficiency in the corresponding competence.

Building a Fuzzy Rule Base. Нечіткі правила мають вигляд Fuzzy rules have the form: If x_1 belongs to A_1 and x_2 belongs to A_2 then k_i belongs to K_i , where: x_1, x_2 are features from vector X ; A_1, A_2 are linguistic terms (e.g., "high," "medium," "low"); K_i is the linguistic assessment of competence k_i .

Mathematical Model of Identification. Aggregation of Rules: The Mamdani method is used for rule aggregation. The activation degree of each rule is calculated as the minimum of the membership degrees of the input features.

4.1.4. Data Processing and Qualification Parameter Assessment

Formation of Feature Vector X . The feature vector X consists of normalized values of indicators affecting the qualification parameters: $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]$, де: $x_n \in [0,1]$ is a normalized indicator.

Use of Neural Networks. To model complex nonlinear relationships between features and qualification parameters, a multilayer perceptron (MLP) neural network is used.

Network Architecture: Input Layer: N neurons (number of features).

Hidden Layers: One or more layers with nonlinear activation functions (ReLU, sigmoid, tanh).

Output Layer: M neurons (number of qualification parameters).

$$\text{Output of a Hidden Neuron: } h_j = f_{\text{hidden}} \left(\sum_{n=1}^N w_{nj} x_n + b_j \right),$$

where: h_j is the output of the j -th hidden neuron.

w_{nj} is the weight coefficient between the n -th input neuron and the j -th hidden neuron

b_j is the bias of the j -th hidden neuron

$f_{\text{hidden}}(\cdot)$ is the activation function of the hidden layer.

Output of the Output Neuron (Qualification Parameter):

$$k_i = f_{\text{output}} \left(\sum_{j=1}^H w_{ji} h_j + b_i \right),$$

where: H is the number of neurons in the hidden layer.

w_{ji} is the weight coefficient between the j -th hidden neuron and the i -th output neuron.

b_i is the bias of the i -th output neuron.

$f_{\text{output}}(\cdot)$ is the activation function of the output layer (e.g., sigmoid).

4.1.5. Neural Network Training

Loss Function. The Mean Squared Error (MSE) function is used:

$$L = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (k_i^{\text{pred}} - k_i^{\text{true}})^2,$$

where: k_i^{pred} is the predicted value of qualification parameter k_i ,

k_i^{true} is the actual (reference) value of qualification parameter k_i .

Optimization of Weight Coefficients. The backpropagation algorithm is used. Optimizers include SGD (Stochastic Gradient Descent), Adam, RMSProp.

Hyperparameters: Learning rate η , batch size, number of epochs.

Validation and Testing. Data are divided into training, validation, and test sets. Quality metrics are evaluated: MSE, MAE (Mean Absolute Error), coefficient of determination R^2 .

4.1.6. Identification and Correction of Qualification Gaps

Detection of Critical Parameters. A threshold value $k_i^{\text{threshold}}$ is set for each qualification parameter. If $k_i < k_i^{\text{threshold}}$, then competence k_i requires improvement.

Forming a Knowledge Recovery Plan. Determining educational materials and training to increase the level of k_i . Monitoring progress after training.

4.1.7. Impact of Qualification Parameters on Risk Level

Calculation of Integral Qualification Indicator:
$$Q = \frac{\sum_{i=1}^M v_i k_i}{\sum_{i=1}^M v_i},$$

where: v_i is the weighting coefficient of the importance of competence k_i .

$Q \in [0,1]$ is the integral qualification indicator of the navigator.

Risk Level Adjustment. The risk level R is adjusted considering the navigator's qualification:

$R_{adjusted} = R \cdot (1 + \alpha(1 - Q)),$

where: R is the base risk level determined based on navigational parameters.

$\alpha \geq 0$ is the coefficient of the qualification's impact on risk.

4.1.8. Considering Psychophysiological State

Psychophysiological State Model.

Psychophysiological state coefficient $S \in [0,1]$: $S = e^{-\beta F},$

where: $F \geq 0$ is the level of fatigue or stress,

$\beta \geq 0$ is the coefficient of fatigue's impact on the state.

Adjustment of Qualification Parameter. Effective qualification parameter: $k_i^{eff} = k_i \cdot S$

Impact on Risk Level. Final risk level: $R_{final} = R_{adjusted} \cdot (1 + \gamma(1 - S)),$

where: $\gamma \geq 0$ is the coefficient of the psychophysiological state's impact on risk.

4.1.9. Dynamics of Qualification Parameter Changes

Learning and Forgetting Model: $\frac{dk_i}{dt} = \mu_i U_i(t) - \lambda_i k_i(t),$

where: $\frac{dk_i}{dt}$ is the rate of change of qualification parameter k_i , $\mu_i \geq 0$ is the learning coefficient.

$U_i(t) \geq 0$ is the intensity of learning at time t , $\lambda_i \geq 0$ is the forgetting coefficient.

With constant $U_i(t) = U_i$: $k_i(t) = \left(k_i(0) - \frac{\mu_i U_i}{\lambda_i} \right) e^{-\lambda_i t} + \frac{\mu_i U_i}{\lambda_i}.$

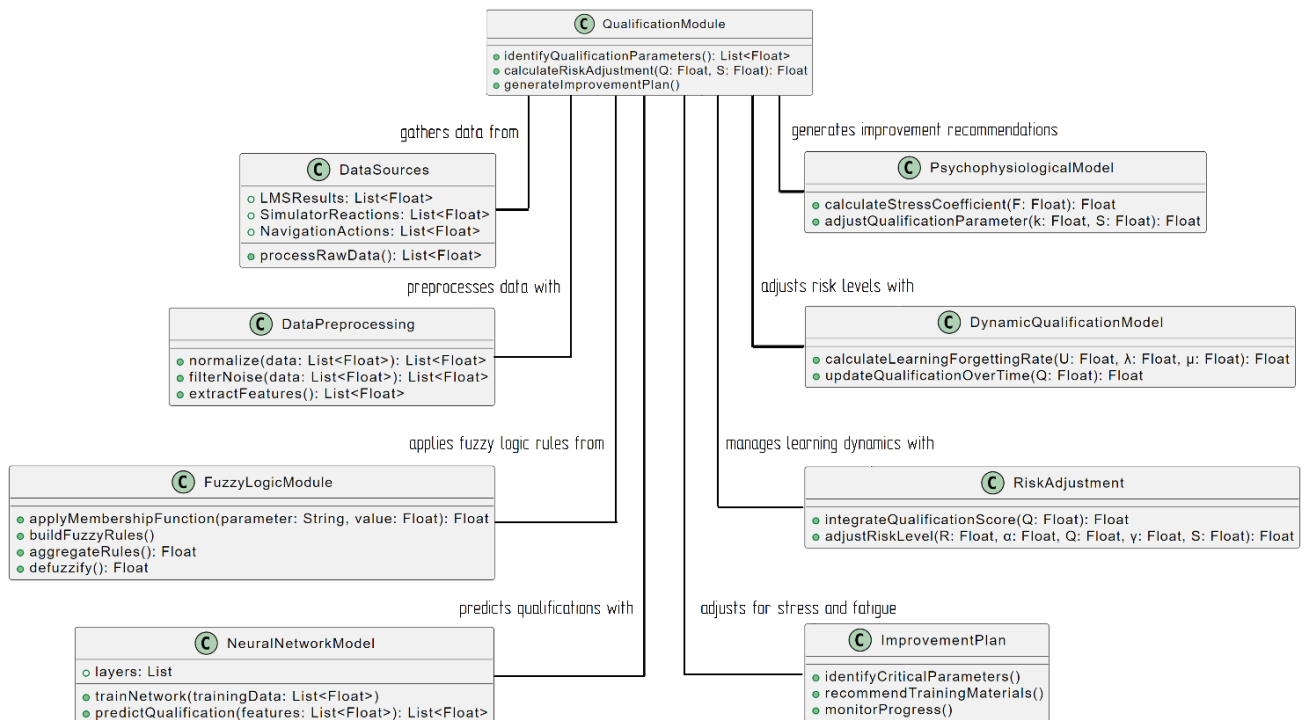


Figure 4 – Scheme of the Module for Identifying the Navigator's Qualification Parameters

Thus, the extended mathematical model for identifying navigator qualification parameters integrates elements of fuzzy logic and neural networks. It considers multiple data sources—

including test results, training, and real navigational actions—and models nonlinear relationships between indicators and competencies using neural networks. Fuzzy inference rules address uncertainty and subjectivity in assessments. The model accounts for the dynamics of qualification changes over time, considering learning and forgetting processes, and includes the impact of the navigator's psychophysiological state on effective qualification and risk levels. Additionally, it allows for adjusting the risk level based on the integral qualification indicator and the navigator's current state.

5. Module for Identifying Intuitive Actions of Operator-Navigators in Critical Situations

In critical navigational situations, operator-navigators may rely on intuitive actions that, while sometimes beneficial, can lead to errors and increased navigational risk. To effectively manage these risks, it is necessary to develop a model that identifies and analyzes navigators' intuitive actions by generalizing various criteria and combining them into more general categories [29].

5.1. Module Objective

Develop a generalized model for identifying intuitive actions of operator-navigators in critical situations.

Generalize and combine criteria of intuitive actions into general categories to simplify analysis.

Enable real-time identification of intuitive actions to manage navigational risks.

5.2. Generalization of Criteria and Combination into Categories

Define 15 initial categories of intuitive actions and combine them into five main categories. Each category includes relevant criteria, manifestations, and factors.

1: *Perception and Assessment of the Situation.*

Description: Intuitive perception and assessment of the navigational situation without detailed analysis. Quick awareness of changes, sometimes without proper consideration of all factors.

Combined Initial Categories: Category 1: Perception and assessment of the situation. Category 11: Time reflection. Category 14: Influence of event experience.

Criteria: Making decisions too quickly without detailed analysis. Spontaneous determination of time frames for action execution. Subconscious use of past experience in current new decisions.

Factors: Za_{int} – intuitive perception of the situation; $Time_{int}$ – intuitive time reflection; $Echo_{int}$ – intuitive "echo" of events.

2: *Decision-Making and Action Selection.*

Description: Intuitive decision-making in critical situations. Choosing actions based on a "feeling" of correctness without objective justifications.

Combined Initial Categories: Category 2: Dynamics of intuition and action selection. Category 6: Decision-making in critical situations. Category 7: Search for rewards and effects. Category 8: Serendipity and intuition.

Criteria: Sudden feeling of the "correctness" of actions. Quick decisions without prolonged analysis. Intuitive determination of the safest actions. Sudden discovery of solutions without an obvious reason.

Factors: τ_{int} – intuitive choice; Ev_{int} – intuitive response to events; $Rewards_{int}$, $Effects_{int}$ – intuitive perception of rewards and consequences; $Idea_{int}$ – intuitive formation of ideas.

3: *Cognitive Processes and Information Processing.*

Description: Intuitive understanding of complex information and associative connections. Subconscious processing of navigational data and images.

Combined Initial Categories: Category 3: Cognitive processes. Category 12: Complex images and events. Category 5: Complex behavior model.

Criteria: Instant understanding of complex information. Intuitive perception of images and navigational schemes. Multitasking without conscious focus.

Factors: $Cog_{int}(P_a, P_b)$ – intuitive understanding of action sequences; $ImageSchemas_{int}$ – intuitive perception of images; $LAoT_{int}$ – intuitive actions with tools and equipment.

4: *Adaptation to Changes and Resource Management.*

Description: Intuitive adaptation to new conditions without detailed analysis. Intuitive management of resources and time.

Combined Initial Categories: Category 4: Adaptation to changes. Category 9: Search for resources and time synthesis. Category 13: Time cycles and rhythms.

Criteria: Quick adaptation without analysis. Efficient use of resources and time without planning. Intuitive synchronization of work with daily cycles.

Factors: $\Xi_{int} \setminus X_i$ – intuitive adaptation; *Resource-Search_{int}*, *Time-Synthesis_{int}* – intuitive management of resources and time; *Rhythms_{int}* – intuitive synchronization of rhythms.

5: *Influence of External Factors and Features of the Navigation Area.*

Description: Intuitive perception of global and local conditions affecting navigation. Subconscious consideration of navigation area features.

Combined Initial Categories: Category 10: World events. Category 15: Features of the navigation area.

Criteria: Intuitive adaptation to global navigational practices. Deep, unconscious perception of the locality.

Factors: *WorldEv_{int}* – intuitive perception of world events; *Ag_{int}* – intuitive sense of place.

Generalizing and combining criteria into five main categories allows for more effective analysis of operator-navigators' intuitive actions and simplifies the process of identifying such actions in real-time.

5.3. Application of the Generalized Model

Identification of Intuitive Actions: Using the generalized categories enables faster and more accurate detection of navigators' intuitive actions.

Risk Assessment: Each category is associated with certain risks, allowing for the assessment of the potential impact of intuitive actions on navigational safety.

Development of Management Strategies: Understanding the general categories helps in developing effective strategies to minimize the negative consequences of intuitive actions.

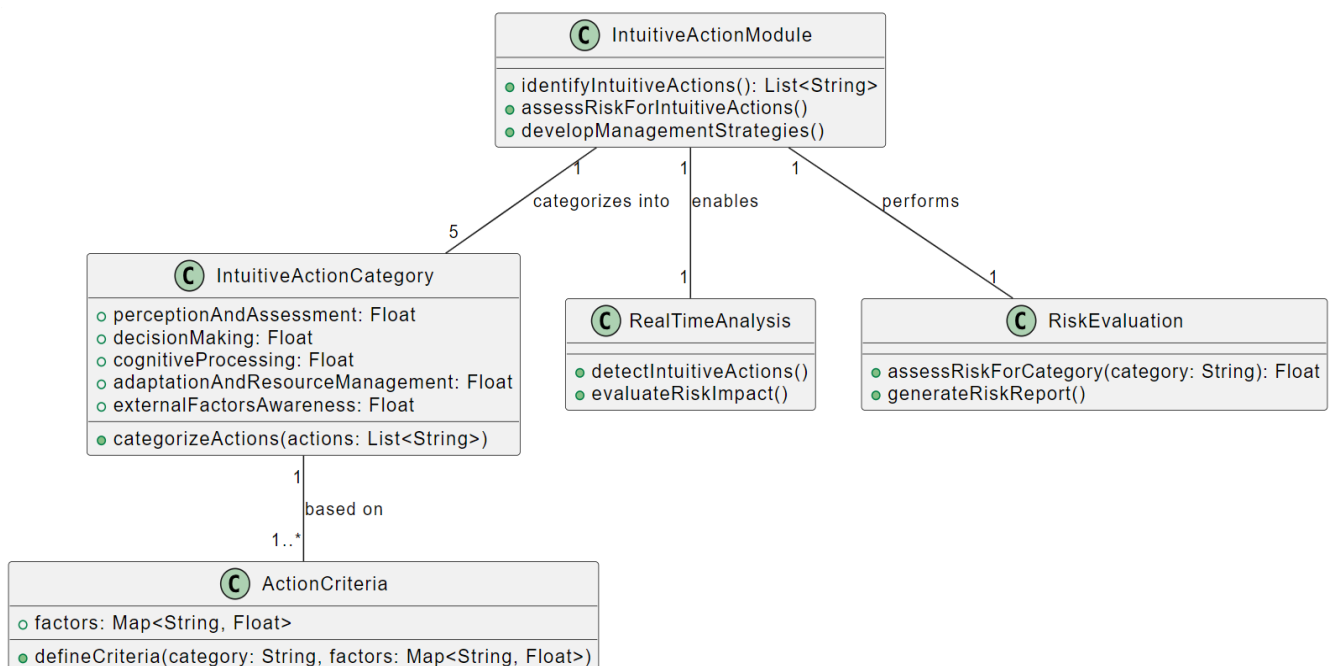


Figure 5 – Scheme of the Module for Identifying Intuitive Actions of Operator-Navigators

6. Module for Processing Navigational Data and Geolocations

The module for processing navigational data and geolocations enhances vessel safety and efficiency by integrating automated decision support systems that account for data uncertainty and incompleteness. Its objectives are to automate data collection from ECDIS, analyze and compare

textual data and geolocations, visualize geographic data on interactive maps, and develop a navigator decision support system based on the processed data.

6.1. The module comprises four main components:

6.1.1. Automated image processing and text recognition (OCR) captures real-time ECDIS screenshots, preprocesses images, recognizes text using technologies like the Tesseract library, and saves data for analysis without operator intervention.

6.1.2. Analysis and comparison of textual data and geolocations involves loading and structuring data, comparing textual information between screenshots, calculating data similarity using algorithms, and analyzing geolocations by computing distances with the Haversine formula.

6.1.3. Visualization of geographic data creates interactive maps displaying the vessel's route, adds markers for specific locations and hazard zones, visualizes deviations from the planned route, and updates maps automatically using tools like the Folium library.

6.1.4. Decision support for the navigator compares current navigational data with reference templates, identifies risks, provides recommendations based on an expert action dictionary, and integrates with other modules for comprehensive analysis, utilizing machine learning algorithms to enhance recommendation accuracy.

6.2. Integration of these components ensures data integrity and consistency, speeds up data processing and analysis, and improves decision-making through a comprehensive approach.

6.3. The module results in enhanced navigational safety by timely detecting risks and reducing human errors through automation, economic efficiency by optimizing routes to reduce sailing time and costs, and improved situational awareness via interactive visualization and relevant recommendations. Implementing this module is crucial for automating data collection and analysis, integrating modern technologies into decision-making, and adapting to different conditions and navigator requirements.

Its implementation contributes to enhancing the safety and efficiency of navigation by providing: Automation of navigational data collection and analysis. Integration of modern technologies to improve the decision-making process. Ability to adapt the system to different conditions and navigator requirements.

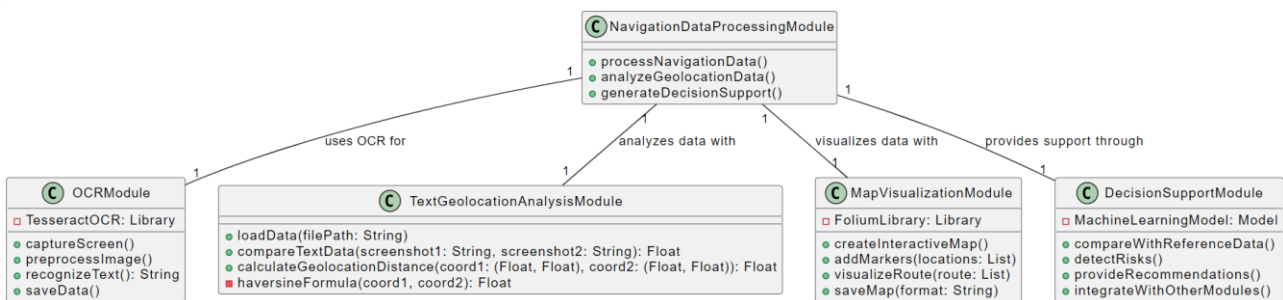


Figure 6 – Scheme of the Module for Processing Navigational Data and Geolocations

7. Module for Predicting Ship Trajectories and Risk Assessment.

Building upon the decision support system (DSS) developed earlier, integrating a ship trajectory prediction and risk assessment module is essential for enhancing maritime safety. This module anticipates potential navigational scenarios and identifies threats in a timely manner, providing navigators with relevant recommendations for optimal decision-making.

7.1. It closely connects with other DSS components by using data from navigational processing modules as input for prediction models, and visualizations from Module 6 to display predicted trajectories and risk zones.

7.2. Machine learning algorithms, such as multilayer neural networks, predict future ship positions by adapting to specific sailing conditions and ship characteristics. The module analyzes these predicted trajectories to assess risks of collisions or proximity to hazardous zones, considering uncertainties and human factors, and classifies risks to prioritize actions. It integrates with the DSS by providing prediction results and recommendations, which are visualized on interactive maps.

7.3. This enhances maritime safety by timely identifying potential hazards, improves decision-making efficiency with accurate recommendations, reduces navigator workload by automating complex analyses, and optimizes routes by considering predicted conditions and risks. Integrating this module ensures a comprehensive approach to navigational analysis, seamless data exchange, and adaptability to various sailing conditions. Combined with previous modules, it contributes to creating an effective DSS that enhances maritime safety and efficiency by reducing risks and optimizing navigation processes.

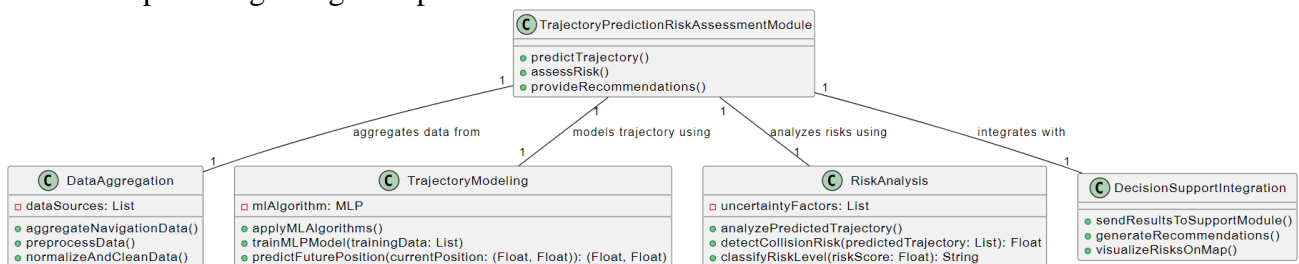


Figure 7 – Scheme of the Module for Predicting Ship Trajectories and Their Risks

Developing the module for predicting ship trajectories and risk assessment, in conjunction with the previous six modules, allows for the creation of a comprehensive and effective decision support system for the navigator. This contributes to enhancing the safety and efficiency of maritime navigation by reducing risks and optimizing the navigation process.

Conclusion. A comprehensive navigator qualification model for automated ship control was developed, incorporating technical, cognitive, and behavioral aspects to enhance real-time decision-making and ensure safe navigation in dynamic environments. Key research tasks accomplished include analyzing modern qualification assessment methods – such as fuzzy logic, neural networks, and artificial intelligence – to integrate technical and behavioral aspects effectively.

The Navigator Qualification Model (NQM) was structured with modules for input data and navigation parameters, hazard level assessment using fuzzy logic, navigator qualification identification using neural networks, cognitive analysis of intuitive actions, navigational data and geolocation processing, and ship trajectory forecasting and decision-making. These modules collectively provide a systematic assessment of the navigator's professional competencies.

The model adapts to external factors and changing navigation conditions by using a mathematical risk model that considers variables like speed, under-keel clearance, and weather conditions. It identifies critical competencies for safe navigation and incorporates the human factor in risk assessments through the analysis of intuitive actions.

Potential applications of the model include enhancing maritime safety by timely detecting risks and providing minimization recommendations, personalizing navigator training by identifying competency gaps, seamless integration with existing navigation systems without significant infrastructure changes, and adaptability to varying conditions and individual navigator characteristics.

Future research prospects involve expanding the training database to improve model accuracy and reliability, implementing additional artificial intelligence elements for more precise predictions and adaptability, and investigating the impact of the navigator's psychophysiological state – such as stress and fatigue – on decision-making to further refine the model.

In summary, the research objective was achieved by creating a comprehensive qualification model that combines fuzzy logic, neural networks, and artificial intelligence. This model systematically assesses navigators' professional qualifications, crucial for safe and efficient navigation. Implementing this model in maritime practice will enhance safety levels and optimize ship management processes.

REFERENCES

1. Pham, Duc-Anh & Han, Seung-Hun (2023). Designing a Ship Autopilot System for Operation in a Disturbed Environment Using the Adaptive Neural Fuzzy Inference System. *Journal of Marine Science and Engineering*. 11. 1262. 10.3390/jmse11071262.
2. Liu, Wenwen & Liu, Yuanchang & Gunawan, Bryan & Bucknall, Richard (2020). Practical Moving Target Detection in Maritime Environments Using Fuzzy Multi-sensor Data Fusion. *International Journal of Fuzzy Systems*. 23. 10.1007/s40815-020-00963-1.
3. Du, Zhixiu (2024). A Risk Assessment Model for Navigation Safety of Maritime Aquaculture Platform Based on AIS Ship Trajectory. *Journal of Electrical Systems*. 20. 116–123. 10.52783/jes.2364.
4. Devikala, S. (2024). Development of Fuzzy Logic Controller in Automatic Vehicle Navigation using IoT. *Journal of Electrical Systems*. 20. 114–121. 10.52783/jes.1254.
5. Gül, Muhammet & Ak, Muhammet Fatih (2022). Occupational Risk Assessment for Flight Schools: A 3,4-Quasirung Fuzzy Multi-Criteria Decision Making-Based Approach. *Sustainability*. 14. 9373. 10.3390/su14159373.
6. Wang, Shaobo & Zou, Yiyang & Wang, Xiaohui (2024). An Intelligent Decision-Making Approach for Multi-Ship Traffic Conflict Mitigation from the Perspective of Maritime Surveillance. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 1719. 10.3390/jmse12101719.
7. Aylward, Katie & Weber, Reto & Lundh, Monica & MacKinnon, Scott & Dahlman, Joakim (2022). Navigators' views of a collision avoidance decision support system for maritime navigation. *Journal of Navigation*. 75. 1–14. 10.1017/S0373463322000510.
8. Wang, Yuqing & Chen, Xinqiang & Wu, Yuzhen & Zhao, Jiansen & Postolache, Octavian & Liu, Shuhao (2024). Visual Navigation Systems for Maritime Smart Ships: A Survey. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 1781. 10.3390/jmse12101781.
9. Li, Wei & Chen, Weijiong & Guo, Yunlong & Hu, Shenping & Xi, Yongtao & Wu, Jianjun (2024). Risk Performance Analysis on Navigation of MASS via a Hybrid Framework of STPA and HMM: Evidence from the Human–Machine Co-Driving Mode. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 1129. 10.3390/jmse12071129.
10. Houweling, Koen & Mallam, Steven & van de Merwe, Koen & Nordby, Kjetil (2023). An Approach for Measuring The Effects of Augmented Reality on Human Performance in Maritime Navigation. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. 67. 10.1177/21695067231193647.
11. Mohamed, Eslam & Hosny, Moustafa (2024). Enhancing Safety of Navigation with ECDIS Standardization and S-Mode Adoption. *Maritime Research and Technology*. 3. 117. 10.21622/MRT.2024.03.2.932.
12. Lee, Changui & Seojeong, Lee (2024). A Risk Identification Method for Ensuring AI-Integrated System Safety for Remotely Controlled Ships with Onboard Seafarers. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 1778. 10.3390/jmse12101778.
13. Lei, Jinyu & Sun, Yuan & Wu, Yong & Zheng, Fujin & He, Wei & Liu, Xinglong (2024). Association of AIS and Radar Data in Intelligent Navigation in Inland Waterways Based on Trajectory Characteristics. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 890. 10.3390/jmse12060890.
14. Car, Maro & Vujicic, Srdjan & Žuškin, Srđan & Brčić, David (2019). Human Machine Interface: Interaction of OOWs with the ECDIS system. *Conference: 1st International Conference of Maritime Science & Technology – Naše More 2019*.
15. Medic, Dario & Bošnjak, Rino & Bukljaš, Mihaela & Vukša, Srđan (2021). Research Study and the Model for Improving the Safety of Navigation when Using the AIS. *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 15. 577. 10.12716/1001.15.03.10.
16. Liu, Tian & MA, Jianwen (2022). Ship Navigation Behavior Prediction based on AIS Data. *IEEE Access*. 10. 1–1. 10.1109/ACCESS.2022.3172308.

17. Jiang, Zhiqiang & Zhang, Lingyu & Li, Weijia (2024). A machine vision method for the evaluation of ship-to-ship collision risk. *Heliyon*. 10. e25105. 10.1016/j.heliyon.2024.e25105.
18. Vukić, Đurđica & Candrlic, Sanja & Pošćić, Patrizia (2020). COMPARATIVE OVERVIEW OF ADAPTIVE ASSESSMENT ACTIVITY IN OPEN SOURCE LMS: DATA MODEL PERSPECTIVE. 4944–4954. 10.21125/inted.2020.1356.
19. Moon, Kibum & Kim, Jinwon & Lee, Jinsook (2021). Early Prediction Model of Student Performance Based on Deep Neural Network Using Massive LMS Log Data. *The Journal of the Korea Contents Association*. 21. 1–10. 10.5392/JKCA.2021.21.10.001.
20. Putra, Bagas & Soeprijanto, & Daryanto (2024). Evaluation of the Utilization of the Learning Management System (LMS) Using the CIPP Model. *Global Synthesis in Education Journal*. 1. 19-27. 10.61667/dp8q3757.
21. Elov, Botir & Rasulovna, Jamoldinova & Mastura, Primova & Khusainova, Zilola & Raxmatilloevich, Aloyev & O'g'li, Xudayberganov (2024). The Stages of Creation of LMS Model.
22. Liu, Dongqin & Zheng, Zhongyi & Liu, Zihao (2024). Research on Dynamic Quaternion Ship Domain Model in Open Water Based on AIS Data and Navigator State. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 516. 10.3390/jmse12030516.
23. Okechukwu, Ogochukwu & Amaechi, Eziechina & George, Onyemachi & Isaac, Onuwa (2024). Enhanced Text Recognition in Images Using Tesseract OCR within the Laravel Framework. *Asian Journal of Research in Computer Science*. 17. 58–69. 10.9734/ajrcos/2024/v17i9499.
24. Manjunath, Akanksh & Nayak, Manjunath & Nishith, Santhanam & Pandit, Satish & Sunkad, Shreyas & Deenadhayalan, Pratiba & Gangadhara, Shobha (2023). Automated invoice data extraction using image processing. *IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI)*. 12. 514. 10.11591/ijai.v12.i2.pp514–521.
25. Sumana, K. R. (2024). Optimized OCR Data Extraction Using Custom-Trained NLP-NER Models for Enhanced Image Analysis. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 11. 159–162.
26. Ujkani, Arbresh & Hohnrath, Pascal & Grundmann, Robert & Burmeister, Hans-Christoph (2024). Enhancing Maritime Navigation with Mixed Reality: Assessing Remote Pilotage Concepts and Technologies by In Situ Testing. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 1084. 10.3390/jmse12071084.
27. Martes, Liliana (2020). Best Practices in Competency-based Education in Maritime and Inland Navigation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 14. 557–562. 10.12716/1001.14.03.06.
28. Victoria Ponomaryova, Pavlo Nosov (2023). Method of automated identification of qualification parameters for marine operators under risk conditions // *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii (Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii): naukovyi zhurnal*. – Kherson: Khersonska derzhavna morska akademiia, № 26–27 (2023). S. 144–165.
29. Ponomaryova, V., Nosov, P., Ben, A., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Dudchenko, S., Appazov, E., & Sokol, I. (2024). Devising an approach for the automated restoration of shipmaster's navigational qualification parameters under risk conditions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(3 (127), 6–26. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.296955>.
30. Victoria Ponomaryova (2024). Method of decision support for navigators in automated vessel traffic safety control based on ecdis data // *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii (Avtomatyzatsiia ta kompiuterno-intehrovani tekhnolohii): naukovyi zhurnal*. Kherson: Khersonska derzhavna morska akademiia, № 1 (28), 2024. S. 22–40.

Пономарьова В., Носов П. РОЗРОБКА КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СУДНОВОДІЯ ДЛЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ СУДНОМ

Дослідження спрямоване на розробку комплексної кваліфікаційної моделі штурманів в автоматизованому управлінні судном, яка оцінює технічну, когнітивну та поведінкову компетентність для підвищення ефективності прийняття рішень у реальному часі в умовах змінного навігаційного середовища.

Головним викликом є інтеграція передових технологій, таких як штучний інтелект та нечітка логіка, для точного моніторингу ризиків, що виникають через людський фактор.

Методологія включає створення моделі, яка оцінює компетенції штурмана шляхом інтеграції різних аспектів. Дані з ECDIS та інших сенсорів обробляються у вектор ознак. Алгоритм Мамдані агрегує нечіткі правила, що визначають кваліфікаційні параметри, а нейронні мережі моделюють складні взаємозв'язки. Модель використовує нечіткі функції належності для оцінки ризиків з урахуванням швидкості, глибини під кілем, погодних умов та ймовірності зіткнення.

Результати показують, що модель вчасно виявляє потенційні ризики та автоматизує процес прийняття рішень, зменшуючи навантаження на штурмана в складних умовах. Вона ефективно прогнозує траєкторію судна, ідентифікує ризикові зони та надає рекомендації щодо безпеки.

Практично це підвищує безпеку мореплавства через персоналізовану оцінку штурмана. Інтеграція з існуючими системами, такими як ECDIS, пропонує гнучкість без значних змін інфраструктури. Система індивідуалізує рекомендації, знижуючи ризик аварій та покращуючи ефективність підготовки. Майбутні дослідження включають розширення бази даних для підготовки, удосконалення алгоритмів та вивчення впливу психофізіологічного стану штурмана на ефективність управління судном.

Ключові слова: кермове управління; оптимізація процесів керування; модуль автоматичного керування; аварійні ситуації; транспортні потоки; інформаційна підтримка; Safety Depth; ECDIS; маневрування у стиснених водах; система розпізнавання.

© Ponomaryova V., Nosov P.

Статтю прийнято до редакції 03.11.2024

INFLUENCE OF HULL AND CARGO CONTOURS ON LATERAL FORCE AND YAW TORQUE IN REAL-TIME VESSEL CONTROL SYSTEMS

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

Kalinichenko Ye., Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Navigation and Control of the Ship, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine, e-mail: kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2898-7313;

Kozachok Yu., Graduate student, Software development Company N-IX LTD, Ukraine, e-mail: kozak9995@gmail.com, ORCID: 0009-0005-6430-3961;

Mateichuk V., Ph.D., Associate Professor of the Ship Handling Department, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: mateichykv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9328-0651.

The purpose of the research is to increase the accuracy of control calculations, the efficiency of the control system and the safety of navigation in general, by using a mathematical model in the control system to determine the parameters of external influences in real time. The mathematical model of the vessel is an important element of the mathematical support of the control system, the use of which allows to significantly improve the quality of the control system. Mathematical models are used to predict the movement of the control object, monitor the parameters of the state vector of the control object that are inaccessible to direct measurement, including in noise, determine the failures of command and executive devices, solve optimization problems, etc. In the work, integral functions for determining the resulting lateral force, the resulting yaw torque and the arm of the resulting lateral force, depending on the angle of attack of the flow and the shape of the hull contours, are obtained. The values of integral functions for simple hull contours are calculated. Compared with known approaches to determining the hydrodynamic and aerodynamic interaction of the ship's hull with the environment, the obtained results allow: in comparison with simple models, to estimate external forces and yaw torque much more accurately; in comparison with complex models, to carry out their estimation in real-time control systems. The obtained results are explained by finding and using integral functions for determining the resultant lateral force, resultant yaw torque and resultant lateral force arm, which for simple hull shapes are reduced to analytical solutions. The results are reproducible and can be used in the mathematical support of automated/automatic control systems in real time.

Key words: intelligent transport control systems; navigational safety; mathematical model; on-board computer; lateral force arm; energy efficiency.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.024-034

Introduction. The quality of the automated / automatic vessel movement control system as a whole is determined by the quality of the mathematical support of the on-board computer, the quality of the input information coming from the measuring instruments and the quality of processing command signals from the on-board computer by the executive devices.

Automated control systems used on all transport vessels and specialized vessels with a dynamic positioning system have distributed computing power located in specialized units: Automatic Radar Plotting Aid (ARPA) – for processing radar information, Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) – for processing cartographic information, AUTOPILOT – for automatic course / trajectory maintenance, power plant automation – for automatic control of propeller speed or propeller blade pitch. In dynamic positioning systems, additional computing power is used to maintain a given position or move along a given trajectory and the related tasks of evaluating external influences, splitting controls into redundant structures, etc. By the term "on-board computer" used in the article, the authors mean the computing power of such specialized units.

An important element of the mathematical support of the on-board computer is the mathematical model of the vessel, the use of which allows you to significantly improve the quality of the control system. Mathematical models are used to predict the movement of a controlled object, monitor the parameters of the system state vector that are inaccessible to direct measurement [1–3],

using a neural network model of a ship for control tasks [4, 5], optimal control [6, 7], solving multi-objective divergence problems [8], etc. Automation of control processes allows to maximally eliminate the human factor, which is the cause of a large number of accidents and disasters and significantly reduce the human influence on the processes of controlling moving objects. The use of mathematical models of objects and processes in the on-board computer allows to significantly increase the operational efficiency of automated / automatic control systems. Therefore, the development of such models is an urgent scientific and technical task.

Problem statement. Find the resulting lateral hydrodynamic (aerodynamic) force, the arm of the resulting lateral hydrodynamic (aerodynamic) force, and the resulting yaw torque depending on the shape of the hull and cargo contours $f(x, y) = 0$ and the angle of attack of the flow.

Analysis of recent research and publications. Many works of the authors are devoted to the issue of using mathematical models in the control system and studying the influence of the shape of the body on the hydrodynamic and aerodynamic characteristics.

The aim of the research [9] is to study the applicability of the SQCM (Source Quasi-Continuous Vortex Method) to predict the hydrodynamic forces acting on the Wigley hull. Two types of free vortex models are considered. The predicted results are compared with the results of model tests to verify the effectiveness of the free vortex model.

Taking into account hydrodynamic forces and torques is of great importance in describing any maneuvers of a vessel, such as braking, acceleration, circulation, Kempf zigzag, dynamic positioning, and others. In [10], based on known experimental data, using multifactor quasilinear (linear in coefficients) regression analysis, expressions for the constants of hydrodynamic polynomial models of hydrodynamic forces and torques on the vessel hull were obtained. Various dimensionless ratios of the geometric parameters of the vessel, such as length, width, draft, and fullness coefficient, were taken as factors (regressors). When selecting regression models, the values of the normalized R-square and standard errors were estimated.

In [11], the reference hull model KCS (KRISO Container Ship, KRISO – Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering) is used to analyze the maneuverability characteristics in shallow water. The PMM (Planar Motion Mechanism) test, based on the RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes) equations, was carried out to obtain the maneuverability coefficient for different drift angles, using the overload method. The computational hydrodynamics results are compared with experimental data from the literature and show good agreement.

In the article [12], the problem of static positioning of a vessel with non-rectilinear hull contours on a wave is considered. The dependences of bending torques and shearing forces on the frequency and amplitude of the oncoming wave are obtained. The influence of the non-rectilinearity of the hull contours on the values of bending torques and shearing forces is analyzed.

Designing and optimizing the shape of a ship's hull to minimize drag and meet other design requirements is a well-known problem in ship theory and design. The hull shape design and optimization method proposed in [13] uses CFD (Computational Fluid Dynamics) analysis to estimate drag under systematic transformations of the hull surface. Each individual transformation corresponds to a new hull shape variant with a transformed surface area. All variants prepared on the basis of the initial hull shape belong to the first step of the optimization process. They are used in CFD calculations to estimate resistance changes in calm water. As a result, an optimal shape along the frames can be obtained, which expresses the optimal longitudinal distribution of the constant hull volume and corresponds to the optimized hull surface shape. This method was applied to the bows of two ships, including the well-known KCS hull shape. The obtained optimization results in calm water conditions were additionally evaluated in waves.

In the article [14], a reasonable choice of the dimensions of a fishing vessel with a large block coefficient is considered. To solve the problem, a mathematical instrument was developed, which included design equations, including equations of buoyancy, mass, capacity, waterplane area coefficient, stability, power, relative elongation, prismatic coefficient, as well as boundary conditions and calculation of economic indicators. The key indicator of the economic profitability of the project was determined to be the efficiency of capital investments. To find the most efficient

vessel, a variational calculation was performed – solving a system of equations with a variation of some initial data. According to the results of the variational calculation, the most successful combination of the main characteristics of the vessel was determined, which provide the best economic indicators.

In the article [15], the assessment of maneuverability of high-speed vessels at the early stages of their design was studied. Previously, experimental, analytical and empirical methods were used for this. Nowadays, numerical methods are also used, given their accuracy and short calculation time. The paper presents a hybrid numerical-theoretical method for calculating hydrodynamic coefficients using CFD modeling based on RANS equations. Linear and nonlinear hydrodynamic coefficients of the vessel hull were calculated using the combined method. The simulation results were compared with those calculated by the semi-empirical Levandowski method. The comparison results show that the proposed hybrid model can predict the maneuverability of a marine vehicle at the preliminary design stage.

The textbook [16] contains formulas for determining the lateral aerodynamic force $R_{ay} = C_{ay} \frac{\rho_a}{2} S_{ay} \Delta W_a^2$, where C_{ay} is the coefficient of lateral aerodynamic force, ρ_a is the air density, S_{ay} is the area of the above-water part of the vessel perpendicular to the incident flow,

ΔW_a is the relative velocity of the oncoming aerodynamic flow; $R_{gy} = C_{gy} \frac{\rho_g}{2} S_{gy} \Delta W_g^2$ is the lateral hydrodynamic force, where C_{gy} is the coefficient of lateral hydrodynamic force, ρ_g is the water density, S_{gy} is the area of the underwater part of the vessel hull perpendicular to the oncoming flow, ΔW_g is the relative velocity of the oncoming hydrodynamic flow; relative arm of

lateral aerodynamic force $\bar{l}_a = 0,25 + \frac{l_{sc}}{L} - \frac{q_w^\circ}{360^\circ}$, where l_{sc} is the center of sail, L is the length of the vessel, q_w° is the angle of the oncoming aerodynamic flow; relative arm of lateral hydrodynamic

force $\bar{l}_g = 0,5 + \frac{l_{colr}}{L} - \frac{\alpha_w^\circ}{180^\circ}$, where l_{colr} is the center of lateral resistance, α_w° is the angle of the oncoming hydrodynamic flow; aerodynamic yaw torque $M_a = R_{ay} l_a$ and hydrodynamic yaw torque $M_g = R_{gy} l_g$.

The aim and objectives of the research. The aim of the study is to obtain a refined mathematical model in terms of integral equations for determining the resultant lateral force and torque, as well as the resultant lateral force arm, depending on the angle of attack of the flow and the shape of the hull, to increase the accuracy of control calculations using the refined mathematical model, to increase the efficiency of the control system and navigation safety in general. The aim is achieved by taking into account the hull contours when determining the resultant lateral force and torque, as well as the resultant lateral force arm. The objectives of the study are to obtain, for a given hull contour: the integral equation of the resultant lateral force; the integral equation of the resultant torque; the resultant lateral force arm; the values of these parameters for individual simplified forms of hull contours; to compare the results obtained with those known from literary sources.

Main part. Fig. 1 shows a diagram of the interaction of the ship's hull with the oncoming flow.

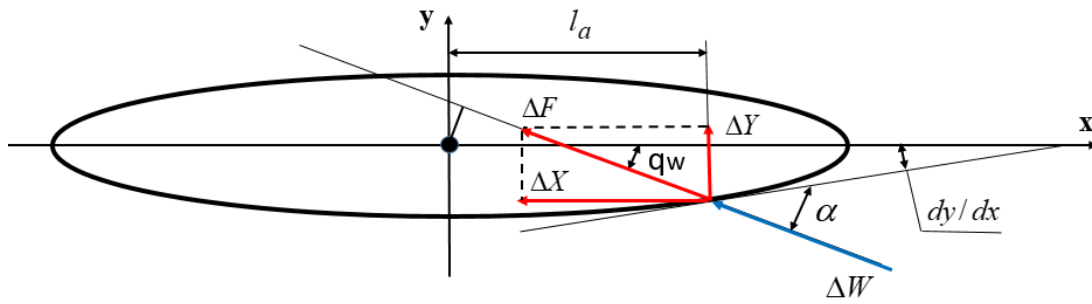


Figure 1 – Diagram of the interaction of the ship's hull with the oncoming flow

A body element of length Δl is subjected to lateral force ΔY and drag force ΔX from an oncoming flow with a relative velocity ΔW at an angle α .

$$\alpha = q_w + \operatorname{arctg}\left(\frac{dy}{dx}\right), \quad (1)$$

where $(y, x) = 0$ is the function describing the contours of a ship's hull, $\frac{dy}{dx}$ is the derivative of the function $(y, x) = 0$ at the point of the element Δl , q_w is the angle of incidence of the flow on the diametrical plane of the vessel.

For a constant q_w , only the angle $\operatorname{arctg}\left(\frac{dy}{dx}\right)$ along the length of the body changes.

The lateral force dY generated by a hull element dl can be written as

$$dY = C_y^\alpha \left(q_w + \operatorname{arctg}\left(\frac{dy}{dx}\right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} dl, \quad (2)$$

where C_y^α – is the coefficient of lateral force, ρ is the density of the medium.

We write the element dl in the form

$$dl = \sqrt{d^2x + d^2y} = \sqrt{d^2x + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2 d^2x} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (3)$$

After substituting equation (3) into equation (2), we obtain

$$dY = C_y^\alpha \left(q_w + \operatorname{arctg}\left(\frac{dy}{dx}\right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (4)$$

The resulting lateral force of the hull is equal to

$$Y(q_w) = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha \left(q_w + \operatorname{arctg}\left(\frac{dy}{dx}\right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx, \quad (5)$$

where L is the length of the ship's hull.

The torque from the lateral force element dY is equal to

$$dM_z = -C_y^\alpha \left(q_w + \operatorname{arctg}\left(\frac{dy}{dx}\right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} x dx, \quad (6)$$

and the resultant torque from the oncoming flow

$$M_z(q_w) = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha \left(q_w + \arctg\left(\frac{dy}{dx}\right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} x dx. \quad (7)$$

Using equations (5) and (7), we find the resultant lateral force arm

$$l_a(q_w) = \frac{M_z}{Y} = \frac{\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha \left(q_w + \arctg\left(\frac{dy}{dx}\right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} x dx}{\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha \left(q_w + \arctg\left(\frac{dy}{dx}\right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx}. \quad (8)$$

Formulas (5), (7) and (8) allow us to determine the resultant lateral force of the hull, the resultant hull torque and the resultant lateral force arm, depending on the angle q_w of the incident flow, for an arbitrary hull contour $(y, x) = 0$.

Resultant lateral force, resultant torque and resultant lateral force arm for an elliptical hull contour. In this case, the hull contour function $(y, x) = 0$ has the form

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (9)$$

Let's find the derivative $\frac{dy}{dx}$ of equation (9)

$$\frac{2x}{a^2} + \frac{2y}{b^2} \frac{dy}{dx} = 0 \rightarrow \frac{dy}{dx} = -\frac{x}{y} \frac{b^2}{a^2}. \quad (10)$$

Also, from equation (9) we find

$$y^2 = b^2 \left(1 - \frac{x^2}{a^2} \right) \rightarrow y = \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} \rightarrow \frac{x}{y} = \frac{xa}{b\sqrt{a^2 - x^2}} \quad (11)$$

After substituting equation (11) into equation (10), we obtain

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{x}{y} \frac{b^2}{a^2} = -\frac{xa}{b\sqrt{a^2 - x^2}} \frac{b^2}{a^2} = -\frac{xb}{a\sqrt{a^2 - x^2}} \quad (12)$$

Substitute the values $\frac{dy}{dx}$ from (12) into equations (5), (7) and (8)

$$Y = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha \left(q_w + \arctg\left(-\frac{xb}{a\sqrt{a^2 - x^2}}\right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(-\frac{xb}{a\sqrt{a^2 - x^2}}\right)^2} dx \quad (11)$$

$$M_z = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha \left(q_w + \arctg\left(-\frac{xb}{a\sqrt{a^2 - x^2}}\right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(-\frac{xb}{a\sqrt{a^2 - x^2}}\right)^2} x dx \quad (12)$$

$$l_a(q_w) = \frac{M_z}{Y} = \frac{\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha \left(q_w + \arctg \left(-\frac{xb}{a\sqrt{a^2-x^2}} \right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(-\frac{xb}{a\sqrt{a^2-x^2}} \right)^2} x dx}{\int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha \left(q_w + \arctg \left(-\frac{xb}{a\sqrt{a^2-x^2}} \right) \right) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + \left(-\frac{xb}{a\sqrt{a^2-x^2}} \right)^2} dx} \quad (13)$$

The obtained integrals (11), (12) and (13) are quite complex to find an analytical solution (or do not have one at all). Therefore, calculations according to formulas (11), (12), (13) are better performed numerically.

Resultant lateral force, resultant torque and resultant lateral force arm for a rectangular hull. For a hull having a rectangular shape, $\frac{dy}{dx} = 0$ along the entire length of the vessel. Then, from formulas (5), (7), (8) we obtain

$$Y = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} dx = C_y^\alpha q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} x \Big|_{-L/2}^{+L/2} = C_y^\alpha q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} \left(\frac{L}{2} + \frac{L}{2} \right) = C_y^\alpha q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} L \quad (14)$$

$$M_z = \int_{-\frac{L}{2}}^{+\frac{L}{2}} C_y^\alpha q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} x dx = \frac{1}{2} C_y^\alpha q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} x^2 \Big|_{-L/2}^{+L/2} = \frac{1}{2} C_y^\alpha q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} \left(\left(\frac{L}{2} \right)^2 - \left(-\frac{L}{2} \right)^2 \right) = 0 \quad (15)$$

$$l_a(q_w) = \frac{M_z}{Y} = 0 \quad (16)$$

Resultant lateral force, resultant torque and resultant lateral force arm for the wedge-shaped part of the hull. The diagram of the interaction of the wedge-shaped part of the hull with the oncoming flow is shown in Fig. 2.

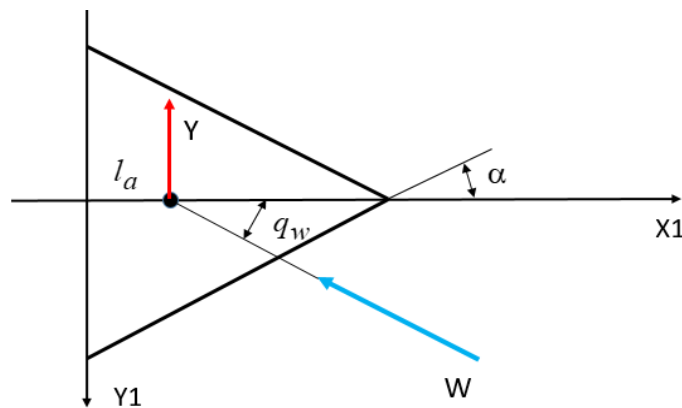


Figure 2 – Diagram of the interaction of the wedge-shaped part of the body with the oncoming flow

For the wedge-shaped part of the body

$$\frac{dy}{dx} = -tg\alpha \quad (17)$$

After substituting equation (17) into equations (5), (7), (8), we obtain

$$Y(q_w) = \int_0^{\Delta} C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} dx = C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} x \Big|_0^{\Delta} =$$

$$= C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} (\Delta - 0) = C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} \Delta \quad (18)$$

$$M_z(q_w) = \int_0^{\Delta} C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} x dx = \frac{1}{2} C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} x^2 \Big|_0^{\Delta} =$$

$$= \frac{1}{2} C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} (\Delta^2 - 0) = \frac{1}{2} C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} \Delta^2 \quad (19)$$

$$l_a(q_w) = \frac{M_z(q_w)}{Y(q_w)} = \frac{\frac{1}{2} C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} \Delta^2}{C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} \Delta} = \frac{1}{2} \Delta \quad (20)$$

Resultant lateral force, resultant torque and resultant lateral force arm for a rectangular hull with a wedge-shaped nose. The resultant lateral force is found as the sum of the resultant forces of the rectangular and wedge-shaped hull parts, taking into account the change in the limits of integration

$$Y = C_y^{\alpha} q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} (L - \Delta) + C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} \Delta \quad (21)$$

The resultant torque is found as the sum of the resultant torque of the rectangular and wedge-shaped parts of the body, taking into account the change in the limits of integration.

$$M_z = \frac{1}{2} C_y^{\alpha} q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} \left(\left(\frac{L}{2} - \Delta \right)^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} \Delta^2 \quad (22)$$

From equations (21), (22) we find the shoulder of the resulting lateral force

$$l_a(q_w) = \frac{M_z(q_w)}{Y(q_w)} = \frac{\frac{1}{2} C_y^{\alpha} q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} \left(\left(\frac{L}{2} - \Delta \right)^2 - \left(\frac{L}{2} \right)^2 \right) + \frac{1}{2} C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} \Delta^2}{C_y^{\alpha} q_w \rho \frac{\Delta W^2}{2} (L - \Delta) + C_y^{\alpha}(q_w + \alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} \sqrt{1 + tg^2 \alpha} \Delta} \quad (23)$$

Fig. 3 shows a container ship with a rectangular cargo shape in the aerodynamic flow, a rectangular and wedge-shaped hull shape in the aerodynamic and hydrodynamic flow.



Figure 3 – Shapes of the hull and cargo contours of a container ship

Conducting the experiment. The above-obtained integral equations (11)–(13) for determining the resultant lateral force, the resultant torque and the resultant lateral force arm for the elliptical contour of the hull, Fig. 1, which do not have analytical solutions, or the solutions are quite complex, so we will apply numerical methods. A fragment of the program for numerical integration of equations (11)–(13) is shown in Fig. 4.

```

Editor - C:\Program Files\Polyspace\Наработка\ПРАКТИЧНІ ЗАНЯТТЯ\Article4.m*
disp12.m  sensor.m  runge12.m  ship12.m  meteo.m  sysctr12.m  Article.m  Arti
21  %Початкові умови
22  x=-a+dx;
23  Y=0; %результуюча бокова сила
24  Mz=0; %результуючий момент
25
26  dV=10; %відносна швидкість набігаючого потоку
27  qw=180/57.3; %кут набігання потоку
28  jp=1;
29  while x<=a-dx
30  dydx=-b*x/(a*sqrt(a^2-x^2)+0.0000001);
31  calfa=(cos(qw)+dydx*sin(qw))/sqrt(1+dydx^2);
32  salfa=(dydx*cos(qw)-sin(qw))/sqrt(1+dydx^2);
33  alfa=asin(salfa);
34  if alfa>0
35  alfa=0; %бокова сила і момент не створюються
36  end
37  dY=0.5*cyalfa*alfa*ro*dV^2*sqrt(1+dydx^2)*dx;
38  Y=Y+dY;
39  dMz=0.5*cyalfa*alfa*ro*dV^2*sqrt(1+dydx^2)*x*dx;
40  Mz=Mz+dMz;
41  la=Mz/Y;
42  x=x+dx;
43  xp(1,jp)=Y;
44  xp(2,jp)=Mz;
45  xp(3,jp)=la;
46  jp=jp+1;
47  end
48  subplot(1,3,1); %матриця 1x3, перший графік
    
```

Figure 4 – A fragment of the program in the MATLAB environment

Fig. 5–7 show graphs of the dependence of the resulting lateral force Y , the resulting torque M_z and the resulting lateral force arm l_a on the angle q_w of attack of the flow for an elliptical body contour.

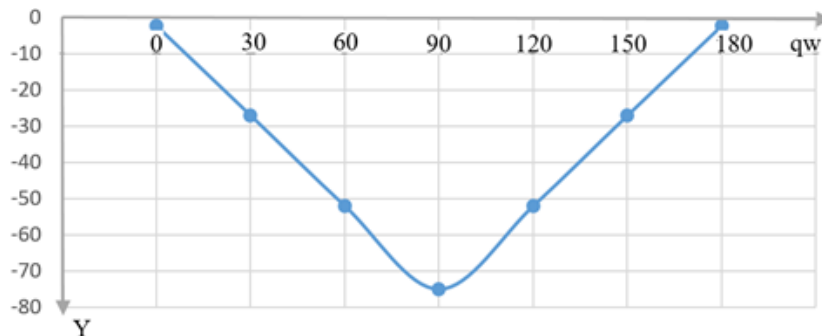


Figure 5 – Graph of the dependence of the resulting lateral force Y on the angle q_w of attack of the flow for an elliptical body contour

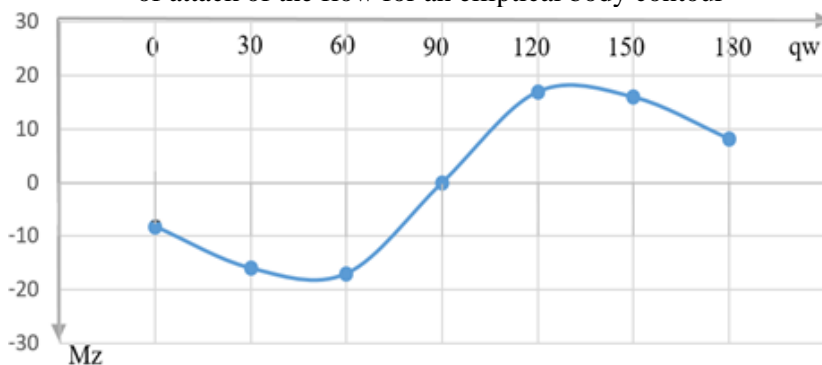


Figure 6 – Graph of the dependence of the resulting torque M_z on the angle q_w

of attack of the flow for an elliptical body contour

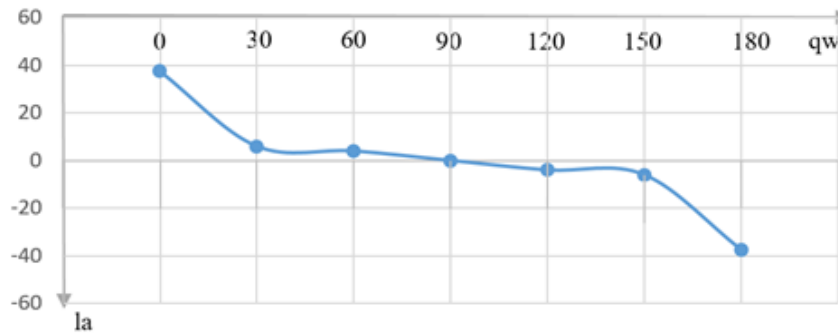


Figure 7 – Graph of the dependence of the resultant lateral force arm l_a on the angle q_w of attack of the flow for an elliptical body contour

As can be seen from the results obtained, for the elliptical shape of the hull contours, the resultant torque M_z and the resulting lateral force arm significantly depend on the angle of attack of the flow, Fig. 6–7. For the rectangular shape of the hull contours, the resultant torque M_z and the resulting lateral force arm are equal to zero, regardless of the angle of attack of the flow, formulas (15), (16). For the wedge-shaped shape of the hull contours, the resultant torque M_z and the resulting lateral force arm are constant values and also do not depend on the angle of attack of the flow, formulas (19), (20). Therefore, the resultant torque and the resulting lateral force arm do not depend on the angle of attack of the flow, if the derivative of the hull contour function is constant along the length of the vessel. The resultant torque and the resultant lateral force arm do not depend on the angle of the incident flow, and are equal to zero if the derivative of the hull contour function is equal to zero along the entire length of the vessel hull.

Discussion. The issues of the influence of hull and cargo contours on hydrodynamic and aerodynamic forces and torques are considered, which is important to know when using a mathematical model in a control system. A search and analysis of literary sources devoted to the issues of hydrodynamic and aerodynamic interaction of the ship's hull with the environment and the use of mathematical models in control systems are carried out. Integral functions for determining the resulting lateral force, the resulting yaw torque and the resulting lateral force arm are obtained, depending on the angle of incidence of the flow and the shape of the hull contours. The values of the integral functions are calculated for simple hull contours, and a numerical calculation is performed for an elliptical hull contour. In comparison with known solutions [16], it was found that the arm of lateral force and the resulting yaw torque do not depend on the angle of incidence of the flow for hulls in which the derivative of the contour is constant along the length of the hull, for example, for a rectangular and wedge-shaped hull. For other hull contours, these dependencies are purely nonlinear. The obtained results allow: to estimate the resulting lateral force, arm of lateral force and the resulting yaw torque much more accurately. In comparison with other known approaches to determining external influences by mathematical modeling of a system of partial differential equations, for example, by CFD methods, the developed model allows estimating the specified parameters in real time and can be used in the on-board computer of automated / automatic control systems. The obtained results are explained by finding and using the integral functions of the given forces and torque, which for simple hull shapes are reduced to analytical solutions. The results are reproducible and can be used in the development of mathematical support for the on-board computer of automated / automatic vessel motion control systems. Further research may be related to the use of neural networks for evaluating hydrodynamic interaction.

Conclusions. The issues of the influence of the hull and cargo contours on the hydrodynamic and aerodynamic forces and torques are considered. Integral functions for determining the resulting lateral force, the resulting yaw torque and the arm of the resulting lateral force are obtained, depending on the angle of incidence of the flow and the shape of the hull

contours. The values of the integral functions are calculated for simple hull contours and a numerical calculation is performed for an elliptical hull contour. It is established that the resulting torque and the arm of the resulting lateral force do not depend on the angle of incidence of the flow for hull contours in which the derivative of the contour is constant along the length of the hull. Compared with known approaches to determining the hydrodynamic and aerodynamic interaction of the vessel hull with the environment, the obtained results allow: to calculate the resulting lateral force, arm of resulting lateral force and resulting yaw torque more accurately using simple mathematical models that can be used in the automated / automatic control system.

The theoretical significance of the results obtained is: obtaining integral functions for determining the resultant lateral force, the resultant yaw torque and the resultant lateral force arm, depending on the angle of attack of the flow and the shape of the hull contours; calculating the value of integral functions for simple hull contours.

The practical significance of the results obtained is the possibility of their use for calculating the resultant lateral force, the arm of resultant lateral force and the resultant torque in the mathematical model of the on-board computer automated / automatic vessel motion control system in real time.

REFERENCES

1. Zhang, X., Ding, F. (2020). Adaptive parameter estimation for a general dynamical system with unknown states, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*. <https://doi.org/10.1002/rnc.4819>.
2. Kliuiev, O., Sadovoi, O., Serhiienko, S., Sokhina, Yu. (2022). Vykorystannia filtra Kalmana yak sposterihacha stanu u vektornii systemi keruvannia asynkronnoiu mashynoiu, *Elektroenerhetyka, elektrotehnika ta elektromekhanika*. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2022.5>.
3. Ivaniuk, M. A., Pyskunov, S. O. (2021). Kontroler tysku dlia pnevmatychnoho halma na osnovi filtra Kalmana, *Innovatsii molodi v mashynobuduvanni*, Vol. 3. <https://doi.org/10.20535/2708-3926.2021.3.229206>.
4. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G. (2017). Ispol'zovanie nejrosetevoj modeli sudna dlya resheniya zadach upravleniya, *Naukovij visnik HDMA №2 (17)*, c. 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.
5. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Shalaeva, A. A. (2017). Ocenka manevrennykh vozmozhnostej sudna s pomoshch'yu nejrosetevoj modeli, sinteziruemoj v processe ego shtatnoj ekspluatacii, *Materiali IV MNPK «Bezpeka zhittediyal'nosti na transporti a virobniactvi: osvita, nauka, praktika»*, Herson, 14–16 veresnya 2017 r., s. 236–240.
6. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Grosheva, O. A. (2018). Sintez optimal'nogo upravleniya sudnom s granichnymi usloviyami, *Naukovij visnik HDMA №1(18)*. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.
7. Kulikov, D. O., Kupina, O. A., Loria, M. H., Tselishchev, O. B (2022). Vykorystannia matematychnoi modeli dlia optymizatsii dynamichnykh parametriv protsesiv vyrobnytstva amiaku, *Visnyk skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu im. V. Dalia*. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-275-5-49-54>.
8. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Shalaeva, A. A. (2017). Raschet i realizaciya manevra raskhozhdeniya s sudami celyami v bortovoj CVM, *Materiali IV MNPK «Bezpeka zhittediyal'nosti na transporti ta virobniactvi: Osvita, nauka, praktika»*, Herson, 14–16 veresnya 2017 r., s. 230–235.
9. Ayub, F. A, Furukawa, Y. (2020). Prediction of Hydrodynamic Forces Acting on Wigley Hull based on SQCM, *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 557(1):012015, September 2020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/557/1/012015>.

10. Kryvyi, O., Miyusov, M. (2019). The Creation of Polynomial Models of Hydrodynamic Forces on the Hull of the Ship with the help of Multi-factor Regression Analysis, 8-th International Maritime Science Conference (IMSC), Budva, Montenegro.
11. Gokulakrishnan, M., Jebin, S., Kumar, A., Vijayakumar, R. (2022). Numerical prediction of hydrodynamic forces and moments of KCS in shallow water, Conference: OCEANS 2022 – Chennai. <https://doi.org/10.1109/OCEANSCennai45887.2022.9775441>.
12. Bitiukov, M. A., Herasymov, K. D., Kyrylov, P. A., Chystiakov, R. S. (2022). Zastosuvannia chyselnykh metodyk dlia otsinky vplyvu nepriamostinnosti korpusu sudna na velychynu khvylovykh navantazhen, Pratsi Krylovskoho derzhavnoho naukovooho tsentru S-I (1), 98–101 <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-98-101>.
13. Davydov, I., Pecheniuk, A. (2023). Doslidzhennia vplyvu formy nosovoi chastyny sudna na yoho opir v umovakh tykhoi vodi ta khvyliuvannia, Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-7-20>.
14. Chureev, E. A., Romanyuta, D. A., Belousov, V. A., Nikolaev, I. I. (2022). Obosnovanie i vybor osnovnykh karakteristik malogo rybolovnogo sudna s bol'shoj polnotoj korpusa, Izvestiya KGTU. <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-67-71-86>.
15. Begovic, E., Panahi, S., Rinauro, B., Rosano, G. (2023). Determination of Hydrodynamic Maneuvering Coefficients of a Planing Hull Using CFD with the Aid of SDT, Progress in Marine Science and Technology, Vol. 7, 65–77. <https://doi.org/10.3233/PMST230010>.
16. D'omin, S. I., Zhukov Ye. I., Kubachov M. O. ta in. (1991). Keruvannya sudnom: Navchal'nyy posibnyk dlya VNZ. Pid redaktsiyeyu Snopkova V. I., 359 s.

Зінченко С., Калініченко Є., Козачок Ю., Матейчук В. ВПЛИВ КОНТУРІВ КОРПУСУ ТА ВАНТАЖУ НА БІЧНУ СИЛУ І МОМЕНТ РИСКАННЯ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ СУДНОМ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Важливим елементом математичного забезпечення бортового обчислювача є математична модель судна, використання якої дозволяє суттєво підвищити якість системи керування. Математичні моделі використовуються для прогнозування руху об'єкта керування, спостереження за параметрами вектора стану системи, недоступних прямому вимірюванню, у тому числі в шумах, визначення відмов командних та виконавчих пристроїв, вирішення оптимізаційних задач тощо. Метою дослідження є визначення результуючої бокової сили і моменту, а також плеча результуючої бокової сили, залежно від кута набігання потоку та форми корпусу, підвищення точності розрахунків керувань із використанням уточненої математичної моделі, підвищення ефективності системи керування та безпеки судноплавства в цілому. Отримані інтегральні функції визначення результуючої бокової сили, результуючого моменту рискання та плеча результуючої бокової сили, залежно від кута набігання потоку та форми обводів корпусу. Розраховані значення інтегральних функцій для простих обводів корпусу. У порівнянні із відомими підходами до визначення гідродинамічної та аеродинамічної взаємодії корпусу судна з оточуючим середовищем, отримані результати дозволяють: значно точніше оцінювати зовнішні впливи із використанням простих математичних моделей, які можна застосовувати у бортовому обчислювачі системи керування у реальному часі. Отримані результати пояснюються знаходженням та використанням інтегральних функцій визначення результуючої бокової сили, результуючого моменту та плеча результуючої бокової сили, які для простих форм корпусу зводяться до аналітичних рішень. Результати є відтворюваними і можуть використовуватися в математичній моделі автоматизованої системи керування рухом судна в реальному часі.

Ключові слова: інтелектуальні системи керування транспортом; людський чинник; навігаційна безпека; математична модель; плече бокової сили; енергоефективність.

© Zinchenko S., Kalinichenko Ye., Kozachok Yu., Mateichuk V.

Статтю прийнято до редакції 06.12.2024

ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ БЕЗЕКІПАЖНОГО НАДВОДНО-ПІДВОДНОГО КАТЕРА ТРАНСПОРТНОГО ТИПУ

Бурунін А. П., аспірант, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: splashbox98@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1017-9766.

Метою роботи є доповнення чинної класифікації морських безкіпажних апаратів шляхом внесення до неї безкіпажних надводно-підводних катерів, визначення їх основних особливостей як об'єктів автоматичного керування та формування генеральної множини задач синтезу систем автоматизованого й автоматичного керування ними, а також розробка узагальненої структури системи автоматичного керування однією з ключових систем безкіпажного надводно-підводного катера – системи подачі повітря до теплового двигуна катера при його підводному русі. Для досягнення поставленої мети використано метод ієрархічної класифікації для доповнення чинної класифікації морських безкіпажних апаратів та метод системного підходу при формулюванні задач синтезу систем керування такими катерами. Результатом дослідження є доповнення класифікації морських безкіпажних апаратів, яке включає новий вид морських безкіпажних апаратів, а також їх розподіл на типи, категорії та класи згідно з призначенням. Показано, що при розробці структури системи автоматичного керування безкіпажним надводно-підводним катером доцільно розділяти її на виконавчий, програмний, адаптивний, тактичний та стратегічний рівні. Запропоновано генеральну множину задач синтезу системи керування безкіпажними надводно-підводними катерами у складі задачі керування просторовим рухом катера як твердого тіла, що може рухатись по морській поверхні та під водою, задачі керування енергетичною системою катера, задачі керування інформаційною системою катера та задачі керування морською місією катера у цілому. Для кожної задачі розроблено перелік функціональних підзадач, які охоплюють головні процеси автоматизації катера. У сукупності розроблений перелік задач утворює науково-технічне підґрунтя для розробки систем автоматизованого та автоматичного керування катером в усіх основних режимах його застосування як транспортного засобу. Наукову новизну утворюють удосконалена класифікація морських безкіпажних апаратів, вперше запропоновані генеральна множина та складові задач синтезу систем автоматичного керування морським надводно-підводним катером. Практична значущість дослідження полягає у науковій структуризації проектних робіт щодо створення нового виду морської робототехніки, що дає можливість системно виконувати подальші проектні роботи з розробки систем автоматичного керування безкіпажним надводно-підводним катером.

Ключові слова: безкіпажний надводно-підводний катер; класифікація; синтез системи керування.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.035-048

Вступ. Постановка проблеми. На цей час у розвинених морських країнах світу спостерігається стійка тенденція щодо впровадження новітніх засобів морської робототехніки (ЗМР) у всі сфери господарської діяльності на морі [1–3]. Причому, однією зі складових вказаної тенденції, що останнім часом активно втілюється у морську практику, є дослідження, проектування і будівництво малорозмірних та швидкісних безкіпажних надводних катерів (БНК) [4].

Актуальність такого виду ЗМР обумовлена зростаючими обсягами транспортних, науково-дослідних і природоохоронних робіт на морі [5, 6].

Однак, технології застосування БНК у вказаних місіях свідчить про недоліки, які обмежують успішне застосування такого виду ЗМР у складних погодних умовах. Це пов'язано зі труднощами експлуатації в умовах, коли зовнішні збурення (вітер, хвиля) унеможливають виконання заданої місії з необхідною якістю.

Одним з ефективних способів підвищення ефективності застосування швидкісних БНК є зниження впливу вказаних збурюючих чинників шляхом тимчасового занурення катера під воду, тобто шляхом включення у морську надводну місію такого катера підводної складової руху.

Тому на сьогодні актуальним вбачається створення двохсередовищних (надводно-підводних) безкіпажних катерів, які б поєднували переваги надводних і підводних ЗМР.

Як вид морського транспорту безкіпажні надводно-підводні катери (БНПК, в англomовному скороченні – Unmanned Surface and Underwater Boat, USUB) належать для ЗМР спеціального призначення і можуть використовуватись для доставлення корисних вантажів у складних умовах експлуатації. Висока їх затребуваність сьогодні обумовлена зростанням обсягів морегосподарської діяльності приморських країн та підвищенням вимог до надійності морських транспортних операцій. Однією зі складових завдання створення БНПК є розробка високоефективних систем автоматичного керування ними, оскільки від якості керування напряду залежить ефективність їх застосування за призначенням.

Очевидно, що автоматичне керування таким засобом робототехніки суттєво відрізняється від керування катерами традиційної конструкції. Це пов'язано, по-перше, з необхідністю забезпечення безпечного просторового руху БНПК не тільки по поверхні моря, а й підводного керованого руху катера, і по-друге, з необхідністю якісного виконання надводної та підводної складових місії в умовах дії зовнішніх збурень, які діють на катер.

Це обумовлює актуальність постановки задачі щодо дослідження особливостей автоматичного керування таким катером.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід зазначити, що питання конструкції БНПК, у цілому, та синтезу їх систем автоматичного керування, зокрема, у науковій літературі практично відсутні. До найбільш описаних двохсередовищних пілотованих катерів відносяться катери для морського туризму – двомісні катери «Sea Breacher» американської компанії «Innespace Inc» та шестимісні катери «Jet Shark», а також найновіші човни цього типу – «Scubacraft 3» і «Scubacraft 6» [7, 8]. Корпуси цих човнів мають композитний корпус і забезпечують на поверхні максимальну швидкість 50 миль/год на повітряній подушці. Надводний та підводний рух здійснюється за допомогою 4-тактного двигуна внутрішнього згоряння та гідрореактивного приводу, що працює від високопродуктивного насоса. Катери мають інтуїтивно зрозуміле керування зануренням, бортовий приймач GPS і підводний комп'ютер, а також бортову подачу повітря з резервним джерелом, ультракороткохвильовий радіозв'язок та підводний зв'язок. Глибина занурення катера – 50 метрів з тривалістю перебування під водою до 90 хв та підводним рухом з підводною швидкістю 3 вузли.

Що ж стосується безкіпажних двохсередовищних катерів, то найбільші досягнення отримані у рамках програми ЄС «I-SEAMORE» компанією iXblue, де створено лінійку з чотирьох БНПК «DriX H8», «DriX H9», «DriX O16» та «DriX O25» [9]. Катери DriX розроблені для роботи під дистанційним керуванням оператора, але передбачають високий рівень автономності.

Зовнішній вигляд БНПК цієї серії показано на рис. 1.

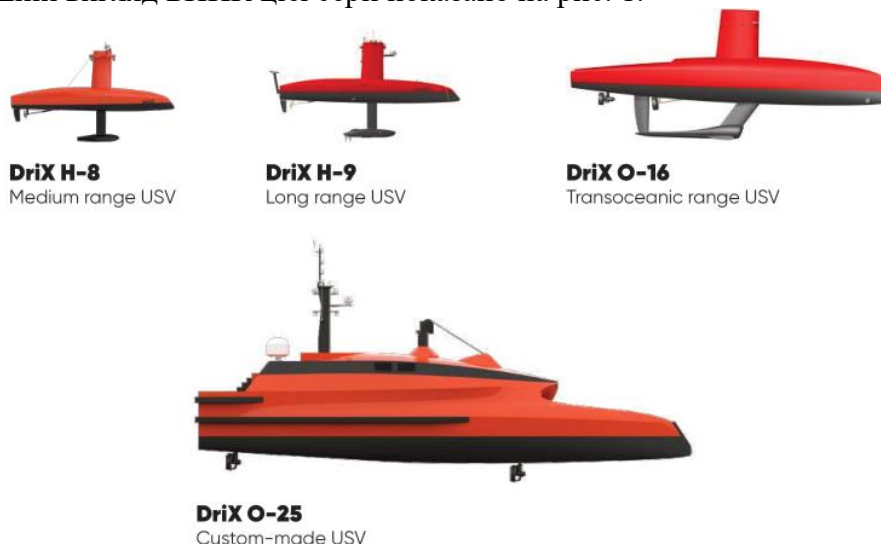


Рисунок 1 – Безкіпажні надводно-підводні катери DriX компанії iXblue, як приклад можливого архітектурно конструктивного типу БНПК

Катери DriX є, по суті, відкритою універсальною надводно-підводною платформою, яка спроможна транспортувати широкий діапазон корисних вантажів у своїй підводній гондолі. Комунікація з операцій можлива на дистанціях прямої видимості або за горизонтом через багатоканальну систему радіо- та супутникового зв'язку.

Подальший аналіз літератури [10, 11] не виявив ознак розробки і створення двохсередовищних катерів, що свідчить про те, що даний тип малорозмірних суден знаходиться на початковій стадії свого розвитку.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Детальне вивчення конструкторських рішень катерів компанії iXblue дає змогу виділити наступні характерні особливості такої техніки та форми її висвітлення у науково-технічній літературі:

- розміщення корисного вантажу передбачається тільки у підводній частині катера (у підводній гондолі), що суттєво обмежує можливості катерів як універсальних транспортних засобів;

- опис катерів як об'єктів керування надано тільки в обсягах загальної реклами, зокрема, зовсім відсутня інформація про керування надводним і підводним рухом катера, керування корисним вантажем катера та про особливості керування його основними підсистемами – енергетичною, навігаційною, баластною, крено-диферентною та іншими.

Таким чином, можна констатувати, що на цей час у науково-технічній літературі відсутня інформація щодо досліджень і розробок:

- безекіпажних надводно-підводних катерів як універсальних носіїв корисного вантажу різних типів та призначення;

- систем керування безекіпажними надводно-підводними катерами як твердими тілами, які виконують керований рух на поверхні моря та у підводному положенні в умовах невизначеностей зовнішніх збурень.

Мета і задачі дослідження – доповнення чинної класифікації морських безекіпажних апаратів шляхом внесення до неї безекіпажних надводно-підводних катерів, визначення основних особливостей автоматичного керування такими об'єктами морської робототехніки, обумовлених їх надводним і підводним керованим рухом, формування генеральної множини задач синтезу систем автоматичного керування ними та розробка узагальненої структури системи автоматичного керування однією з ключових систем безекіпажного надводно-підводного катера – системи подачі повітря до теплового двигуна катера при його підводному русі.

Виклад основного матеріалу. У процесі виконання дослідження було використано загальнонаукові методи: метод ієрархічної класифікації (для доповнення чинної класифікації морських безекіпажних апаратів) та метод системного підходу (при формулюванні задач синтезу систем керування такими катерами).

Об'єктом дослідження є новий тип морської робототехніки – безекіпажний надводно-підводний катер як об'єкт керування.

Предметом дослідження є класифікаційні ознаки безекіпажного надводно-підводного катера та його особливості як об'єкту керування, задача синтезу систем автоматизованого й автоматичного керування катером та розробка узагальненої структури системи автоматичного керування системою подачі повітря до теплового двигуна катера при його підводному русі.

При виконанні широкого спектра транспортних задач на акваторіях держави залучення БНПК дасть змогу суттєво підвищити надійність морської транспортної місії, оскільки у випадку виникнення складних природних умов катер має змогу зануритись під воду і продовжити рух у підводному положенні або лягти у дрейф в очікуванні, коли погодні умови поліпшаться. У зв'язку з цим доцільно розглянути можливі застосування БНПК для розв'язку завдань транспортного характеру [12].

Згідно з класифікацією, наданій у [13], на цей час загальноприйнятим є підхід до класифікації видів морських безекіпажних апаратів, який ґрунтується на середовищі їх функціонування. У зв'язку з цим всі наявні морські безекіпажні апарати розділяються на два

види – надводні і підводні. У свою чергу, надводні апарати за призначенням рекомендується поділяти на бойові апарати та апарати забезпечення і підтримки.

Очевидно, що транспортні морські безекіпажні апарати необхідно відносити до апаратів забезпечення і підтримки, тому далі у цій статті будуть розглядатись саме такі засоби морської робототехніки.

Аналіз рекомендованої в [13, 14] класифікації безекіпажних надводних і підводних апаратів свідчить, що чинний перелік засобів надводної та підводної морської робототехніки не містить відомостей про новий та перспективний для реалізації транспортних задач вид суден – безекіпажні надводно-підводні катери, а їх можливе застосування в інтересах держави до цього часу не розглядалось.

Очевидно, що прикладні наукові дослідження і проєктні роботи у напрямку створення БНПК доцільно починати з їх класифікації та розробки оперативних вимог, які б утворили науково-технічне підґрунтя для їх проєктування та синтезу високоефективних систем керування ними.

У зв'язку з цим пропонується наступне доповнення до класифікації морських безекіпажних апаратів, яке передбачає уведення окремого виду МБеА – безекіпажні надводно-підводні катери, які мають два рівноцінних середовища функціонування:

- вид – надводно-підводні;
- тип (за масою) – малі (менше 500 кг), середні (500–10000 кг);
- категорія – забезпечення та підтримки;
- клас – транспортні, природоохоронні, пошуково-рятувальні, гідрографічні, навігаційного забезпечення, ретранслятори.

Розглянемо тепер основні особливості БНПК як об'єкту керування, які необхідно врахувати при синтезі систем автоматизованого та автоматичного керування такими засобами морської робототехніки.

Аналіз конструкції та світовий досвід експлуатації БНПК свідчить, що при створенні вітчизняних зразків такої техніки слід враховувати:

- особливості гідродинаміки корпусу катера та її вплив на керування катером як твердим тілом, що рухається по водній поверхні та у товщі води (зміна керованості та ходовості БНПК);
- особливості побудови енергетики катера, обумовлені можливим використанням двох різних типів бортових джерел енергії під час виконання місії;
- особливості побудови інформаційного забезпечення катера (систем навігації та зв'язку, сенсорів виконавчих механізмів катера), обумовлені багаторазовою зміною зовнішнього робочого середовища залежно від режимів надводного чи підводного ходу БНПК;
- особливості побудови і реалізації морської місії БНПК, що обумовлює необхідність розробки нової тактики одиночного та групового застосування БНПК, яка б враховувала та ефективно використовувала його можливість керованої зміни середовища функціонування, а також необхідність уточнення режимів роботи катера у цілому та його виконавчих механізмів.

Вказані особливості лежать у руслі системного підходу [15] і вимагають розробки науково обґрунтованих методів синтезу як узагальнених структур систем керування БНПК, так і підсистем керування окремими виконавчими механізмами катера.

Зазначимо, що при розробці структури системи автоматичного керування БНПК доцільно розділяти її на наступні п'ять функціональних рівнів: виконавчий L_E , програмний L_P , адаптивний L_A , тактичний L_T і стратегічний L_S [16].

Розглянемо особливості вказаних функціональних рівнів системи автоматичного керування БНПК більш детально.

На стратегічному рівні L_S аналізується завдання для БНПК (морська місія M_i), що надійшла радіоканалом або задана програмно в базі даних перед виходом БНПК у море, планується загальне функціонування (стратегія) БНПК для її виконання з урахуванням

розмірів заданої акваторії, її глибин і течій (географічних координат акваторії, заданих множинами широти і довготи (Φ, Λ), ізобат глибин моря (\vec{H}) та епюри поверхневих і підводних течій (\vec{V}_W), навігаційних особливостей та обмежень цієї акваторії (активного судноплавства, видобувної промислової діяльності, «нечистих ґрунтів» тощо) та гідрометеорологічних характеристик зовнішнього середовища («рози вітрів» \vec{V}_V , морського хвилювання \vec{V}_{BS} , температури повітря \bar{t}_A та води \bar{t}_W , наявності криги на частині акваторії \bar{I}_S тощо).

Крім того, для визначення поточного положення БНПК на акваторії використовується інформація від електронної картографічної навігаційно-інформаційної системи (ЕКНІС) [17], звідки надходять його поточні географічні координати.

На тактичному рівні L_T планується реалізація прийнятої стратегії. Тут з урахуванням характеристик акваторії обираються методики виконання місії, обираються, обчислюються та оптимізуються траєкторії просторового переміщення БНПК для реалізації його основних технологічних режимів роботи, формуються послідовності базових операцій відповідно до стратегії функціонування БНПК тощо.

На адаптивному рівні L_A коригуються рішення тактичного рівня з урахуванням технічного стану елементів БНПК та фактичного стану зовнішнього середовища, задає поточні критерії оптимального керування, здійснює пошук оптимальних керуючих рішень у рамках обраної тактики виконання завдання, що надійшло від тактичного рівня керування. Тут із залученням методів математичного моделювання визначаються оптимальні швидкості руху БНПК (наприклад, за критеріями максимальної продуктивності чи експлуатаційних витрат).

Програмний рівень керування L_P забезпечує узгоджене керування виконавчими механізмами залежно від режиму роботи БНПК. Тут синтезуються алгоритми групового керування виконавчими механізмами БНПК та генерується (або залучається з бази даних) їх програмна реалізація.

Виконавчий рівень L_E на основі заданих впливів від програмного рівня L_P виробляє сигнали керування виконавчими механізмами БНПК згідно з критеріями оптимальності, які задані на адаптивному рівні L_A .

Виходячи з вище сказаного, сформулюємо генеральну множину T_{USUB} задач синтезу систем керування БНПК у складі задачі керування просторовим рухом катера як твердого тіла, що може рухатись по морській поверхні та під водою T_M , задачі керування енергетичною системою катера T_E , задачі керування інформаційною системою катера T_I та задачі керування морською місією катера у цілому T_F :

$$T_{USUB} = \{T_M; T_E; T_I; T_F\}. \quad (1)$$

Генеральна множина (1) задач синтезу системи керування БНПК сформована з урахуванням його специфіки як об'єкту керування і може слугувати підґрунтям для розробки узагальненого алгоритму та структури системи керування катером в усіх основних режимах його застосування як транспортного засобу оборонного призначення.

Розглянемо напрямки розв'язку вказаної множини задач більш детально.

Аналіз задачі T_M , яка розглядає рух БНПК по морській поверхні та під водою показує, що її розв'язок необхідно розглядати у складі шести підзадач:

- підзадачі керованого процесу надводного руху катера T_{M-S} ;
- підзадачі керованого процесу занурення катера на глибину роботи шноркеля T_{M-DS} ;
- підзадачі керованого процесу підводного руху катера «під шноркелем» T_{M-US} ;
- підзадачі керованого процесу занурення катера на робочу глибину T_{M-DJ} ;
- підзадачі керованого процесу підводного руху катера на робочій глибині T_{M-UJ} ;
- підзадачі керованого процесу спливання катера на поверхню моря T_{M-E} .

Таким чином, задачу T_M можна представити у складі наступних підзадач:

$$T_M = \{T_{M-S}; T_{M-DS}; T_{M-US}; T_{M-DJ}; T_{M-UJ}; T_{M-E}\}. \quad (2)$$

Очевидно, що розв'язок підзадач T_{M-S} і T_{M-UJ} є тривіальним, оскільки надводний керований рух малорозмірних швидкісних суден та керований рух підводних апаратів є добре вивченим [18, 19].

До особливостей розробки системи автоматичного керування процесом занурення БНПК (підзадачі T_{M-DS} та T_{M-DJ}) процесу руху «під шноркелем» (підзадача T_{M-US}) належить вивчення особливостей та синтез алгоритмів керування його баластно-вирівнювальною та крено-диферентною системами, які мають забезпечити занурення катера та задане його просторове положення, необхідне для керованого траєкторного підводного руху у цих режимах.

До особливостей системи автоматичного керування процесом спливання БНПК (підзадача T_{M-E}) належить вивчення особливостей та синтез алгоритмів керування його баластно-вирівнювальною та крено-диферентною системами, які мають забезпечити спливання катера на поверхню моря.

Аналіз задачі T_E , яка розглядає керування енергетичною системою БНПК, показує, що її розв'язок необхідно розглядати, відповідно до (2), у складі шести головних підзадач:

- підзадачі керованого процесу енергетичного забезпечення надводного руху катера T_{E-S} ;
- підзадач керованих процесів енергетичного забезпечення занурення катера на глибину роботи «під шноркелем» T_{E-DS} та на робочу глибину T_{E-DJ} ;
- підзадач керованих процесів енергетичного забезпечення підводного руху катера «під шноркелем» T_{E-US} та на робочій глибині T_{E-UJ} (останній передбачає зупинку головного теплового двигуна БНПК та живлення його рушійного комплексу від бортових акумуляторних батарей);
- підзадачі керованого процесу енергетичного забезпечення спливання катера на поверхню моря T_{E-E} та запуску головного теплового двигуна.

Таким чином, задачу T_E можна представити у складі наступних підзадач:

$$T_E = \{T_{E-S}; T_{E-DS}; T_{E-DJ}; T_{E-US}; T_{E-UJ}; T_{E-E}\}. \quad (3)$$

Розв'язок підзадач T_{E-S} і T_{E-U} також є тривіальним, оскільки керування енергетичними установками надводних малорозмірних швидкісних суден та керування енергетичними установками підводних апаратів є добре вивченим [20, 21].

До особливостей розробки системи автоматичного керування енергетичною установкою БНПК у режимі занурення катера (підзадачі T_{E-DS} та T_{E-DJ}) належить синтез алгоритмів керування його енергетичним обладнанням у режимі переходу з надводного у підводне положення. У першу чергу це передбачає керування шноркелем і, відповідно, керування зупинкою головного теплового двигуна катера та його підготовкою до занурення.

До особливостей розробки системи автоматичного керування енергетичною установкою БНПК при спливанні катера (підзадача T_{E-E}) належить встановлення особливостей та синтез алгоритмів керування його енергетичним обладнанням у режимі переходу з підводного положення у надводне, тобто розробки алгоритмів керування процесами підготовки до запуску та запуск головного теплового двигуна катера після його спливання.

Далі, **аналіз задачі T_I** , яка розглядає керування інформаційною системою катера, показує, що її розв'язок необхідно розглядати у складі чотирьох головних підзадач:

- підзадачі керування інформаційними потоками, які циркулюють при надводному русі катера T_{I-S} ;
- підзадачі керування інформаційними потоками, які циркулюють при зануренні катера T_{I-DS} та T_{I-DJ} ;
- підзадачі керування інформаційними потоками, які циркулюють при підводному русі катера «під шноркелем» T_{I-US} та на робочій глибині T_{I-UJ} ;

– підзадачі керування інформаційними потоками, які циркулюють при спливанні катера T_{I-E} .

Розглянемо особливості розв'язку цих підзадач більш детально.

Підзадача T_{I-S} керування інформаційними потоками, які циркулюють при надводному русі катера, має чотири основні складові:

– керування інформаційними потоками T_{I-S-N} навігаційного забезпечення надводного руху катера (отримання, обробка і формування вихідної навігаційної інформації, необхідної для забезпечення безпечного надводного руху катера);

– керування інформаційними потоками T_{I-S-E} виконавчих механізмів катера, які забезпечують його надводний рух (керування рушієм та рульовим пристроєм, а також керування допоміжними механізмами, які забезпечують функціонування цих виконавчих механізмів);

– керування інформаційними потоками T_{I-S-A} допоміжних механізмів катера, які задіяні у режимі його надводного руху (керування електроприводами насосів, вентиляторів, клапанів допоміжних механізмів катера тощо);

– керування інформаційними потоками T_{I-S-C} системи радіо- та супутникового зв'язку з береговим центром керування.

Підзадача $T_{I-D}=\{T_{I-DS}; T_{I-DJ}\}$ керування інформаційними потоками, які циркулюють при зануренні катера, має наступні основні складові:

– керування процесами збору інформації T_{I-D-MS} та T_{I-D-MJ} від сенсорів виконавчих механізмів катера, яка необхідна для реалізації режимів підготовки до занурення та, власне, реалізації процесу занурення, відповідно, на глибину роботи «під шноркелем» та на робочу глибину;

– керування процесами збору інформації T_{I-D-CS} та T_{I-D-CJ} від сенсорів поточного просторового стану катера (кути Ейлера, глибина занурення тощо), яка необхідна для реалізації режимів занурення, відповідно, на глибину роботи «під шноркелем» та на робочу глибину.

Підзадача $T_{I-U}=\{T_{I-US}; T_{I-UJ}\}$ керування інформаційними потоками, які циркулюють при підводному русі катера, відповідно, «під шноркелем» та на робочій глибині, має чотири основні складові:

– керування інформаційними потоками T_{I-U-NS} та T_{I-U-NJ} навігаційного забезпечення підводного руху катера (отримання, обробка і формування вихідної навігаційної інформації, необхідної для його безпечного, відповідно, підповерхневого руху «під шноркелем» та підводного руху на робочій глибині);

– керування інформаційними потоками T_{I-U-ES} та T_{I-U-EJ} виконавчих механізмів катера, які забезпечують функціонування цих виконавчих механізмів (керування джерелами енергії, рушієм та рульовим пристроєм) під час, відповідно, його підповерхневого руху «під шноркелем» та підводного руху на робочій глибині);

– керування інформаційними потоками T_{I-U-AS} та T_{I-U-AJ} допоміжних механізмів катера, які задіяні у режимі його підводного руху («під шноркелем» та на робочій глибині) – керування електроприводами насосів, клапанів баластних цистерн та допоміжних механізмів катера тощо;

– керування інформаційними потоками T_{I-U-CS} системи радіо- та супутникового зв'язку з береговим центром керування при русі БНПК «під шноркелем» та керування інформаційними потоками T_{I-U-CJ} при підводному русі на робочій глибині.

Нарешті, підзадача T_{I-E} керування інформаційними потоками, які циркулюють при спливанні катера, має наступні основні складові:

– керування процесами збору інформації T_{I-E-M} від сенсорів виконавчих механізмів катера, які необхідні для реалізації режимів підготовки до спливання та, власне, реалізації процесу спливання;

– керування процесами збору інформації T_{I-E-C} від сенсорів поточного просторового стану катера (кути Ейлера, глибина занурення) катера при його спливанні.

Таким чином, задачу T_I можна представити у складі наступних підзадач:

$$T_I = \{T_{I-S}; T_{I-DS}; T_{I-DJ}; T_{I-US}; T_{I-UJ}; T_{I-E}\}. \quad (4)$$

де

$$T_{I-S} = \{T_{I-S-N}; T_{I-S-E}; T_{I-S-A}; T_{I-S-C}\}; \quad (5)$$

$$T_{I-DS} = \{T_{I-D-MS}; T_{I-D-CS}\}; \quad (6)$$

$$T_{I-DJ} = \{T_{I-D-MJ}; T_{I-D-CJ}\}; \quad (7)$$

$$T_{I-US} = \{T_{I-U-NS}; T_{I-U-ES}; T_{I-U-AS}; T_{I-U-CS}\}; \quad (8)$$

$$T_{I-UJ} = \{T_{I-U-NJ}; T_{I-U-EJ}; T_{I-U-AJ}; T_{I-U-CJ}\}; \quad (9)$$

$$T_{I-D} = \{T_{I-D-M}; T_{I-D-C}\}; \quad (10)$$

$$T_{I-U} = \{T_{I-U-N}; T_{I-U-E}; T_{I-U-A}; T_{I-U-C}\}; \quad (11)$$

$$T_{I-E} = \{T_{I-E-M}; T_{I-E-C}\}. \quad (12)$$

Аналіз задачі T_F , яка розглядає керування морською місією катера у цілому, дає змогу визначити дві основні підзадачі керування БНПК [16]:

- керування процесом розробки стратегії T_{F-S} виконання заданої місії БНПК;
- керування тактикою T_{F-T} виконання катером заданої місії.

Перша підзадача T_{F-S} включає наступні складові:

- керування процесом декомпозиції T_{F-S-D} заданої місії на окремі операції та формулюванням кінцевої мети кожної операції;
- керування процесом T_{F-S-L} оцінки зовнішніх (гідрометеорологічних, навігаційних та ін.) та внутрішніх (поточного технічного стану бортових систем та виконавчих механізмів) обмежень.

Друга підзадача T_{F-T} містить наступні складові:

- керування процесом T_{F-T-V} пошуку прийнятних варіантів досягнення кінцевої мети кожної операції;
- керування процесом T_{F-T-O} вибору оптимальних виконавчих (тактичних) варіантів досягнення кінцевої мети кожної операції.

Тоді задачу T_F можна представити у складі наступних підзадач:

$$T_A = \{T_{F-S}; T_{F-T}\}, \quad (13)$$

де

$$T_{F-S} = \{T_{F-S-D}; T_{F-S-L}\}; \quad (14)$$

$$T_{F-T} = \{T_{F-T-V}; T_{F-T-O}\}. \quad (15)$$

Залежності (1)–(15) утворюють базовий перелік задач синтезу системи керування БНПК, який сформовано з урахуванням специфіки його функціонування як об'єкта керування.

Розглянемо тепер узагальнену структуру системи автоматичного керування однією з ключових систем БНПК – системою подачі повітря до теплового двигуна катера при його русі «під шноркелем» та при русі на робочій глибині.

Зазначимо, що у сучасній науковій літературі відомості про побудову шноркелів автономних ненаселених підводних апаратів та про синтез систем автоматичного керування ними практично відсутні. Однак очевидно, що створення таких систем є перспективною задачею для вітчизняної галузі морської робототехніки. Тому у цій роботі пропонується базова структура шноркеля як об'єкта автоматичного керування, для якої необхідно синтезувати узагальнені алгоритми автоматичного керування для основних робочих режимах БНПК.

Пропонується наступна базова структура шноркеля як об'єкта керування, яка містить наступні механізми (рис. 2):

- підйомна щогла шноркеля 1 у складі труби 2 для забору атмосферного повітря (пунктирна стрілка) з запірним клапаном 3 захисту труби 2 від хвиль, труби 4 для відведення вихлопних газів (пунктирна стрілка) з запірним клапаном 5 захисту труби 4 від хвиль, а також приводів 6 підйому-опускання щогли 1;
- насосу з приводом 7 для дренажу морської води (неперервна стрілка) труби 2;
- системи фільтрів води 8 труби 2 з ємністю 9 для води з системи фільтрів 8, насосом 10 для дренажу води з ємності 9 та запірним клапаном 11 для скидання води (неперервна стрілка) з системи фільтрів 8;
- компресора 12 з приводним електродвигуном 13 для нагнітання повітря у ресивер 14 до теплового двигуна 15 катера (наприклад дизель-генератора), вихлопні гази з якого надходять до труби 4;
- клапани 16 і 17 системи 18 гідростатичного розвантаження труб 2 і 4; робота системи 18 необхідна при зануренні БНПК на робочу глибину, коли зовнішній гідродинамічний тиск без компенсації зсередини може зруйнувати труби 2 і 4.

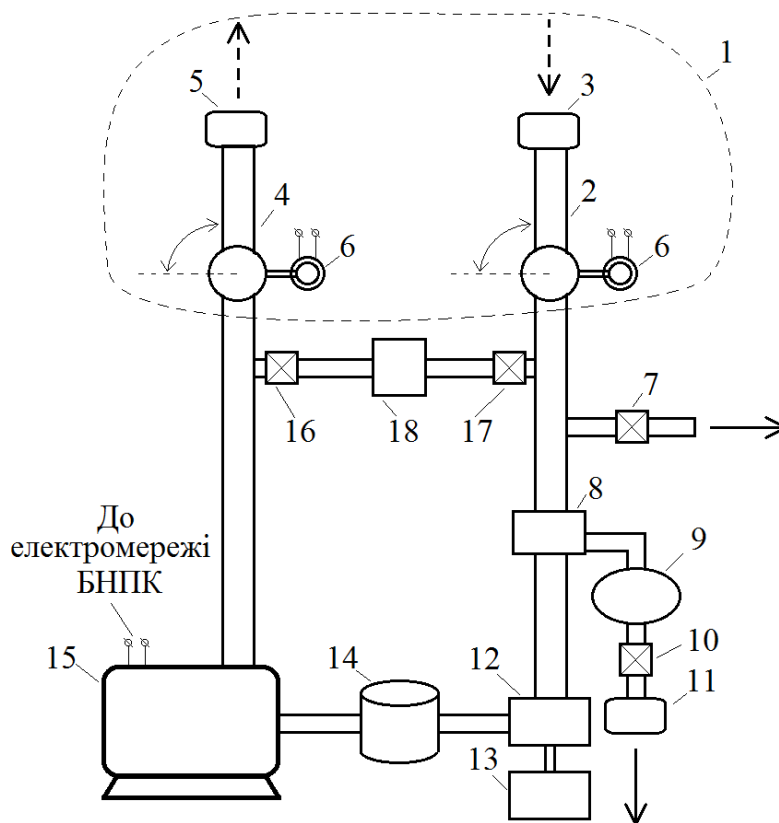


Рисунок 2 – Базова структура шноркеля БНПК як об'єкта керування

Таким чином, з позицій автоматизації керування таким технічним об'єктом його виконавчими механізмами є клапани 3, 5, 11, 16 та 17, а також приводи 6, 7, 10 та 13.

Очевидно, що задача керування шноркелем є невід'ємною складовою генеральної множини T_{USUB} задач синтезу систем керування БНПК згідно (1) і входить до складу задач T_{E-DS} , T_{E-US} , T_{I-DS} та T_{I-US} згідно (3) і (4).

У якості прикладу алгоритмізації задачі керування енергетичною системою катера T_E згідно (1) розглянемо підзадачу T_{M-DS} керування зануренням катера на глибину роботи «під шноркелем». Метою керування вважаємо перехід БНПК на рух «під шноркелем», тобто реалізацію задач T_{E-DS} та T_{I-DS} , які мають виконуватись одночасно.

Вважаємо, що у початковому стані БНПК рухався у надводному положенні, а його рушійний комплекс отримував живлення від бортової акумуляторної батареї.

Розробку узагальненої структури системи автоматичного керування виконаємо у вигляді послідовності підпрограм (П) керування окремими виконавчими механізмами шноркеля:

- П1 – підпрограма керування приводами 6, які виконують підйом щогли 1 шноркеля;
- П2 – підпрограма відкриття клапанів 3, 5 і 11;
- П3 – підпрограма включення насосів 7 і 10;
- П4 – підпрограма включення приводного електродвигуна 13 компресора 12;
- П5 – підпрограма запуску теплового двигуна БНПК;
- П6 – підпрограма контролю параметрів виконавчих механізмів шноркеля та якості електроенергії дизель-генератора;
- П7 – підпрограма підключення дизель-генератора до бортової електромережі БНПК з метою забезпечення процесу заряджання його акумуляторної батареї;
- П8 – підпрограма переведення БНПК до режиму руху «під шноркелем».

Основні результати та їх обговорення. У результаті проведених досліджень показана доцільність та перспективність застосування безекіпажних надводно-підводних катерів для розв'язку широкого кола транспортних задач на морі.

Зокрема, доповнена відома класифікація засобів морської робототехніки, у результаті чого введено новий тип такої техніки – надводно-підводні засоби малого і середнього типу (за масою), які віднесено до категорії забезпечення та підтримки. Одночасно, вказаний вид засобів морської робототехніки пропонується поширити, крім транспортного класу, на класи пошуково-рятувальні, гідрографічні, природоохоронні, навігаційного забезпечення, ретранслятори.

Встановлено особливості автоматичного керування такими катерами, які обумовлені можливостями їх надводного і підводного керування руху, що дало змогу сформулювати генеральну множину задач синтезу систем їх автоматичного керування та множини підзадач керування просторовим рухом катера у двох середовищах, керування енергетичною та інформаційною системами катера, а також керування морською місією катера у цілому.

У якості прикладу алгоритмічної реалізації множини підзадач наведено узагальнену структуру системи автоматичного керування однією з ключових систем катера – системою подачі повітря до теплового двигуна катера при його підводному русі (режим роботи «під шноркелем»). Одночасно запропоновано базову структуру шноркеля як об'єкта керування, яка може слугувати основою для проектування нового для малорозмірних суден типу систем енергозабезпечення.

Висновки.

1. Доповнено чинну класифікацію морських безекіпажних апаратів шляхом внесення до неї безекіпажних надводно-підводних катерів, що удосконалює науково-методичне підґрунтя для їх створення.

2. Сформовано генеральну множину задач синтезу систем автоматичного керування безекіпажними надводно-підводними катерами транспортного призначення та систему множин підзадач автоматичного керування їх просторовим рухом, енергетичною та інформаційною системами катера, а також керування процесами планування і виконання морською місією катера у цілому. Отримані результати утворюють теоретичне підґрунтя для системної розробки алгоритмічного і програмного забезпечення систем керування такими об'єктами морської робототехніки.

3. Розроблено базову структуру обладнання однієї з ключових систем енергетики надводно-підводного катера – системи «шноркеля» для подачі повітря до теплового двигуна катера при підводному русі, а також розроблено узагальнену структуру системи автоматичного керування такою системою енергетики. Отримані результати утворюють теоретичну основу для синтезу систем автоматичного керування енергетичним обладнанням надводно-підводного катера.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно продовжувати у двох напрямках – синтез алгоритмічного забезпечення систем керування безекіпажним надводним катером як новим засобом морської робототехніки та розробка нових і вдосконалення наявних систем енергетики такого катера як об'єкта автоматичного керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang Guo, Song Wang, Wenqiang Dun. The Design of a Control System for an Unmanned Surface Vehicle. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 2015. 7(1). Pp. 150–156. <https://doi.org/10.2174/1874444301507010150>. https://www.researchgate.net/publication/27523_0076_The_Design_of_a_Control_System_for_an_Unmanned_Surface_Vehicle.
2. Marine Control Systems for USV, UUV, ROV. Overview. *Technology Editor*. 2023. <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/marine-control-systems/>.
3. Hyunjoon Cho, Sang-Ki Jeong, Dae-Hyeong Ji, Ngoc-Huy Tran, Mai The Vu, Hyeung-Sik Choi. Study on Control System of Integrated Unmanned Surface Vehicle and Underwater Vehicle. *Sensors*, 2020. 20(9), 2633; <https://doi.org/10.3390/s20092633>.
4. Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research*, 2019. 26(101). Pp. 30–39. <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0004>. https://www.researchgate.net/publication/331988419_Universal_Autonomous_Control_and_Management_System_for_Multipurpose_Unmanned_Surface_Vessel.
5. Fernando Sotelo-Torres, Laura V. Alvarez and Robert C. Roberts. An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys. *Sensors* 2023, 23, 4420. <https://doi.org/10.3390/s23094420>.
6. Xiangen Bai, Bohan Li, Xiaofeng Xu, Yingjie Xiao. A Review of Current Research and Advances in Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Marine Science and Application*. 21, 47–58 (2022). <https://doi.org/10.1007>.
7. Innespace Seabreacher. https://en.wikipedia.org/wiki/Innespace_Seabreacher.
8. Semi-submersible Jet Shark takes multiple passengers on a thrill ride. <https://www.startupselfie.net/2023/02/08/jet-shark-semi-submersible-multiple-passengers-thrill-ride/>.
9. DRIX SERIES UNCREWED SURFACE VEHICLES. <https://www.ixblue.com/wp-content/uploads/2023/03/brochuredrix-series-webcompressed.pdf>.
10. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress. 2023. <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45757.pdf>.
11. У світі є 134 типи морських дронів, то чим особливі наші катери-камікадзе. https://defence-ua.com/weapon_and_tech/u_sviti_je_134_tipi_morskih_droniv_to_chim_osoblivi_nashi_kateri_kamikadze-12842.html.
12. Доктрина Військово-Морських Сил Збройних Сил України. ВКП 7(3)-00(13).01. Затверджена Головнокомандувачем Збройних Сил України 19.01.2021 р. https://ivms.mil.gov.ua/wp-content/uploads/2021/12/doktryna_vijskovo-morski-syly-zbrojnyh-syl-ukrayiny.pdf.
13. Тимчасова класифікація морських безекіпажних апаратів (систем, комплексів) у Військово-Морських Силах Збройних Сил України, які приймаються чи є на озброєнні Військово-Морських Сил Збройних Сил України. Затверджено Наказом командира військової частини А0456 10.05.2023 р., №73.
14. Курдюк С. В., Гаврилюк Т. К., Соколик Я. М., Джежулей О. В. Особливості класифікації морських безекіпажних підводних апаратів у Військово-Морських Силах Збройних Сил України. *Випробування та сертифікація*, 2023. № 2(2). С. 30–36. <https://doi.org/10.37701/ts.02.2023.04>.

15. Pahl G., Beitz W., Feldhusen J., Grote K. H. Engineering Design: A Systematic Approach. Third Edition. *Springer*. 2006. <https://www.amazon.co.uk/Engineering-Design-Systematic-Approach-Pahl/dp/1846283183>.

16. Блінцов В. С., Соколов В. В. Сучасні задачі автоматизації керування безкіпажним надводним катером. *Автоматика-2016: Матеріали XXIII міжнародної конференції з автоматичного управління, м. Суми, 22–23 вересня 2016 року*. Суми : Сумський державний університет. С. 201–202.

17. Military Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) Market Research Report Provides thorough Industry Overview, which offers an In-Depth. <https://www.linkedin.com/pulse/military-electronic-chart-display-information-system-ecdis-jhpvc/>.

18. Toru Katayama, Koji Suzuki. A NEW SHIP MOTION CONTROL SYSTEM FOR HIGH-SPEED CRAFT. *FAST2003: Proceedings of 7th International Fast Sea Transportation*, Vol. 3. 7th–10th October, 2003, Ischia Italy. 9 Papers. https://www.researchgate.net/publication/318418286_A_NEW_SHIP_MOTION_CONTROL_SYSTEM_FOR_HIGH-SPEED_CRAFT.

19. Kantubhukta Dinesh, Joddumahanthi Vijaychandra, Seshasai Brundavanam, Kakinada Vedaprakash. A Review on Control of the Underwater Vehicles. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, 2021. Volume 05, Issue 05. 6 pages. https://www.researchgate.net/publication/351371540_A_Review_on_Control_of_the_Underwater_Vehicles.

20. Fan Gao, Astrid H. Brodtkorb, Mehdi Zadeh, Sigrid Marie Mo. Power management and optimization of marine hybrid propulsion systems: A combinator surface methodology. *Ocean Engineering*, Volume 309, Part 2, 2024, 118354. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118354>.

21. Albert M. Bradley, M. D. Feezor, Hanumant Singh, F. Yates Sorrell. Power systems for autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, November 2001. 26(4). Papers 526 – 538. <https://doi.org/10.1109/48.972089>.

REFERENCES

1. Wang, Guo, Song, Wang, Wenqiang, Dun (2015). The Design of a Control System for an Unmanned Surface Vehicle. *The Open Automation and Control Systems Journal*, 7(1). Pp. 150–156. <https://doi.org/10.2174/1874444301507010150>. https://www.researchgate.net/publication/275230076_The_Design_of_a_Control_System_for_an_Unmanned_Surface_Vehicle.

2. Marine Control Systems for USV, UUV, ROV. Overview (2023). *Technology Editor*. <https://www.unmannedsystemstechnology.com/expo/marine-control-systems/>.

3. Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel (2019). *Polish Maritime Research*, 26(101). Pp. 30–39. <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0004>. https://www.researchgate.net/publication/331988419_Universal_Autonomous_Control_and_Management_System_for_Multipurpose_Unmanned_Surface_Vessel.

4. Hyunjoon Cho, Sang-Ki Jeong, Dae-Hyeong Ji, Ngoc-Huy Tran, Mai The Vu, Hyeung-Sik Choi (2020). Study on Control System of Integrated Unmanned Surface Vehicle and Underwater Vehicle. *Sensors*, 20(9), 2633; <https://doi.org/10.3390/s20092633>.

5. Fernando Sotelo-Torres, Laura V. Alvarez and Robert C. Roberts (2023). An Unmanned Surface Vehicle (USV): Development of an Autonomous Boat with a Sensor Integration System for Bathymetric Surveys. *Sensors*, 23, 4420. <https://doi.org/10.3390/s23094420>.

6. Xiangen Bai, Bohan Li, Xiaofeng Xu, Yingjie Xiao (2022). A Review of Current Research and Advances in Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Marine Science and Application*. 21, 47–58. <https://doi.org/10.1007>.

7. Innespace Seabreacher. https://en.wikipedia.org/wiki/Innespace_Seabreacher.

8. Semi-submersible Jet Shark takes multiple passengers on a thrill ride. <https://www.startupselfie.net/2023/02/08/jet-shark-semi-submersible-multiple-passengers-thrill-ride/>.

9. DRIX SERIES UNCREWED SURFACE VEHICLES. <https://www.ixblue.com/wp-content/uploads/2023/03/brochuredrix-series-webcompressed.pdf>.
10. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress (2023). <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45757.pdf>.
11. U sviti ye 134 typu morskykh droniv, to chym osoblyvi nashi kateri-kamikadze. https://defence-ua.com/weapon_and_tech/u_sviti_je_134_tipi_morskih_droniv_to_chim_osoblivi_nashi_kateri_kamikadze-12842.html.
12. Doktryna Viiskovo-Morskykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy. VKP 7(3)-00(13).01 (2021). Zatverdzhena Holovnokomanduvachem Zbroinykh Syl Ukrainy 19.01.2021 r. https://ivms.mil.gov.ua/wp-content/uploads/2021/12/doktryna_viiskovo-morski-syly-zbrojnyh-syl-ukrayiny.pdf.
13. Tymchasova klasyfikatsiia morskykh bezekipazhnykh aparativ (system, kompleksiv) u Viiskovo-Morskykh Sylakh Zbroinykh Syl Ukrainy, yaki pryimaiutsia chy ye na ozbroienni Viiskovo-Morskykh Syl Zbroinykh Syl Ukrainy (2023). Zatverdzheno Nakazom komandyrta viiskovoi chastyny A0456, 10.05.2023 r., №73.
14. Kurdiuk, S. V., Havryliuk, T. K., Sokolyk, Ya. M., Dzhzhulei, O. V. (2023). Osoblyvosti klasyfikatsii morskykh bezekipazhnykh pidvodnykh aparativ u Viiskovo-Morskykh Sylakh Zbroinykh Syl Ukrainy. *Vyprobuvannia ta sertyfikatsiia*, № 2(2). P. 30–36. <https://doi.org/10.37701/ts.02.2023.04>.
15. Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K. H. (2006). Engineering Design: A Systematic Approach. Third Edition. *Springer*. <https://www.amazon.co.uk/>. Engineering-Design-Systematic-Approach-Pahl/dp/1846283183.
16. Blintsov, V. S., Sokolov, V. V. (2016). Suchasni zadachi avtomatyzatsii keruvannia bezekipazhnym nadvodnym katerom. *Avtomatyka-2016: Materialy KhKhIII mizhnarodnoi konferentsii z avtomatychnoho upravlinnia, m. Sumy, 22–23 veresnia 2016 roku*. Sumy : *Sumskiy derzhavnyi universytet*. P. 201–202.
17. Military Electronic Chart Display and Information System (ECDIS) Market Research Report Provides thorough Industry Overview, which offers an In-Depth. <https://www.linkedin.com/pulse/military-electronic-chart-display-information-system-eccdis-jhpvc/>.
18. Toru Katayama, Koji Suzuki (2003). A NEW SHIP MOTION CONTROL SYSTEM FOR HIGH-SPEED CRAFT. *FAST2003: Proceedings of 7th International Fast Sea Transportation*, Vol. 3. 7th–10th October, 2003, Ischia Italy. 9 Papers. https://www.researchgate.net/publication/318418286_A_NEW_SHIP_MOTION_CONTROL_SYSTEM_FOR_HIGH-SPEED_CRAFT.
19. Kantubhukta Dinesh, Joddumahanthi Vijaychandra, Seshasai Brundavanam, Kakinada Vedaprakash (2021). A Review on Control of the Underwater Vehicles. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management (IJSREM)*, Volume 05, Issue 05. 6 pages. https://www.researchgate.net/publication/351371540_A_Review_on_Control_of_the_Underwater_Vehicles.
20. Fan Gao, Astrid H. Brodtkorb, Mehdi Zadeh, Sigrid Marie Mo (2024). Power management and optimization of marine hybrid propulsion systems: A combinator surface methodology. *Ocean Engineering*, Volume 309, Part 2, 2024, 118354. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118354>.
21. Albert M. Bradley, M. D. Feezor, Hanumant Singh, F. Yates Sorrell (2001). Power systems for autonomous underwater vehicles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, November. 26(4). Papers 526–538. <https://doi.org/10.1109/48.972089>.

Burunin A. P. FEATURES OF AUTOMATION OF UNMANNED SURFACE-UNDERWATER BOAT OF TRANSPORT TYPE

The purpose of the work is to supplement the existing classification of marine unmanned vehicles by introducing unmanned surface-underwater boats into it, to determine their main features as objects of automatic control and to form a general set of tasks for the synthesis of automated and automatically controlled systems, as well as to develop a generalized structure of the automatic control system for one of the key systems of an unmanned surface-underwater boat – the air supply system to the boat's thermal engine during its underwater movement. To achieve this goal, the hierarchical classification method was used to supplement the existing classification of marine unmanned vehicles, and the system approach method was used to formulate tasks for the synthesis of control systems for such boats. The result of the study is the addition of the classification of marine unmanned vehicles, which includes a new type of marine unmanned vehicles, as well as their division into types, categories and classes according to their purpose. It is shown that when developing the structure of the automatic control system for an unmanned surface-underwater boat, it is advisable to divide it into executive, program, adaptive, tactical and strategic levels. A general set of tasks for the synthesis of the control system for unmanned surface-underwater boats is proposed, consisting of the task of controlling the spatial movement of the boat as a solid body that can move on the sea surface and under water, the task of controlling the boat's energy system, the task of controlling the boat's information system and the task of controlling the boat's sea mission as a whole. For each task, a list of functional subtasks has been developed that cover the main processes of boat automation. Taken together, the developed list of tasks forms a scientific and technical basis for the development of automated and automatic boat control systems in all basic modes of its use as a means of transport. The scientific novelty is formed by the improved classification of marine unmanned vehicles, the first proposed general set and components of the synthesis problems of automatic control systems for a marine surface-underwater boat. The practical significance of the research lies in the scientific structuring of design work on the creation of a new type of marine robotics, which makes it possible to systematically carry out further design work on the development of automatic control systems for an unmanned surface-underwater boat.

Key words: *unmanned surface-underwater boat; classification; control system synthesis.*

© Бурунін А. П.

Статтю прийнято до редакції 05.12.2024

СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗЕКІПАЖНОГО КАТЕРА ЯК СКЛАДОВА ЙОГО СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Войтасик А. М., к.т.н., доцент кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: andrii.voitasyk@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9409-6108;

Костенко Д. В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри електричної інженерії суднових та роботизованих комплексів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: dmi.kostenko@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2251-6932;

Сірівчук А. С., к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: sirivchuka@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2927-2600.

Розроблено структуру та принципи роботи системи вимірювання динамічних параметрів руху безекіпажного надводного катера, яка входить до складу його системи автоматичного керування для забезпечення ефективного маневрування та виконання операцій у морському середовищі. Систему вимірювання динамічних характеристик реалізовано за допомогою єдиного модуля сенсорів, що включає трьохосові акселерометри, магнітометри, гіроскопи та GPS-приймач. Для обробки даних застосовуються медіанні фільтри для зменшення шуму, алгоритм Маджвіка для підвищення точності визначення кутового положення та метод Адамса для розрахунку лінійних прискорень через інтегрування. Всі процеси обробки та візуалізації реалізовані у програмному середовищі MATLAB Simulink із використанням UDP-протоколу передачі даних. Запропонована система вимірювання динамічних характеристик здатна забезпечити визначення основних параметрів руху безекіпажного надводного катера в режимі реального часу. Система дозволяє оптимізувати роботу автоматичного керування безекіпажного надводного катера, підлаштовуючи його до умов експлуатації та гарантувати об'єднану роботу з іншими підсистемами. Розроблена система вперше реалізує інтегроване рішення для вимірювання динамічних параметрів безекіпажного надводного катера на базі компактного модуля сенсорів. Інформаційна обробка здійснюється за допомогою алгоритмів, що забезпечують високу точність вимірювань та мінімізацію помилок, викликаних зовнішніми впливами. Система вимірювання динамічних характеристик є основою для створення автоматизованих безекіпажних катерів, що можуть виконувати широкий спектр завдань, зокрема патрулювання, моніторинг та оперативне реагування. Її використання знижує витрати на експлуатацію та підвищує ефективність морських операцій. Основними її відмінностями є особливості схемотехнічної реалізації, форма інформаційного представлення засобами програмного середовища MATLAB Simulink та менша собівартість виробництва чинного зразка у порівнянні зі світовими аналогами.

Ключові слова: безекіпажний надводний катер; система автоматичного керування; динамічні характеристики; сенсор.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.049-057

Вступ. Розвиток безекіпажних надводних катерів (БНК, в англійській літературі – Unmanned surface vessels, USV) є одним із пріоритетних напрямів сучасної морської робототехніки, з огляду на їхній потенціал для виконання різноманітних завдань в умовах високого ризику [1, 2]. БНК знаходять застосування у сфері охорони об'єктів морської критичної інфраструктури, моніторингу навколишнього середовища, виконання наукових досліджень та у військовій галузі. Ефективність виконання місій БНК значною мірою залежить від точності його систем автоматичного керування (САК), які забезпечують автономну навігацію, стійкість та виконання заданих маневрів [3].

Одним із важливих компонентів САК БНК є система вимірювання динамічних характеристик, яка дозволяє оцінювати параметри руху БНК у реальному часі та адаптувати керування до змін зовнішніх умов. Висока динамічність руху, вплив хвилювання моря, змінні вітрові та течійні навантаження потребують застосування високоточних і

швидкодійних вимірювальних систем, здатних надавати інформацію з різноманітних сенсорів [4, 5].

Постановка проблеми. Сучасні виклики, пов'язані з забезпеченням безпеки та виконанням завдань в акваторіях з підвищеним ризиком, вимагають широкого впровадження БНК у складі морських систем. Основним фактором, що впливає на ефективність їхньої експлуатації, є надійність САК, яка дозволяє гарантувати автономну навігацію, точну роботу у різноманітних умовах, а також підлаштування до змінних зовнішніх факторів. Для підвищення функціональних можливостей БНК необхідно створити ефективну систему вимірювання динамічних характеристик, яка забезпечувала б точну оцінку параметрів руху в реальному часі. Зокрема, виникає потреба в аналізі поступальних і кутових швидкостей, лінійних і кутових прискорень, а також кутового положення корпусу катера з урахуванням впливу хвиль, вітру та течій. Дані параметри важливі для корекції траєкторії та забезпечення стійкості руху БНК. Особливої актуальності це завдання набуває в умовах, коли БНК експлуатується в режимі автономного патрулювання, виконання рятувальних чи дослідницьких операцій, а також для забезпечення охорони критичних об'єктів морської інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасній морській робототехніці для визначення динамічних параметрів руху БНК активно застосовують інерціальні навігаційні системи (ІНС), які базуються на використанні лазерних або волоконно-оптичних гіроскопів [6, 7]. Вироби, такі як серії «БІНС-500», забезпечують визначення параметрів курсу, крену, диференту, а також кутових і лінійних прискорень, але їх вартість і складність інтеграції можуть бути обмежувальними факторами [8, 9]. Серед наявних пристроїв для визначення параметрів руху БНК можна виділити прийомні індикатори глобальної навігаційної супутникової системи, такі як «РК-2106», які забезпечують функції визначення координат і швидкості руху [10].

З метою підвищення точності та автономності САК використовуються супутникові компаси, наприклад, «Furuno» або «Koden», які доповнюють дані Global Positioning System (GPS) координатами та швидкісними параметрами руху [11, 12]. Однак їхня частота оновлення (10–30 Гц) є недостатньою для аналізу високочастотних коливань, що впливають на систему кріплення обладнання.

Сучасні аналоги, такі як пристрої компанії «Sitex», забезпечують точні вимірювання з використанням GPS, але мають обмеження у доступі до первинних даних сенсорів через стандартизовані протоколи NMEA. Це, у свою чергу, ускладнює їх використання для задач, що потребують підлаштування до специфічних умов експлуатації БНК [13, 14, 15]. Отож, виникає потреба у розробці об'єднаної системи, яка поєднувала б високу частоту оновлення сигналу, доступ до первинних даних сенсорів і здатність адаптуватися до вимог САК БНК.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка структури та принципів функціонування системи вимірювання динамічних характеристик руху, які мають входити до складу САК БНК.

Виклад основного матеріалу. Вимірювання динамічних характеристик безекіпажного катера здійснюється за допомогою спеціалізованого модуля, що містить інтегровані сенсори, які включають акселерометр, магнітометр і гіроскоп. Дані сенсори дозволяють отримувати точні дані про рух катера в різних напрямках, забезпечуючи необхідну інформацію для аналізу його поведінки в умовах реального часу. Окрім того, модуль оснащений GPS-приймачем, що дає змогу не лише точно визначити географічні координати катера, але й синхронізувати вимірювання з точним часом, що є надзвичайно важливим для детального аналізу його руху та ефективного контролю за операціями, які виконуються безекіпажним катером. Завдяки цьому, даний модуль дозволяє здійснювати високоточне спостереження та управління навіть за складних умов, коли необхідно отримувати й обробляти дані в реальному часі [16, 17].

Модуль із сенсорами розроблений з урахуванням специфічних вимог експлуатації безекіпажних катерів в умовах різних кліматичних і погодних ситуацій, що вимагає високої

надійності та стійкості до зовнішніх впливів. Для забезпечення такого рівня захисту, модуль має клас захисту IP67, що гарантує його працездатність у складних умовах морського середовища. Даний клас захисту дозволяє ефективно використовувати пристрій на катерах, які працюють в умовах хвилювання моря до 3–5 балів, а також при потраплянні бризок чи хвиль на корпус катера, що може статися під час руху або внаслідок змін погодних умов. Модуль із сенсорами включає кілька ключових компонентів, що забезпечують точне і стабільне вимірювання різноманітних динамічних характеристик катера. До його складу входять:

– GPS-приймач, який забезпечує визначення місця розташування катера, його швидкості та курсу;

– блок сенсорів руху, який включає:

а) 3-осьовий гіроскоп для вимірювання кутових швидкостей;

б) 3-осьовий акселерометр для оцінки лінійних прискорень;

в) 3-осьовий компас на базі сенсорів Холла, який забезпечує орієнтацію по курсу.

Всі сенсори, що використовуються в даному модулі, розташовані на одній мікросхемі, що має значні переваги у порівнянні з традиційними підходами, де кожен сенсор функціонує окремо. Така інтеграція усуває необхідність у корекції показників, які можуть виникнути через можливі помилки, що пов'язані з неспіввісним встановленням окремих сенсорів, а також з їхнім механічним або електричним взаємодіям. Коли сенсори розташовуються окремо, виникає ймовірність того, що незначні помилки у їхньому розташуванні можуть вплинути на точність отримуваних даних. Завдяки інтеграції всіх сенсорів в єдину мікросхему, забезпечується максимальна точність вимірювань, оскільки всі компоненти працюють як єдине ціле, що дозволяє значно знизити ймовірність помилок, які виникають через механічні похибки або несумісність між окремими елементами.

Система опитування сенсорів забезпечує постійний та безперервний збір даних про динамічні характеристики руху катера, що дозволяє в реальному часі здійснювати моніторинг його поведінки. Зібрані дані обробляються у режимі реального часу, після чого формуються пакети даних у форматі UDP (User Datagram Protocol), які готуються до подальшої передачі до САК. Таке рішення дозволяє забезпечити високошвидкісну передачу інформації, що необхідно для керування безкіпажними катерами, оскільки така передача здійснюється без затримок і дозволяє негайно реагувати на зміни в стані катера або його навколишньому середовищі. Формат UDP обраний завдяки своїй ефективності та низькій затримці і необхідний для оперативного прийняття рішень у системах керування безкіпажними катерами.

Основні технічні характеристики модуля наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Технічні характеристики модуля сенсорів

№	Найменування параметра	Значення
1	Напруга постійного живлення, В	12
2	Частота опитування даних, Гц	100
3	Протокол передачі даних	UDP (авторський)
4	Вимірювальні параметри	GPS 3-осьовий гіроскоп: ± 1000 °/с, 3-осьовий акселерометр: $\pm 8g$ 3-остовий компас на базі сенсорів Холла: ± 4800 мкТл
5	Клас захисту	IP67
6	Габаритні розміри, мм	Ø120x290
7	Маса, кг	2,21

Модуль сенсорів із представленими технічними характеристиками добре себе зарекомендував при проведенні експериментальних досліджень законів групового керування безекіпажним рухомих об'єктом як агентом групи [18]. При цьому, були проведені натурні випробування САК скоординованим спільним рухом двох безекіпажних рухомих об'єктів.

Для обробки даних, що надходять від блоку сенсорів, використовується спеціалізований бортовий обчислювальний модуль або персональний комп'ютер, на якому встановлене програмне забезпечення MATLAB Simulink (рис. 1). Однією з головних переваг використання даного програмного забезпечення є можливість застосовувати високопродуктивні алгоритми інтегрування та диференціювання, що дозволяють точно обчислювати важливі динамічні характеристики катера, такі як швидкість, прискорення, кути нахилу та інші параметри, необхідні для точного контролю за рухом катера.

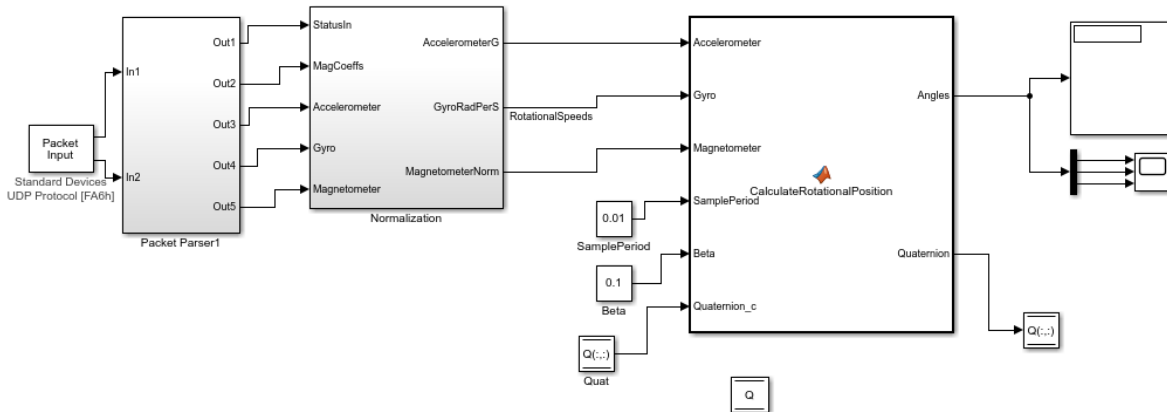


Рисунок 1 – Програма обробки даних

Основні компоненти системи обробки даних, що використовується для збору, аналізу та обробки інформації, отриманої від сенсорів безекіпажного катера, включають кілька основних компонентів, кожен з яких виконує свою функцію в процесі обробки сигналів і трансформації даних у зручний для подальшого аналізу вигляд. Система обробки даних побудована на платформі MATLAB Simulink дозволяє легко налаштовувати та модифікувати кожен етап обробки залежно від потреб конкретного застосування.

Основні компоненти системи обробки даних включають:

- блок Packet Input – стандартний блок середовища Simulink, який відповідає за отримання даних через мережевий протокол UDP. Такий протокол використовується для передачі даних у реальному часі з мінімальними затримками для систем безекіпажних катерів, де кожна мілісекунда може впливати на ефективність керування. Блок Packet Input забезпечує безперервне та стабільне отримання даних від сенсорів гарантуючи безперервний потік інформації для подальшої обробки. Даний блок важливий для того, щоб всі отримані пакети були своєчасно доставлені до наступних компонентів системи для обробки та аналізу.

- підсистему Packet Parser, яка відповідає за перетворення отриманих пакетів байт, що надходять через протокол UDP, у числові значення вимірних параметрів. Важливо, що отримані дані у вигляді пакетів байт не є безпосередньо придатними для подальшого аналізу, тому цей блок займається їх інтерпретацією та перетворенням у відповідні фізичні величини, які відображають стан катера. Наприклад, це можуть бути параметри руху, такі як швидкість, прискорення, кути нахилу, чи інші характеристики, які необхідно оцінити для контролю за рухом катера. Підсистема забезпечує надійну обробку вхідних даних, коректно інтерпретуючи їх у реальний час, що дає змогу динамічно реагувати на зміни в русі катера.

- блок Normalization (рис. 2) відповідає за приведення отриманих даних до фізичних величин. Враховуючи, що сенсори можуть надавати сигнали, які потребують коригування, блок Normalization виконує декілька важливих функцій. Зокрема, він забезпечує калібрування сигналів, що дозволяє враховувати можливі відхилення або похибки в вимірюваних значеннях, зокрема ті, що можуть бути зумовлені неідеальними умовами

експлуатації. У даному блоці StatusIn – визначає швидкість роботи АЦП гіроскопа та надає відповідний множник даних; X, G_Off, MagCoeffs – матриця корекції даних акселерометра, гіроскопа та магнітометра (визначаються експериментально [19]);

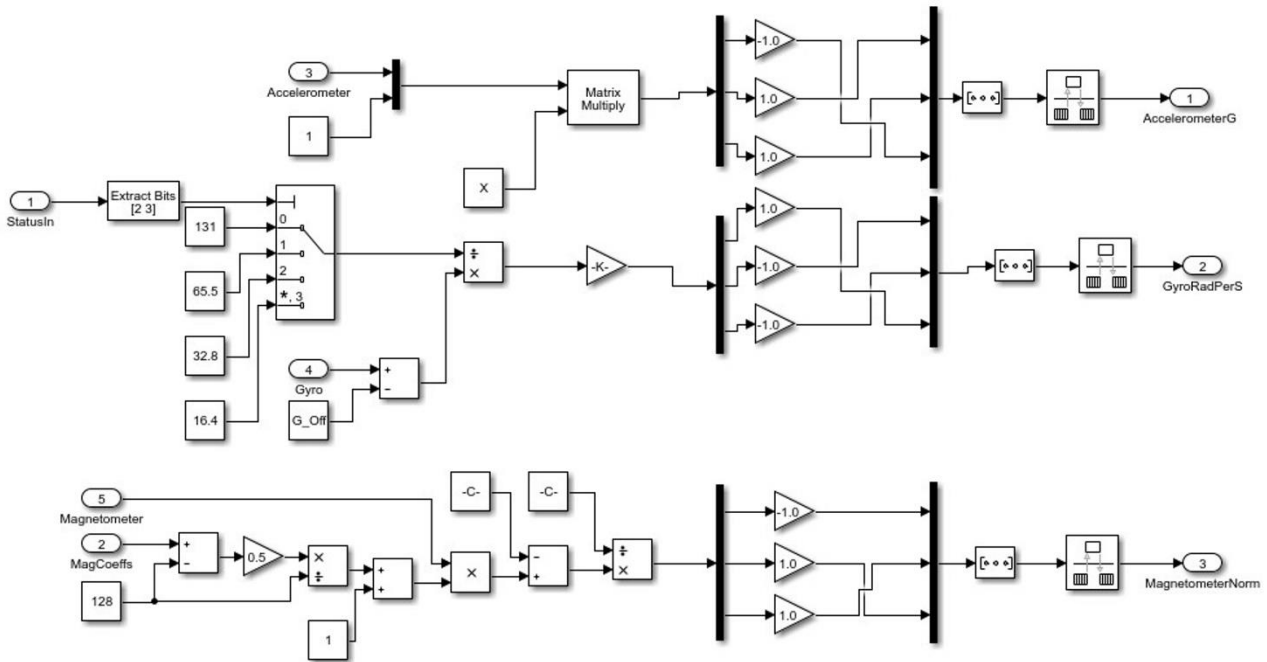


Рисунок 2 – Структура блоку Normalization

Реальні сенсори, які використовуються у складі цієї системи, завжди потребують регулярної корекції та фільтрації сигналів для зменшення впливу шумів і похибок вимірювання [20, 21]. Важливо зазначити, що сенсори можуть мати різний рівень точності, і залежно від типу сенсора, погрешності можуть виникати через зовнішні фактори або внаслідок самого процесу вимірювання. Наприклад, температурні коливання, зміни вологості, механічні вібрації або електричні перешкоди можуть спотворювати показники сенсорів.

Функція CalculateRotationalPosition проводить розрахунок кутів повороту вимірювального пристрою. Розрахунок кутів повороту проводиться у вигляді кватерніонів q, що забезпечує більш точне визначення вихідних кутів. Код розрахунку представлений нижче:

```
function [Angles, Quaternion] = CalculateRotationalPosition(Accelerometer, Gyro, Magnetometer, SamplePeriod, Beta, Quaternion_c)
Angles = [0 0 0];
q = Quaternion_c; % short name local variable for readability
% Reference direction of Earth's magnetic feild
h = quaternProd(q, quaternProd([0 Magnetometer], quaternConj(q)));
b = [0 norm([h(2) h(3)]) 0 h(4)];
% Gradient decent algorithm corrective step
F = [2*(q(2)*q(4) - q(1)*q(3)) - Accelerometer(1)
2*(q(1)*q(2) + q(3)*q(4)) - Accelerometer(2)
2*(0.5 - q(2)^2 - q(3)^2) - Accelerometer(3)
2*b(2)*(0.5 - q(3)^2 - q(4)^2) + 2*b(4)*(q(2)*q(4) - q(1)*q(3)) - Magnetometer(1)
2*b(2)*(q(2)*q(3) - q(1)*q(4)) + 2*b(4)*(q(1)*q(2) + q(3)*q(4)) - Magnetometer(2)
2*b(2)*(q(1)*q(3) + q(2)*q(4)) + 2*b(4)*(0.5 - q(2)^2 - q(3)^2) - Magnetometer(3)];
J = [-2*q(3), 2*q(4), -2*q(1), 2*q(2)
2*q(2), 2*q(1), 2*q(4), 2*q(3)
0, -4*q(2), -4*q(3), 0
-2*b(4)*q(3), 2*b(4)*q(4), -4*b(2)*q(3)-2*b(4)*q(1), -4*b(2)*q(4)+2*b(4)*q(2)
```

```

-2*b(2)*q(4)+2*b(4)*q(2), 2*b(2)*q(3)+2*b(4)*q(1), 2*b(2)*q(2)+2*b(4)*q(4),
-2*b(2)*q(1)+2*b(4)*q(3)
2*b(2)*q(3), 2*b(2)*q(4)-4*b(4)*q(2), 2*b(2)*q(1)-4*b(4)*q(3), 2*b(2)*q(2)];
step = (J*F);
step = step / norm(step); % normalise step magnitude
qDot = 0.5 * quaternProd(q, [0 Gyro(1) Gyro(2) Gyro(3)]) - Beta * step';
q = q + qDot * SamplePeriod;
Quaternion = q / norm(q); % normalise quaternion
Angles =quatern2euler(quaternConj(Quaternion)) * (180/pi);
End

```

У такому випадку функція quatern2euler розраховує формулу:

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{arctg} \left(\frac{2(q_3q_4 - q_1q_2)}{2q_1^2 - 1 + 2q_4^2} \right) \\ -\operatorname{arctg} \left(\frac{2(q_2q_4 + q_1q_3)}{\sqrt{1 - (2q_2q_4 + 2q_1q_3)^2}} \right) \\ \operatorname{arctg} \left(\frac{2(q_2q_3 - q_1q_4)}{2q_1^2 - 1 + 2q_2^2} \right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

де φ, θ, ψ – кут ристання, диферент та крен відповідно;
 $q_{1,2,3,4}$ – кватерніони, якими задано положення пристрою.

Однак при використанні магнітометра для визначення орієнтації катера потрібно враховувати певні фактори, які можуть впливати на точність вимірювань. Зокрема, магнітометр чутливий до зовнішніх впливів, таких як наявність магнітотвердих матеріалів у близькому оточенні сенсора. Такі матеріали можуть створювати локальні магнітні поля, що призводять до викривлення вимірювань та зниження точності визначення курсу.

Зібрані та збережені дані можуть бути інтегровані в САК для підвищення ефективності автономних операцій безекіпажного катера. Отож, можливо забезпечити достатній рівень автоматизації і точності в керуванні безекіпажним катером. Інтеграція таких даних у САК забезпечує можливість реалізації складних алгоритмів навігації та маневрування і підвищує ефективність та надійність роботи безекіпажних катерів.

Основні результати та їх обговорення. Розроблена система вимірювання динамічних характеристик базується на використанні трьохосових сенсорів, які включають акселерометр, магнітометр, гіроскоп і GPS-приймач. Всі компоненти об'єднані в єдиний конструктивний модуль, що забезпечує компактність і зручність монтажу. Система здатна точно вимірювати ключові динамічні параметри руху безекіпажного катера, включаючи лінійні прискорення, кутові швидкості, просторове положення та курс. Таким чином, існує можливість використовувати отримані дані для підвищення точності САК безекіпажним надводним катером, а також для підлаштування його роботи до умов середовища. Також, запропонована система буде корисною для проєктування та оптимального вибору начіпного обладнання, необхідного для виконання спеціалізованих завдань безекіпажними надводними катерами.

Висновки.

1. Розроблена система вимірювання динамічних характеристик безекіпажного катера підготовлена до проведення натурних випробувань. Випробування мають бути проведені на базі БНК із використанням сучасних алгоритмів обробки даних для оцінки ефективності САК.

2. Запропонована система характеризується особливостями схемотехнічної реалізації, формою інформаційного представлення засобами програмного середовища MATLAB Simulink та невеликою собівартістю виробництва чинного зразка. Розробка сприяє

підвищенню точності автоматичного керування та відкриває можливості для широкого використання в безпечних надводних системах.

Перспективи подальших досліджень. Автори вважають за доцільне спрямувати подальші дослідження на вирішення ключових проєктних задач, пов'язаних із розробкою удосконаленої САК БНК, облаштованої системою вимірювання динамічних характеристик для забезпечення ефективної взаємодії із зовнішніми системами зв'язку та керування. Особлива увага буде приділена оптимізації роботи САК, вдосконаленню алгоритмів обробки даних від сенсорів та розширенню функціональності системи, зокрема для виконання спеціалізованих завдань у складних умовах експлуатації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yujuan W., Chao S., Jiahui H., Hua C. Model-free adaptive control for unmanned surface vessels: a literature review. *Systems science & control engineering: an open access journal*, 2024. 12 (1). 1–9.
2. Zhao Y., Fenglei H., Duanfeng H., Xiao P., Wangyuan Z. Decision-making for the autonomous navigation of USVs based on deep reinforcement learning under IALA maritime buoyage system. *Ocean Engineering*, 2022. 266 (5), 112557.
3. Zheng Y. B., Fan W. X., Han M. Y. Research on multi-agent collaborative hunting algorithm based on game theory and Q-learning for a single escaper. *Journal of intelligent fuzzy system*, 2021. 40 (03), 1–15.
4. Gongxing, Wu, Taotao Xu, Yushan Sun, Jiawei Zhang. Review of multiple unmanned surface vessels collaborative search and hunting based on swarm intelligence. *International journal of advanced robotic systems*, 2022. 19 (2), 1–20.
5. Sun X., Wang G., Fan Y. A formation collision avoidance system for unmanned surface vehicles with leader-follower structure. *IEEE Access*, 2019. 7, 24691–24702.
6. Tan G., Zhuang J., Zou J. Coordination control for multiple unmanned surface vehicles using hybrid behavior-based method. *Ocean Engineering*, 2021. 232, 109147.
7. Wei G.A., Zhang J.Q. Research on formation navigation of USV based on improved A* and DWA fusion algorithm. *Journal of computational methods in sciences and engineering*, 2024. 24 (4-5), 3191–3209.
8. Zhou C., Gu S., Wen Y. The review unmanned surface vehicle path planning: Based on multi-modality constraint. *Ocean Engineering*, 2020. 200, 107043.
9. Tao Y., Du J., Lewis F.L. Integrated intelligent guidance and motion control of USVs with anticipatory collision avoidance decision-making. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, 2024. 25 (11), 17810–17820.
10. Rybczak M., Lazarowska A. The development of algorithms for safe control of an autonomous ship. *International journal of electronics and telecommunications*, 2024. 70 (4), 997–1003.
11. Zhu F., Shen Y., Wang Y., Jia J., Zhang X. Fusing GNSS/INS/Vision with a priori feature map for high-precision and continuous navigation. *IEEE Sensors journal*, 2021. 21 (20), 23370–23381.
12. Guo M. Z., Guo C., Zhang C. SINS/GNSS-integrated navigation of surface vessels based on various nonlinear Kalman filters and large ship dynamics. *Journal of electrical engineering & technology*, 2021. 16 (1), 531–546.
13. Guo M., Zhou X., Guo C., Liu Y., Zhang C., Bai W. Adaptive federated filter-combined navigation algorithm based on observability sharing factor for maritime autonomous surface ships. *Journal of marine engineering & technology*, 2024. 23 (2), 98–112.
14. Wang Q., Zhang M. Inertial navigation system gyroscopic on-line calibration assisted by marine star sensor based on forgetting factor selection of a Sage-Husa filter. *Journal of marine engineering & technology*, 2022. 21 (1), 1–8.
15. Zitouni F., Maamri R., Harous S. FA-QABC-MRTA: a solution for solving the multi-robot task allocation problem. *Intellig service robot*, 2019. 12 (4), 407–418.

16. Tang H., Yin Y., Shen H. A model for vessel trajectory prediction based on long short-term memory neural network. *Journal of marine engineering & technology*, 2022. 21 (3), 136–145.
17. Liu J., Achurra A., Zhang C., Bury A., Wang X. A long short term memory network-based, global navigation satellite system/inertial navigation system for unmanned surface vessels. *Journal of marine engineering & technology*, 2024. 23 (1), 1–13.
18. Burunina Zh. Yu., Voitasyk A. M., Aloba L. T., Korytskyi V. I., Sirivchuk A. S., Klochkov O. P. Experimental study of group control laws for an autonomous unmanned underwater vehicle as a group agent. *Shipbuilding and marine infrastructure*, 2018. №2(10), 116–126.
19. AN5192: application note LSM6DSO: Always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope. URL: <https://www.pololu.com/file/0J1900/dm00517282-lsm6dso-always-on-3d-accelerometer-and-3d-gyroscope-stmicroelectronics.pdf> (дата звернення: 15.01.2025).
20. Aghamirbaha E., Toloei A., Alizadeh Roknabadi M. H. Analysis of marine navigation methods and systems. *20th International conference of Iranian Aerospace*, 2022. 1–6.
21. Liu W., Chen S., Hu Y., Lou N., Wang S. Enhancing USVs navigation based on minimum error entropy of GPS vector tracking. *Measurement science and technology measurement science and technology*, 2024. 35 (7), 076307.

REFERENCES

1. Yujian, W., Chao, S., Jiahui, H., Hua, C. (2024). Model-free adaptive control for unmanned surface vessels: a literature review. *Systems science & control engineering: an open access journal*. 12 (1). 1–9.
2. Zhao, Y., Fanglei, H., Duanfeng, H., Xiao, P., Wangyuan, Z. (2022). Decision-making for the autonomous navigation of USVs based on deep reinforcement learning under IALA maritime buoyage system. *Ocean Engineering*. 266 (5), 112557.
3. Zheng, Y. B., Fan, W. X., Han, M. Y. (2021). Research on multi-agent collaborative hunting algorithm based on game theory and Q-learning for a single escaper. *Journal of intelligent fuzzy system*. 40 (03), 1–15.
4. Gongxing, Wu, Taotao, Xu, Yushan, Sun, Jiawei, Zhang (2022). Review of multiple unmanned surface vessels collaborative search and hunting based on swarm intelligence. *International journal of advanced robotic systems*. 19 (2), 1–20.
5. Sun, X., Wang, G., Fan, Y. (2019). A formation collision avoidance system for unmanned surface vehicles with leader-follower structure. *IEEE Access*. 7, 24691–24702.
6. Tan, G., Zhuang, J., Zou, J. (2021). Coordination control for multiple unmanned surface vehicles using hybrid behavior-based method. *Ocean Engineering*. 232, 109147.
7. Wei, G. A., Zhang, J. Q. (2024). Research on formation navigation of USV based on improved A* and DWA fusion algorithm. *Journal of computational methods in sciences and engineering*. 24 (4–5), 3191–3209.
8. Zhou, C., Gu, S., Wen, Y. (2020). The review unmanned surface vehicle path planning: Based on multi-modality constraint. *Ocean Engineering*. 200, 107043.
9. Tao, Y., Du, J., Lewis, F. L. (2024). Integrated intelligent guidance and motion control of USVs with anticipatory collision avoidance decision-making. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*. 25 (11), 17810–17820.
10. Rybczak, M., Lazarowska, A. (2024). The development of algorithms for safe control of an autonomous ship. *International journal of electronics and telecommunications*. 70 (4), 997–1003.
11. Zhu, F., Shen, Y., Wang, Y., Jia, J., Zhang, X. (2021). Fusing GNSS/INS/Vision with a priori feature map for high-precision and continuous navigation. *IEEE Sensors journal*. 21 (20), 23370–23381.
12. Guo, M. Z., Guo, C., Zhang, C. (2021). SINS/GNSS-integrated navigation of surface vessels based on various nonlinear Kalman filters and large ship dynamics. *Journal of electrical engineering & technology*. 16 (1), 531–546.

13. Guo, M., Zhou, X., Guo, C., Liu, Y., Zhang, C., Bai, W. (2024). Adaptive federated filter–combined navigation algorithm based on observability sharing factor for maritime autonomous surface ships. *Journal of marine engineering & technology*. 23 (2), 98–112.
14. Wang, Q., Zhang, M. (2022). Inertial navigation system gyroscopic on-line calibration assisted by marine star sensor based on forgetting factor selection of a Sage-Husa filter. *Journal of marine engineering & technology*. 21 (1), 1–8.
15. Zitouni, F., Maamri, R., Harous, S. (2019). FA–QABC–MRTA: a solution for solving the multi-robot task allocation problem. *Intelligent service robot*. 12 (4), 407–418.
16. Tang, H., Yin, Y., Shen, H. (2022). A model for vessel trajectory prediction based on long short-term memory neural network. *Journal of marine engineering & technology*. 21 (3), 136–145.
17. Liu, J., Achurra, A., Zhang, C., Bury, A., Wang, X. (2024). A long short term memory network-based, global navigation satellite system/inertial navigation system for unmanned surface vessels. *Journal of marine engineering & technology*. 23 (1), 1–13.
18. Burunina, Zh. Yu., Voitasyk, A. M., Aloba, L. T., Korytskyi, V. I., Sirivchuk, A. S., Klochkov, O. P. (2018). Experimental study of group control laws for an autonomous unmanned underwater vehicle as a group agent. *Shipbuilding and marine infrastructure*. №2(10), 116–126.
19. AN5192: application note LSM6DSO: Always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope. URL: <https://www.pololu.com/file/0J1900/dm00517282-lsm6dso-alwayson-3d-accelerometer-and-3d-gyroscope-stmicroelectronics.pdf> (дата звернення: 15.01.2025).
20. Aghamirbaha, E., Toloei, A., Alizadeh Roknabadi, M. H. (2022). Analysis of marine navigation methods and systems. *20th International conference of Iranian Aerospace*. 1–6.
21. Liu, W., Chen, S., Hu, Y., Lou, N., Wang, S. (2024). Enhancing USVs navigation based on minimum error entropy of GPS vector tracking. *Measurement science and technology measurement science and technology*. 35 (7), 076307.

Voitasyk A. M., Sirivchuk A. S., Kostenko D. V. SYSTEM FOR MEASURING DYNAMIC CHARACTERISTICS OF AN UNMANNED VESSEL AS A COMPONENT OF ITS AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

The development of modern automatic control systems for unmanned vessels is an important direction for ensuring the efficiency and autonomy of their operation. These systems aim to reduce human intervention while enhancing operational capabilities. One of the important elements of such systems is a dynamic characteristics measurement system, which can provide accurate monitoring and analysis of the vessel's movement. This system enables real-time feedback on the vessel's performance and trajectory. The article discusses the task of increasing the efficiency of unmanned vessel control by creating a measurement system for dynamic characteristics. The proposed system uses a GPS receiver to enhance positional accuracy and multi-axis motion sensors, including accelerometers, magnetometers, and gyroscopes, to collect precise data on the vessel's movement. Specialized algorithms process the sensor data to determine dynamic parameters such as speed, acceleration, and orientation. These parameters are essential for maintaining control over the vessel's movement and improving overall efficiency. The system's ability to operate in sea conditions is emphasized, as it can provide a high data update frequency for real-time trajectory correction. This ensures the vessel remains on course even in challenging environments. The implementation of the system into the MATLAB Simulink environment allows for real-time visualization and data analysis. The system's data filtering and correction processes are detailed, showing how parameters are fine-tuned for optimal performance. Particular attention is paid to algorithms for calculating angular positions, accelerations, and speeds, which are crucial for the precise control of the vessel in autonomous mode. These algorithms enable the vessel to adapt to dynamic environmental changes and ensure stability during operation. The results of the study form the basis for further improvement of automatic control systems for unmanned vessels, which opens up the possibility of their widespread use in various tasks, in particular for monitoring, patrolling and maintenance of marine facilities.

Key words: unmanned surface vessel; automatic control system; dynamic characteristics; sensor.

© Войтасик А. М., Костенко Д. В., Сірівчук А. С.

Статтю прийнято до редакції 06.12.2024

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНОГО МОРСЬКОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ЗАДАЧ ГУМАНІТАРНОГО РОЗМІНУВАННЯ ВОДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ШЛЯХІВ УКРАЇНИ

Збруцький О. В., д.т.н., професор, професор кафедри систем керування літальними апаратами Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: zbrutsky@cisavd.kpi.ua, ORCID: 0000-0002-2206-7148;

Сірівчук А. С., к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: sirivchuka@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2927-2600;

Трибулькевич С. Л., старший викладач кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: sergiy.trybulkevich@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-5783-6616.

Безпека водних шляхів України є важливою задачею сьогодення, особливої уваги слід приділяти наявності підводних потенційно небезпечних об'єктів, у тому числі й вибухових. Пропонується використання безекіпажної самохідної плавучої платформи, яка оснащена ненаселеним прив'язним підводним апаратом для виявлення та ідентифікації таких об'єктів. Використання такої системи надає особливі вимоги до системи автоматичного керування через наявність двох самохідних об'єктів з'єднаних між собою гнучким зв'язком, особливістю якої є необхідність забезпечення плоско-паралельного руху платформи зі збереженням кута ризику.

Для забезпечення плоско-паралельного руху пропонується використання рушійно-кермового комплексу, що складається з чотирьох рушіїв, що знаходяться під певним кутом до головної осі симетрії платформи. У роботі представлено закон керування кожного двигуна залежно від визначеного вектора руху, що є однією зі складових тактичного рівня системи автоматичного керування.

Запропоновано використання ієрархічної системи автоматичного керування, де особливістю є спільний стратегічний рівень для всієї системи та окремі тактичні та виконавчі рівні для безекіпажної самохідної плавучої платформи та ненаселеного прив'язного підводного апарата.

Ключові слова: безекіпажна самохідна плавуча платформа; ненаселений прив'язний підводний апарат; автоматизація керування рухом; гуманітарне розмінування, підводний потенційно небезпечний об'єкт.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.058-068

Вступ. Забезпечення безпеки мореплавства в Україні є критичною задачею сьогодення. Однією з важливих складових цієї задачі є очищення акваторій від небезпечних об'єктів, особливо підводних, на водних транспортних шляхах України [1]. Внаслідок агресії з боку РФ дане питання постає ще більш гостро, оскільки під водою опиняються також вибухонебезпечні об'єкти, які несуть ще більший рівень загрози, ніж прості заводи. Причому, очищення водних шляхів України від даної загрози пов'язано з ризиком для людей [2]. Процес виявлення та нейтралізації загроз містить декілька етапів [3, 4]. Однією з головних труднощів є складність виявлення підводних об'єктів з поверхні без залучення спеціалізованої техніки, що ускладнює процес виявлення та ідентифікації загроз.

Для підвищення ефективності виявлення та ідентифікації небезпечних навігаційних загроз пропонується використання безекіпажного морського технологічного комплексу у складі самохідної безекіпажної плавучої платформи (СБПП), оснащеної ненаселеним прив'язним підводним апаратом (НППА) (рис. 1).

На СБПП розміщено пост енергетики і керування НППА (ПЕК) та кабельну лебідку (КЛ) з кабель-тросом (КТ), за допомогою якого забезпечується енергоживлення НППА та його інформаційний обмін з ПЕК.

До складу обладнання НППА входять: рушійно-рульовий комплекс (РРК), система навігації та керування, а також начіпне обладнання – пошукові прилади та підводні маніпулятори для операцій з ППНО.

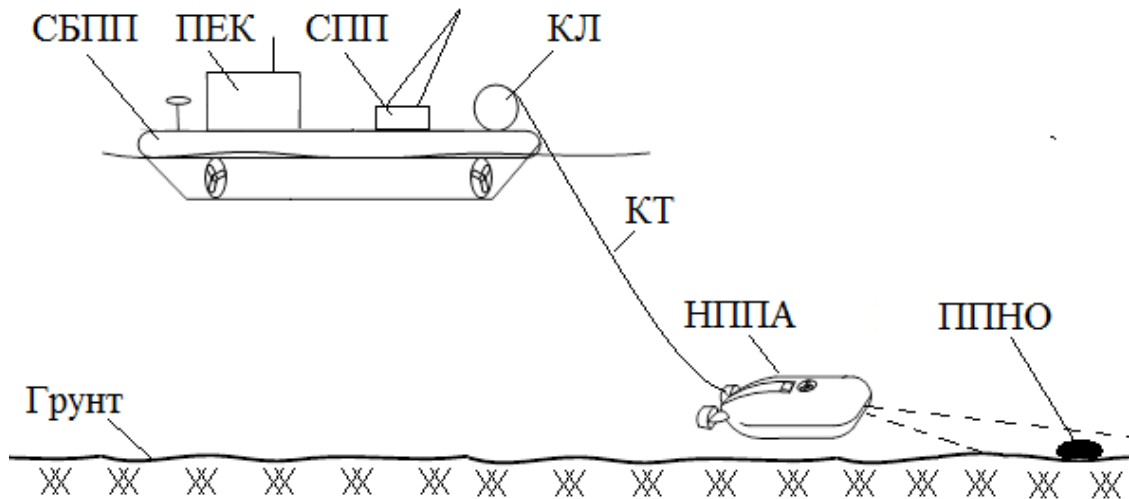


Рисунок 1 – Структура використання безкіпажного морського технологічного комплексу для інспекції водних транспортних шляхів України

Головною задачею такого комплексу є сканування морського або річкового дна водних транспортних шляхів для виявлення потенційних загроз судноплавству. Після виявлення підводного потенційно небезпечного об'єкта (ППНО) з платформи спускається НППА, який забезпечує ідентифікацію виявлених об'єктів та, за необхідністю, їх нейтралізацію.

Таким чином, вирішуються одночасно декілька задач: пошук, ідентифікація та нейтралізація потенційно небезпечних об'єктів. Незважаючи на явні переваги використання такої системи вимагає взаємодію СБПП та НППА на рівні автоматизації їх спільного руху.

Постановка проблеми. Використання безкіпажного морського технологічного комплексу у складі двох рухомих об'єктів, зв'язаних між собою гнучким зв'язком (кабель-тросом КТ) утворює нові виклики в розробці системи автоматичного керування такими комплексами.

Особливістю даного комплексу є те, що і СБПП, і НППА мають власні рушії та можуть керувати своїм рухом, але наявність гнучкого зв'язку вимагає організації їх узгодженого просторового руху, оскільки неузгоджений рух СБПП буде створювати великі зовнішні збурення для НППА. Також додатковими вимогами від пошукових приладів є підтримка кута ризику в СБПП. Все це вимагає наявності у СБПП специфічної конструкції рушійно-кермового комплексу (РКК), який забезпечить підтримку куту ризику та плоскопаралельне переміщення СБПП з заданими параметрами швидкості, а також оновлення структури системи автоматичного керування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Використання засобів підводної робототехніки для задач виявлення та нейтралізації ППНО вже мають практичне застосування [2, 4–9]. Для пошуку та ідентифікації ППНО в світі використовуються, як автономні ненаселені підводні апарати (АНПА) [10] так і НППА, що спускаються з пірса або судна носія [2, 8, 9, 11]. Для змоги розширення спектра виконуваних задач за одне занурення використовуються багатоцільові НППА [12].

При всіх перевагах використання НППА мають обмежений радіус дії, а АНПА не дають змогу керування в режимі реального часу, тому в [13, 14] пропонується використання НППА з радіобуєм, але дана конструкція хоч і має практично необмежений радіус дії, але стикається з проблемою часу автономної роботи та неможливості керування позицією радіобуя, що обмежує його застосування.

Представлена в даній статті безкіпажного морського комплексу має всі переваги НППА з радіобуєм, має значно більший запас енергії, а саморухома надводна частина комплексу забезпечує більшу маневреність.

Наявні конструктивні рішення безекіпажних надводних транспортних засобів здебільшого забезпечують добру маневреність при маршовому русі [15, 16] та деякі з них також системи динамічного позиціонування [17]. Але дані конструкції не передбачають швидкий боковий рух, що є одним з необхідних режимів для роботи СБПП.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є опис технології робіт з гуманітарного розмінування водних транспортних шляхів України з використанням безекіпажного морського технологічного комплексу «Самохідна безекіпажна плавуча платформа – Ненаселений прив'язний підводний апарат» та розробка структури системи автоматичного керування самохідною безекіпажною плавучою платформою.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати множину основних режимів роботи безекіпажного морського технологічного комплексу та сформулювати множину задач автоматичного керування комплексом;
- розробити математичну модель системи керування рухом самохідною безекіпажною плавучою платформою;
- розробити узагальнену структуру системи автоматичного керування безекіпажним морським технологічним комплексом для інспекції водних транспортних шляхів України.

Виклад основного матеріалу. Для побудови структури системи керування перш за все необхідно визначити режими роботи СБПП з НППА. Виходячи з задач інспекції водних транспортних шляхів України система має наступні режими роботи:

- перехід у задану точку – перехід від точки старту до точки початку місії або від точки кінця місії до точки підбору системи. Даний режим руху не передбачає вимог до параметрів руху СБПП, НППА в даному режимі знаходиться на борту СБПП;
- траєкторний рух СБПП без спуску НППА – у даному режимі працюють вимірвальні прилади лише СБПП, є необхідність утримання швидкості руху (впливає на точність приладів) та утримання заданого курсу. При русі з боковим зсувом необхідно також забезпечувати лаговий рух для утримання на заданій траєкторії з відповідною орієнтацією;
- утримання СБПП у точці, НППА проводить обстеження об'єкта – в даному режимі СБПП повинен утримуватись у точці для зменшення впливу на НППА через кабель-трос. Оскільки робота такого ПА може бути пов'язана з вибухонебезпечними об'єктами. У таких умовах неконтрольовані зовнішні збурення можуть призвести до втрати НППА. У даному режимі необхідно не тільки утримувати СБПП у заданій точці, але й визначити точку, яка буде оптимальною для роботи ПА (задача оператора);
- спільний рух СБПП та НППА – даний режим може використовуватись для обстеження довгих об'єктів, сканування донної поверхні в умовах, коли засобами СБПП це зробити неможливо тощо.

Таким чином для системи автоматичного керування рухом НППА та СБПП можна виділити три ключові режими роботи: ручний, автоматизований та автоматичний. У ручному режимі роботи всі задачі керування бере на себе оператор (відхиленнями джойстиків керуючих пристроїв задає відповідний сигнал на електроприводи), в автоматизованому – система автоматичного керування бере на себе задачі стабілізації визначених параметрів (такі як курс, швидкість, глибина тощо), які в режимі реального часу передаються від оператора, автоматичний рух – забезпечує взаємну роботу НППА та СБПП при проходженні по заданій траєкторії або до заданої точки, де виявлено ППНО.

Для полегшення побудови систему керування рухом залежно від режиму роботи розділяють на дві підсистеми: для НППА та для СБПП. Режими руху будуються відповідно до стандартних протоколів керування безекіпажними рухомими апаратами [18]. Відмінність та особливості кожного режиму представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Опис режимів керування ПА та СБПП

№	Режим	НППА	СБПП
1.	Ручний	– ручне керування оператором двигунами РРК (в якості сигналів надходить рівень потужності для кожного двигуна в діапазоні ± 1); – ручне керування оператором начіпним обладнанням.	– забезпечує керування двигунами в відносних одиницях, що задається відхиленням рукоятки керування, j_x (відхилення по осі x) та j_y (відхилення по осі y) для плоско-паралельного руху та j_φ (відхилення по осі z , залежно від типу маніпулятора може знаходитись на іншій рукоятці) для повороту; – керування виконавчими механізмами (КЛ, СБПП тощо) проходить у ручному режимі.
2.	Автоматизований	– сигналами керування від оператора є курс, глибина та швидкість маршового руху; – керування іншими механізмами таке ж, як у ручному режимі.	– сигналами керування від оператора є курс та вектор швидкості маршового руху; – керування іншими механізмами таке ж, як у ручному режимі.
3.	Автоматичний	Задаються параметри місії у вигляді масиву значень: – цільові координати (GPS та глибина); – швидкість руху; – курс до точки призначення; – час утримання в кінцевій точці; – стан начіпного обладнання.	Траекторний рух з вимірювальним обладнанням коли НППА знаходиться на борту. Параметри місії задаються масивом значень: – цільові координати (GPS та глибина); – швидкість руху; – курс у точці призначення; – час утримання в кінцевій точці; – стан начіпного обладнання. Утримання в заданій точці (НППА ідентифікує об'єкт) параметри місії: – цільові координати (GPS та глибина); – курс у точці призначення; – час утримання в кінцевій точці; – стан начіпного обладнання. Слідування за апаратом по принципу алгоритму рою, де НППА є ведучим (необхідна система донної навігації).

Виходячи з вищеписаних режимів робіт до системи керування та навігації СБПП ставляться наступні вимоги:

- забезпечення можливості плоско-паралельного переміщення платформи;
- наявність системи визначення поточного положення (GPS) та переміщення (доплеровий лаг);
- наявність підводного GPS для визначення відносного положення між НППА та СБПП;
- також для безпеки судноплавства необхідне використання ECDIS [19].

Для автоматизації руху СБПП пропонується створення каскадної системи керування, основними модулями якої є задатчик сигналу (ЗС), регулятор швидкості (РШ), регулятор курсу (РК) та задатчик швидкості (ЗШ). У даній структурі керування рухом прослідковується чітка ієрархія, де ручний режим, крім безпосереднього відпрацювання сигналів від оператора, забезпечує відпрацювання сигналів керування автоматизованого режиму, а автоматизований – автоматичного, що забезпечує модульність системи керування рухом СБПП (рис. 2).

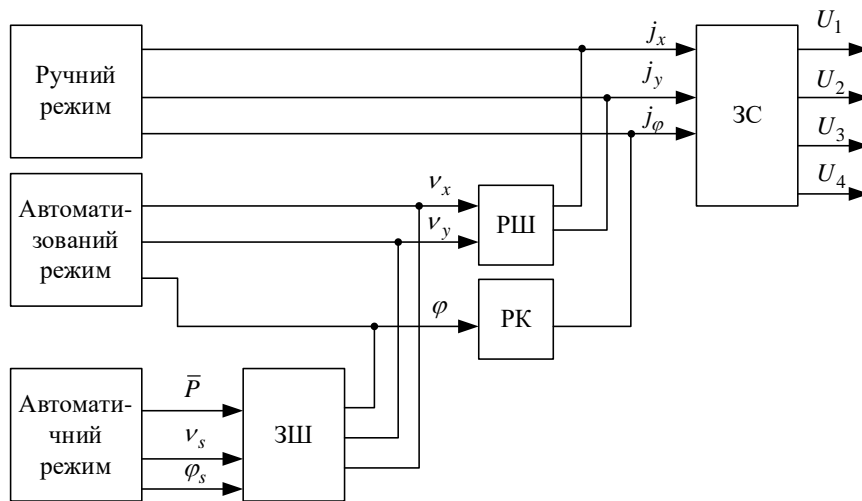


Рисунок 2 – Система керування рухом СБПП

Задатчик сигналу ЗС – це модуль, який перетворює сигнали керування, що поступають від оператора або системи автоматизованого руху, в окремі сигнали кожного двигуна. Математичний опис даного модулю залежить від РКК, який використовується в СБПП. Для забезпечення плоско-паралельного руху СБПП найбільш ефективною структурою РКК є структура, що складається з 4 двигунів, які встановлені під кутом α по відношенню до основної симетрії осей СБПП (рис. 3) [20].

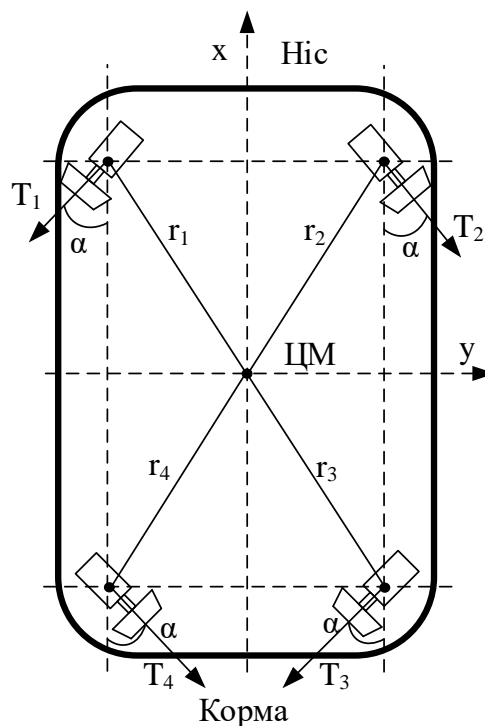


Рисунок 3 – Структура РКК СБПП

Для реалізації модуля ЗС необхідно визначити залежність вихідних параметрів U_n (де n – номер електрорушійного пристрою) від вхідних параметрів j_x, j_y та j_ϕ з урахуванням особливостей конструкції РКК. Для універсальності алгоритму вхідні та вихідні значення повинні бути представлені у відносних одиницях (у діапазоні $[-1; 1]$). Із рис. 3 видно, що $T_1 \parallel T_3$ та $T_2 \parallel T_4$, отже введемо додаткові розрахункові значення – величини сигналу керування ЕРП для забезпечення плоско-паралельного руху p_{x1} (ЕРП 1 та 3) та p_{x2} (ЕРП 2 та 4). Таким чином сума p_{x1} та p_{x2} буде забезпечувати маршовий рух, а їх різниця – лаговий:

$$\begin{cases} j_x = p_{x1} + p_{x2} \\ j_y = p_{x1} - p_{x2} \end{cases} \quad (1)$$

Розв'язавши дану систему рівнянь ми отримуємо частку сигналу керування для окремого двигуна (p_{x1} та p_{x2}), яка буде відповідати за плоско-паралельний рух.

Для забезпечення повороту (без зміщення СБПП) всі двигуни повинні давати однакову інтенсивність упору, але T_2, T_3 повинні мати додатне значення, а T_1, T_4 – від'ємне. Дана частка упору буде задаватись значенням j_φ .

Додатковими обмеженнями закону керування рухом є:

- результуючий сигнал керування не повинен перевищувати 1;
- при перевищенні сигналу керування пріоритет надається сигналу керування поворотом.

Враховуючи дані обмеження та спираючись на (1) сигнал керування для кожного двигуна буде розраховано за формулою:

$$\begin{aligned} U_1 &= \begin{cases} -j_\varphi + p_{x1}, \text{ якщо } |j_\varphi + p_{x1}| \leq 1 \\ -j_\varphi + (1 - |j_\varphi|)p_{x1}, \text{ якщо } |j_\varphi + p_{x1}| > 1 \end{cases} \\ U_2 &= \begin{cases} j_\varphi + p_{x2}, \text{ якщо } |-j_\varphi + p_{x2}| \leq 1 \\ j_\varphi + (1 - |j_\varphi|)p_{x2}, \text{ якщо } |-j_\varphi + p_{x2}| > 1 \end{cases} \\ U_3 &= \begin{cases} j_\varphi + p_{x1}, \text{ якщо } |j_\varphi + p_{x1}| \leq 1 \\ j_\varphi + (1 - |j_\varphi|)p_{x1}, \text{ якщо } |j_\varphi + p_{x1}| > 1 \end{cases} \\ U_4 &= \begin{cases} -j_\varphi + p_{x2}, \text{ якщо } |-j_\varphi + p_{x2}| \leq 1 \\ -j_\varphi + (1 - |j_\varphi|)p_{x2}, \text{ якщо } |-j_\varphi + p_{x2}| > 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

Регулятори РШ та РК забезпечують стабілізацію швидкості та курсу СБПП, їх реалізація може бути представлена у вигляді адаптивних ПІД регуляторів.

Задатчик сигналу ЗШ обчислює відстань R та курс φ_R до заданих координат місії \bar{P} . Математичний опис даних розрахунків представлений у [21]. Якщо додаткові параметри руху, які потрібно забезпечувати для нормального функціонування вимірювального обладнання

(v_s, φ_s), не задані (приймають значення -1), то СБПП йде маршовим рухом у сторону точки на максимальній швидкості v_{\max} (виключення становить ситуація, коли СБПП підходить до заданої точки). Таким чином, вихідні параметри ЗШ обчислюються за допомогою наступних відношень

$$\begin{aligned} v_x &= \begin{cases} v_s \cdot \cos \varphi_p, \text{ якщо } v_x \neq -1 \\ f(R) \text{ якщо } v_x = -1 \end{cases} \\ v_y &= \begin{cases} v_s \cdot \sin \varphi_p, \text{ якщо } v_x \neq -1 \\ 0 \text{ якщо } v_x = -1 \end{cases} \\ \varphi &= \begin{cases} \varphi_x, \text{ якщо } \varphi_x \neq -1 \\ \varphi_p, \text{ якщо } \varphi_x = -1 \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

де $f(R)$ – експериментальна залежність швидкості руху СБПП від відстані до цілі, наприклад:

$$v_x = v_{\max} \frac{R}{\sqrt{a + R^2}}; \quad (4)$$

де a – коефіцієнт крутизни сигмоїди.

Вибір функції $f(R)$ та її коефіцієнтів підбирається експериментальним шляхом залежно від динамічних характеристик СБПП.

Для ефективного виконання місії пропонується використання трирівневої ієрархічної структури системи керування з роздільними тактичним та виконавчими рівнями (рис. 4).

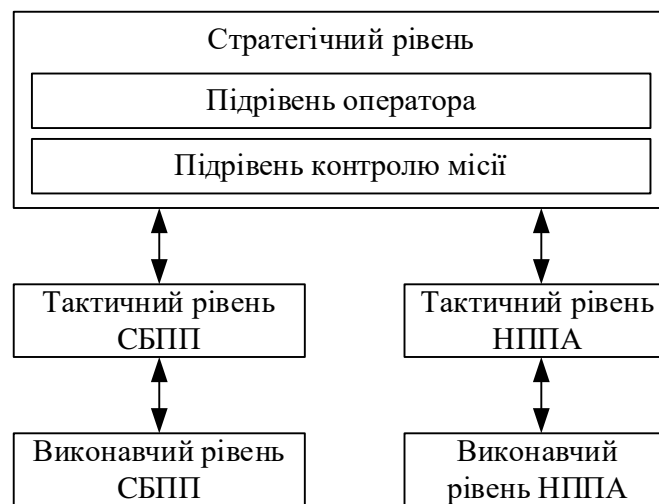


Рисунок 4 – Загальна структура системи керування «Безекипажна самохідна плавуча платформа – Ненаселений прив'язний підводний апарат»

Верхнім спільним рівнем є стратегічний рівень, який забезпечує взаємодію оператора з комплексом СБПП-НППА, а також взаємну роботу СБПП та НППА.

Даний рівень можна поділити на два підрівні: підрівень оператора та підрівень контролю місії. Підрівень оператора забезпечує ручне та автоматизоване керування СБПП та НППА, надає інструменти для постановки місії в автоматичному режимі керування.

Підрівень контролю місії містить задачі постановки сигналів керування для тактичного рівня відповідно від поставленого завдання. У даному режимі закладені всі точки траєкторного руху та визначається поточна точка, до якої треба рухатись, або режим стабілізації в даній точці. При цьому масиви точок для СБПП та НППА можуть відрізнитись, але не більше ніж це дозволяє кабель-трос. На даному рівні контролюється взаємне розташування СБПП та НППА та проводяться корективи для режиму руху СБПП. Пріоритет за положенням віддається підводному апарату, оскільки більшість кінцевих робочих інструментів знаходяться саме на НППА.

Тактичний рівень перетворює задачі місії в зрозумілі команди для виконавчих механізмів. Стратегічний рівень надає окремі задачі для СБПП та НППА, тому тактичний рівень є окремим для даних об'єктів.

Однією з головних задач тактичного рівня є забезпечення автоматичного руху кожного рухомого об'єкта. Апаратно тактичний рівень, зазвичай, реалізований на бортовому комп'ютері керованого об'єкта. Вихідними параметрами тактичного рівня є рівень сигналів керування на основні виконавчі механізми (електроприводи поворотних рулів та крил, електроприводи маніпуляторів, електроприводи РКК). Вхідними параметрами є поточні задачі місії від стратегічного рівня та зворотний зв'язок з сенсорів виконавчого рівня.

Виконавчий рівень перетворює, отримані сигнали керування, з відносних одиниць у сигнали для драйверів виконавчих пристроїв з використанням перетворювачів інтерфейсів та підтримкою протоколів обміну залежно від пристроїв, що використовуються. Також на цьому рівні виконуються перетворення первинних даних від датчиків у параметри, які використовуються на тактичному рівні. На відміну від інших рівнів системи виконавчий рівень повністю залежить від обладнання, яке встановлене на СБПП та НППА.

Основні результати та їх обговорення. Отриманні результати дослідження закладають теоретичну основу для розробки нової системи моніторингу водних транспортних шляхів України та засобів гуманітарного розмінування. Представлена СБПП – НППА є багатофункціональною системою з можливістю тривалого часу автономної роботи.

У роботі представлено загальні режими руху, які повинна забезпечувати функціонування системи та запропоновано конструкцію рушійно-кермового комплексу та запропоновано закони керування плоско-паралельним рухом запропонованої системи.

Висновки. Представлений самохідний безекіпажний морський комплекс «Самохідна безекіпажна плавуча платформа – Ненаселений прив'язний підводний апарат» дає змогу підвищити ефективність виконання робіт з гуманітарного розмінування на водних транспортних шляхах України. Представлена платформа вимагає більшої кількості режимів автоматичного керування в порівнянні з іншими плавучими засобами робототехніки. Крім режиму стабілізації в точці, що притаманний більшості плавучих платформ, додаються режими слідкування за ненаселеним прив'язним підводним апаратом та режим траекторного руху з незмінним кутом ризику.

Запропонована структурна система керування забезпечує взаємодію між самохідною безекіпажною платформою та ненаселеним прив'язним підводним апаратом та стратегічному рівні, де визначається та задається їх взаємне розташування і на основі цих даних передаються сигнали керування для тактичного рівня кожного з них.

Сформульовані режими руху та запропонована структура системи керування закладають теоретичне підґрунтя для впровадження роботизованих технологій проведення робіт з забезпечення безпеки судноплавства в Україні.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть присвячені деталізації роботи стратегічного рівня представленої структури системи керування. У даному рівні планується впровадження систем автоматичного виявлення та ідентифікації підводних потенційних об'єктів методами комп'ютерного зору та автоматичне реагування на виявлення таких об'єктів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Про внутрішній водний транспорт. Закон України № 4017-IX від 10.10.2024 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1054-20#Text> (дата звернення: 26.12.2024).
2. ДСНС показали обладнання водолазів і як здійснюється підводне розмінування: Міністерство внутрішніх справ України <https://mvs.gov.ua/news/dsns-pokazali-obladnannia-vodolaziv-i-iaak-zdiisniujetsia-pidvodne-rozminuvannia-video>.
3. Блінцов В. С., Надточий А. В. Гуманітарне розмінування мілководних акваторій: технології та робототехнічне забезпечення = Humanitarian demining of shallow water areas: technologies and robotic support: *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. 2024. № 1 (18). С. 4–10.
4. A Guide to survey and clearance of Underwater Explosive Ordnance. Geneva, April, 2016. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/323031189.pdf>.
5. Jose M. Giron-Sierra, Fernando Pereda, Hector Garcia de Marina, Santiago Cifuentes, Developing an Autonomous Surface Ship for Sea Demining: First Steps, IFAC Proceedings Volumes, Volume 43, Issue 20, 2010, 91–96 p.
6. Blintsov, Volodymyr, Maksym Hrytsaienko. Improvement of the Management of Material and Technical Resources of Water Cleaning Projects From Explosive Objects. *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 6, no. 2, 2016, pp. 51–56, <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86768>.
7. Соловійов І. І., Стрілець В. М. Проблемні питання виконання робіт з підводного розмінування. Енергозбереження та промислова безпека: виклики та перспективи : наук.-техн. зб. Матеріалів III Міжнар. наук.-практ. конф., 02–03 черв. 2020 р. Київ: КПІ, ННДІ ПБтаОП, 2020. С. 225–231. URL: http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Vochkovskyi%20A._Sapozhnikova%20N..pdf.
8. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. URL: <https://www.gichd.org/>.
9. Блінцов В. С., Грицаєнко М. Г., Поступальський М. І. Роботизовані технології пошуку та обстеження підводних потенційно небезпечних об'єктів: успішні практики та напрямки подальшого впровадження. «Актуальні питання техногенної та цивільної безпеки

України» : Матеріали II Всеукраїнської наукової конференції. Миколаїв : Видавець Торубара В. В., 2020. 49–51 с.

10. Russell B. Wynn, Veerle A. I. Huvenne, Timothy P. Le Bas, Bramley J. Murton, Douglas P. Connelly, Brian J. Bett, Henry A. Ruhl, Kirsty J. Morris, Jeffrey Peakall, Daniel R. Parsons, Esther J. Sumner, Stephen E. Darby, Robert M. Dorrell, James E. Hunt, Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience, *Marine Geology*, Volume 352, 2014, 451–468 p.

11. Hrytsaienko, M. Development of the information platform model for the neutralization of potentially dangerous underwater objects. *Technology Audit and Production Reserves*, 2017. 2(2(40)), 57–62. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129208>.

12. Attia, Youssef & Tawakol, Amr & Kohel, Karim & Ahmed, Adham & Abdellatif Hamed IBRAHIM, Ahmed & Abdelsalam, Ibrahim. Development of a Smart Multipurpose Underwater Vehicle for Subsea Operations: Navigation and Objects detection using Artificial Intelligence Techniques. *IUGRC International Undergraduate Research Conference*. Volume 5, Issue 5, 2021.

13. Блінцов В. С., Сірвчук А. С., Надточій А. В., Надточій В. А. Автоматизація керування автономним ненаселеним підводним апаратом з радіобуєм: монографія, Миколаїв: Ліон, 2022. 196 с.

14. Blintsov Volodymyr, Maidaniuk Pavlo, Sirivchuk Andrii Improvement of Technical Supply of Projects of Robotized Monitoring of Underwater Conditions in Shallow Water Areas. «EUREKA: Physics and Engineering», 2019. Number 3. P. 41–49. <https://doi.org/10.21303 / 2461-4262.2019.00893>.

15. Burdziakowski, Paweł & Stateczny, Andrzej. Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research*. 2019. 26. 30–39. [10.2478/pomr-2019-0004](https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0004).

16. Serhii Zinchenko, Oleh Tovstokoryi, Andrii Ben, Pavlo Nosov, Ihor Popovych, Yaroslav Nahrybelnyi Automatic optimal control of a vessel with redundant structure of executive devices International. Scientific Conference “Intellectual Systems of Decision Making and Problem of Computational Intelligence”. Springer International Publishing. 2021. 266–281 p.

17. Zinchenko, s & Ben, A. & Nosov, Pavlo & Mateichuk, V. & Grosheva, O. & Popovych, Ihor. The vessel movement optimisation with excessive control. *Bulletin of the Karaganda University Physics Series*. 2020. 99. 86–96. [10.31489/2020Ph3/86-96](https://doi.org/10.31489/2020Ph3/86-96).

18. MAVLINK Common Message Set URL: <https://mavlink.io/en/messages/common.html>

19. ECDIS Procedures Guide – 2024–2025 Edition. Witherbys, 2024. 312 p. URL: <https://shop.witherbys.com/ecdis-procedures-guide-2024-2025-edition/>.

20. Блінцов В. С., Войтасик А. М. Сучасні задачі автоматичного керування самохідною прив'язною підводною вантажною системою. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. 2017. № 3. С. 49–55. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnuk_2017_3_8.

21. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. URL: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.

REFERENCES

1. Pro vnutrishnii vodnyi transport [On inland water transport]. *Zakon Ukrainy*[Law of Ukraine] № 4017-IX vid 10.10.2024 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1054-20#Text> (data zvernennia: 26.12.2024).

2. DSNS pokazaly obladnannia vodolaziv i yak zdiisniuietsia pidvodne rozminuvannia: Ministerstvo vnutrishnikh sprav Ukrainy [The State Emergency Service showed divers' equipment and how underwater demining is carried out: Ministry of Internal Affairs of Ukraine] <https://mvs.gov.ua/news/dsns-pokazali-obladnannia-vodolaziv-i-iak-zdiisniujetsia-pidvodne-rozminuvannia-video>.

3. Blintsov, V. S., Nadtochy, A. V. (2024). Humanitarne rozminuvannya milkovodnykh akvatorii: tekhnologii ta robototekhnichne zabezpechennia [Humanitarian demining of shallow water areas: technologies and robotic support] *Shipbuilding & Marine Infrastructure*. № 1 (18). S. 4–10.
4. A Guide to survey and clearance of Underwater Explosive Ordnance (2016). Geneva, April. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/323031189.pdf>.
5. Jose M. Giron-Sierra, Fernando Pereda, Hector Garcia de Marina, Santiago Cifuentes, (2010). Developing an Autonomous Surface Ship for Sea Demining: First Steps, *IFAC Proceedings Volumes*, Volume 43, Issue 20, 91–96 p.
6. Blintsov, Volodymyr, Maksym Hrytsaienko (2016). Improvement of the Management of Material and Technical Resources of Water Cleaning Projects From Explosive Objects. *Technology Audit and Production Reserves*, vol. 6, no. 2, pp. 51–56, <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.86768>.
7. Soloviov, I. I., Ctrilets, V. M. (2020). Problemni pytannia vykonannia robot z pidvodnoho rozminuvannya [Problematic issues of underwater mine clearance work]. *Enerhozberezhennia ta promyslova bezpeka: vyklyky ta perspektyvy : nauk.-tekhn. zb. Materialiv III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. [Energy saving and industrial safety: challenges and prospects: scientific and technical collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference]*, 02–03 cherv. 2020 r. Kyiv: KPI, NNDI PBtaOP, S. 225–231. URL: http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/11111/1/Bochkovskyi%20A._Sapozhnikova%20N..pdf.
8. Geneva International Centre for Humanitarian Demining. URL: <https://www.gichd.org/>.
9. Blintsov, V. S., Hrytsaienko, M. H., Postupalskyi, M. I. (2020). Robotyzovani tekhnologii poshuku ta obstezhennia pidvodnykh potentsiino nebezpechnykh ob'ektiv: uspishni praktyky ta napriamky podalshoho vprovadzhennia. [Robotic technologies for searching and surveying underwater potentially dangerous objects: successful practices and directions for further implementation.] «Aktualni pytannia tekhnohennoi ta tsyvilnoi bezpeky Ukrainy» : Materialy II Vseukrainskoi naukovoikonferentsii [Current issues of technogenic and civil security of Ukraine": Materials of the II All-Ukrainian scientific conference]. Mykolaiv : Vydavets Torubara V., 49–51 s.
10. Russell B. Wynn, Veerle A. I. Huvenne, Timothy P. Le Bas, Bramley J. Murton, Douglas P. Connelly, Brian J. Bett, Henry A. Ruhl, Kirsty J. Morris, Jeffrey Peakall, Daniel R. Parsons, Esther J. Sumner, Stephen E. Darby, Robert M. Dorrell, James E. Hunt (2014). *Autonomous Underwater Vehicles : Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience*, *Marine Geology*, Volume 352, 451–468 p.
11. Hrytsaienko, M. (2017). Development of the information platform model for the neutralization of potentially dangerous underwater objects. *Technology Audit and Production Reserves*, 2(2(40)), 57–62. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.129208>.
12. Attia, Youssef & Tawakol, Amr & Kohel, Karim & Ahmed, Adham & Abdellatif Hamed IBRAHIM, Ahmed & Abdelsalam, Ibrahim.(2021) Development of a Smart Multipurpose Underwater Vehicle for Subsea Operations: Navigation and Objects detection using Artificial Intelligence Techniques. *IUGRC International Undergraduate Research Conference*. Volume 5, Issue 5.
13. Blintsov, V. S., Sirivchuk, A. S., Nadtochy, A. V., Nadtochii, V. A. (2022). Avtomatyzatsiia keruvannia avtonomnym nenaselenym pidvodnym aparatom z radiobuim: monohrafiia [Automation of control of an autonomous unmanned underwater vehicle with a radio beacon], Mykolaiv: Ilion, 196 p.
14. Blintsov Volodymyr, Maidaniuk Pavlo, Sirivchuk Andrii (2019). Improvement of Technical Supply of Projects of Robotized Monitoring of Underwater Conditions in Shallow Water Areas. «EUREKA: Physics and Engineering», Number 3. P. 41–49. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00893>.
15. Burdziakowski, Paweł & Stateczny, Andrzej (2019). Universal Autonomous Control and Management System for Multipurpose Unmanned Surface Vessel. *Polish Maritime Research*. 26. 30–39. [10.2478/pomr-2019-0004](https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0004).

16. Serhii Zinchenko, Oleh Tovstokoryi, Andrii Ben, Pavlo Nosov, Ihor Popovych, Yaroslav Nahrybelnyi (2021) Automatic optimal control of a vessel with redundant structure of executive devices International. Scientific Conference “Intellectual Systems of Decision Making and Problem of Computational Intelligence”. Springer International Publishing. 266–281 p.

17. Zinchenko, s & Ben, A. & Nosov, Pavlo & Mateichuk, V. & Grosheva, O. & Popovych, Ihor (2020). The vessel movement optimisation with excessive control. Bulletin of the Karaganda University Physics Series. 99. 86–96. 10.31489/2020Ph3/86-96.

18. MAVLINK Common Message Set URL: <https://mavlink.io/en/messages/common.html>

19. ECDIS Procedures Guide – 2024–2025 Edition. Witherbys, 2024. 312 p. URL: <https://shop.witherbys.com/ecdis-procedures-guide-2024-2025-edition/>.

20. Blintsov, V. S., Voitasyk, A. M. (2017). Suchasni zadachi avtomatychnoho keruvannia samokhidnoiu pryv'iaznoiu pidvodnoiu vantazhnoiu systemoio [Modern problems of automatic control of self-propelled moored underwater cargo system.]. Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu korablebuduvannia [Collection of scientific papers of the National University of Shipbuilding]. № 3. S. 49–55. – Rezhym dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/znpnuk_2017_3_8.

21. Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points. URL: <https://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>.

Zbrutsky O. V., Sirivchuk A. S., Trybulkevich S. L. AUTOMATION OF CONTROL OF UNMANNED MARINE TECHNOLOGICAL COMPLEX FOR THE TASK OF INSPECTION OF WATERWAYS OF UKRAINE

The article considers the issue of increasing the efficiency of searching for and identifying dangerous underwater navigation threats by using an unmanned marine technological complex. The relevance of the study is due to the need to ensure the safety of navigation in the territorial waters of Ukraine. The proposed technological complex includes a self-propelled unmanned floating platform and an uninhabited moored underwater vehicle placed on it, its power and control post, as well as a launching and lifting device and a cable winch with a cable tow. The purpose of the work is to substantiate the control tasks for automating the movement of such a complex and synthesize the generalized structure of the automatic control system for this complex. To achieve the set goal, the work reviews modern technologies for detecting and neutralizing underwater potentially dangerous objects, justifies the composition of the equipment of the unmanned marine technological complex and describes a set of basic modes of its operation, and formulates a set of tasks for automatic control of the complex. As a result of the research, a generalized structure of the automatic control system of an unmanned marine technological complex for the inspection of waterways of Ukraine has been developed. To ensure the plane-parallel movement of a self-propelled unmanned floating platform, it is proposed to use a propulsion and steering complex consisting of four engines located at a certain angle to the main axis of symmetry of the platform. The work presents the control law of each electric drive of the platform engine depending on the specified motion vector. The use of a hierarchical automatic control system is proposed, the feature of which is a general strategic level for the entire system and separate tactical and executive levels for the unmanned self-propelled floating platform and the uninhabited moored underwater vehicle. The obtained research results lay the theoretical foundation for the development of a new system for monitoring waterways of Ukraine and means of humanitarian demining of these water areas. The proposed self-propelled unmanned marine complex will make it possible to increase the efficiency of humanitarian demining work on Ukrainian waterways.

Key words: *unmanned self-propelled floating platform; remotely operated underwater vehicle; traffic control automation; humanitarian demining, underwater potentially dangerous object.*

© Збруцький О. В., Сірівчук А. С., Трибулькевич С. Л.

Статтю прийнято до редакції 05.12.2024

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ
ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ БАЛАСТНИХ ВОД УЛЬТРАФІОЛЕТОВИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

Литвиненко В. В., д.т.н., старший науковий співробітник, директор Інституту електрофізики і радіаційних технологій НАН України, м. Харків, Україна, e-mail: vlytyvnenko@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4850-2555;

Шаляпін С. М., академік інженерної академії України, директор ТОВ «Харківська інженерна компанія», м. Харків, Україна, e-mail: info@waterlight.pro, ORCID: 0009-0000-6800-8832.

Розглянуто проблеми розробки та впровадження технології знезараження баластних вод на основі використання джерел ультрафіолетового випромінювання та супутніх розвинених окислювальних процесів. Проаналізовано основні параметри води, які визначають вимоги до сумарної інтенсивності джерел випромінювання. Запропоновано схему формування знезаражувального ефекту, яка враховує роль чинників випромінювання, параметрів води та активності реагентів. Проаналізовано біофізичні процеси, що відбуваються при дії ультрафіолетового випромінювання широкого спектра на мікроорганізми. Розглянуто організаційно-технічні заходи, що повинні бути враховані при впровадженні даних технологій на судах. На прикладі пілотної установки наведено перелік компетенцій, якими має опанувати персонал судна для дотримання норм експлуатації установки. Наведено техніко-економічні показники установки для знезараження баластних вод, які мають покладатись в основу при проектуванні установки для замовника. Запропоновано конструкцію установки для знезараження баластної води ультрафіолетовим випромінюванням. Описано способи контролю за утворенням осаду на поверхні джерел ультрафіолетового випромінювання та запропоновано спосіб їх очищення від осаду. Розроблено схему очищення баластної води при закачуванні в цистерну та при дебаластуванні. Передбачена можливість модульної компоновки системи знезараження з метою оптимального розташування обладнання у приміщенні судна. Описано систему автоматичного управління технологією очищення баластної води. Вказано напрямки удосконалення установок для більш повного виконання функцій знешкодження мікроорганізмів, що переносяться з баластними водами.

Ключові слова: знезараження баластних вод; ультрафіолетове випромінювання; фільтрація; регламент обробки.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.070-082

Вступ. Одним з сучасних викликів для безпеки людства є слабкопередбачувана динаміка розвитку світу мікроорганізмів, що постійно підсилюється завдяки мобільності людських та товарних потоків, суперечностях у культурі харчового споживання, все більшій інтегрованості світової спільноти, а також створенням новітніх штучних біологічно поживних середовищ. У зв'язку з цим для широкої номенклатури товарної продукції та пасажиропотоків застосовують запобіжні знезаражуючі заходи з метою недопущення поширення штамів мікроорганізмів та вірусів від одного регіону до іншого. Одним з наочних та узагальнених проявів цієї проблеми є епідемія, зумовлена поширенням вірусу COVID-19.

Для морських транспортних суден забір водного баласту є способом збереження стійкості. Разом із баластною водою в суднові танки потрапляють морські організми, ікра, личинки, рослини, а також збудники небезпечних хвороб. Таким чином, вказана проблема зацентрована в необхідності розробки ефективних засобів очищення та знезараження баластних вод, як середовища неконтрольовані скиди якого здійснюють інтенсивне перенесення мікроорганізмів у невласиві для них водні середовища. Під час скидання баласту в інших географічних районах морські організми і рослини, не зустрічаючи, найчастіше, природних ворогів, починають активно розмножуватися. Негативний характер наслідків цього процесу має різноманіття проявів та механізмів реалізації. Серед яких порушення екологічної рівноваги в ланцюжку «хижак-жертва», утворення біологічних обростань на гідротехнічних спорудах, нанесення шкоди морським господарствам, загроза здоров'ю людей.

На рівні міжнародного морського права це відображено у Міжнародній конвенції про контроль суднового водяного баласту й осадів та поводження з ними від 2004 року, що покликані запобігти руйнуванню природних механізмів підтримання біорізноманіття та функціонування процесів збалансованого саморегулювання у квазіавтономних водних екосистемах. Оснащення вітчизняного морського транспорту відповідним спеціалізованим обладнанням є запорукою інтеграції України у світовий простір надання транспортних послуг та долучення до актуальних стандартів. З огляду на комплексність проблеми її вирішення полягає в створенні принципів проектування обладнання, його сертифікації та підготовці фахівців, здатних його експлуатувати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На теперішній час окреслився певний перелік технічних засобів досягнення знезаражуючого ефекту. Їх аналіз наведено в низці робіт. Так у роботі [1] проаналізована установка, що використовується компанією Offshore Heavy Transport, спроектована та вироблена SunRui Marine Environment Engineering Co., Ltd. В основі роботи установки є процеси фільтрації та обробки окислювачем – гіпохлоритом натрію. У роботі також робиться акцент на необхідності підготовки суднових механіків. Зазначимо, що гіпохлорит натрію є небезпечною речовиною, отже робота з ним вимагає додаткових заходів безпеки. У системній роботі [2] представлена ретроспектива осмислення проблематики порушення екологічного балансу внаслідок скиду баластних вод та еволюція міжнародного законодавства, покликаною регулювати ці процеси та запобігати їх негативним наслідкам. Авторами проаналізовані найбільш поширені методи обробки води і відзначають перспективність методу обробки УФ-випромінюванням за показниками безпечності для персоналу, відсутності побічних ефектів, ефективністю знезараження. Істотним висновком у роботі [2] є те, що для обробки баластних вод застосовуються ті технологічні процеси, що мають традицію використання в наземних умовах. І, відповідно, для них властиві ті самі вади, що і для ділянок водопідготовки апробованих наземних технологій. Разом з тим слід відзначити, що в умовах розміщення на морському транспорті неминуче стикаємось з проблемою обмеженості простору для встановлення обладнання, обмеженості енергетичного ресурсу, умовами дотримання правил техніки безпеки, особливо що стосується роботи з отруйними речовинами (хлор, гіпохлорит натрію, озон), а також роботи з високовольтним обладнанням (озонатори, джерела імпульсів напруги). У роботі [3] надано узагальнений аналіз методів знезараження баластної води, серед яких метод УФ-обробки відрізняють такі переваги, як найвища знезаражувальна ефективність, можливість миттєвого скиду після обробки, відсутність хімічних змін у воді при середніх (порівняно з іншими показниками значеннях вартості). До ускладнюючих чинників відноситься необхідність попередньої обробки (як правило механічної фільтрації), також до технічних особливостей експлуатації таких установок належить необхідність очищення поверхонь джерел випромінювання, про що зазначається в роботі [4]. Таким чином, є цілком обґрунтованим більш ретельно підійти до урахування потенційних вад методу обробки УФ-променями та віднайти резерви підвищення його ефективності.

Постановка задачі. Метою проведених досліджень є розробка ефективного методу дезінфекції баластних вод від патогенних мікроорганізмів, заснованого на застосуванні спільного впливу механічної фільтрації нетоксичних окисників і інтенсивного ультрафіолетового опромінення. Підставою для очікування на одержання позитивних результатів є розроблена в роботі [5] концепція синергетичної дії факторів опромінення та факторів середовища, якому відбувається опромінення на радіаційно-стимульований вихід. Мультиплікативний ефект від одночасного впливу квантів ультрафіолетового випромінювання та окислювальної дії перекису водню на інактивацію мікроорганізмів полягає в дії кількох механізмів. Так, поглинаючи квант низькоенергетичного випромінювання молекула води підвищує власну реакційну здатність. Якщо реакція деструкції відбувається за ланцюжковим механізмом, саме випромінювання може стати ініціатором зародження первинних радикалів. Іншою складовою є необхідність каталітичного підсилення процесу окислення та подальшої деструкції. Слід зазначити, що

застосування джерел ультрафіолетового випромінювання з широким спектром від 200 до 300 нм, має сприятливо відображатись на перебігу необхідних нам процесів, оскільки, не знаючи точно спектрів поглинання молекул, ми забезпечуємо варіабельність впливу за рахунок широкополосності впливу. Наявність молекулярного кисню, особливо озону, спричиняє утворення синглетно-триплетних збуджених станів, що також може сприяти інтенсифікації процесів деструкції клітин мікроорганізмів.

Методи дослідження. Побудова моделі взаємодії УФ-променів з мікроорганізмами, що містяться у воді, процесом, який вимагає врахування багатьох факторів. І тут доречно повернутися до загального визначення електрофізичних променевих технологій та до тих підходів, які були вироблені авторами під час створення електрофізичних комплексів [6]. Пропонована концептуальна модель фізико-хімічних та біологічних процесів, що відбуваються при знезараженні води УФ-променями, апробована при розробці низки інших електрофізичних променевих технологій [7] та адаптована авторами з урахуванням існуючого досвіду з проєктування, виготовлення та впровадження УФ-установок. Модель є по суті структурною оболонкою для автоматизації експерименту та створення експертної системи автоматизованого проєктування. Зважаючи на багатофакторність процесу виникає завдання урахування взаємоузгодженої дії всіх чинників та оцінити їх внесок у формування знезаражуючого ефекту і на підставі цього сформулювати оптимальні параметри технологічного процесу. Досягнення знезаражуючого ефекту в технології, що використовує УФ випромінювання та додаткові впливи на параметри води (фільтрація, реагентна обробка окислювачем) є процесом, що залежить від багатьох чинників. Визначальним є чинник УФ-випромінювання F_{UV} (спектр випромінювання, потужність, доза), який за умови забезпечення по всій камері обробки мінімально необхідної дози, забезпечує інактивацію мікроорганізмів. Разом з тим на ефективність знезараження здатен впливати спектр випромінювання. Максимальний бактерицидний ефект властивий довжинам хвиль 260–265 нм, які найбільш інтенсивно поглинаються нуклеїновими кислотами [8, 9]. Для окремих мікроорганізмів цей максимум знаходиться в діапазоні 280 нм. Слід також брати до уваги, що поглинання кванта з довжиною хвилі 310–340 нм може призвести до ефекту репарації [8], навіть якщо попередньо отримана доза була номінально достатньою для знезараження і може підвищитись. У таких граничних випадках можуть визначальну роль відігравати чинники параметрів води (температура, рН індекс). У свою чергу під впливом УФ-променів у воді утворюються радикали ОН, молекули О₃, які спричиняють власну бактерицидну дію і їх можна характеризувати як чинники сукупного впливу. Відтак необхідно детально розглянути всі складові розрахунку, проєктування та виготовлення установок.

Методика розрахунку розподілу знезаражуючої дози.

Умовою інактивації бактеріальної мікрофлори і забезпечення обробки рідини значенням дози не менше певного значення. За умови використання декількох джерел УФ-випромінювання доза буде розподілятися нерівномірно, але при проєктуванні необхідно забезпечувати мінімально встановлене опромінення в будь-якій ділянці камери обробки. Серед чинників, що впливають на нерівномірність розподілу дози є те, що густина потужності випромінювання по мірі відділення від джерела циліндричної форми змінюється по закону Ламберта-Бугера

$$I(r) = \frac{P_0}{2\pi rh} e^{-\alpha r}, \quad (1)$$

де P_0 потужності випромінювання джерела Вт; r – відстань від вісі джерела, м, h – довжина джерела випромінювання, м; α – коефіцієнт поглинання випромінювання водою м⁻¹. Для прісної води, згідно даних наведених у [10, 11], α є величиною, яка комплексним чином залежить від багатьох чинників, і узагальнено визначається виразом

$$\alpha = F(K, T, C), \quad (2)$$

де K – кольоровість води, град; T – безрозмірний параметр мутності води, який у свою чергу залежить від кольоровості; C – концентрація елементів (заліза, хрому, марганцю) мг/л. Хоча баластні води стосуються морської води, остаточно нехтувати виразом для прісної води не варто, оскільки в прибережних зонах можна очікувати за певних випадків і суміші прісної води з морською. Разом з тим цей вираз спонукає нас ретельніше розглянути чинники, що впливають на оптичні характеристики морської води, і фактично визначають величину α . У роботі [12] зазначається, що значення відносної прозорості води коливається від 6 одиниць (Біле море) до 66,5 одиниць (Атлантичний океан, Саргасове море), середній показник становить приблизно 40 одиниць. Колір води залежить від вмісту в ній завислих частинок, також від погодних умов. Отже, здійснюючи розрахунок камери УФ-знезараження необхідно брати до уваги відмінність значень коефіцієнта оптичного поглинання, а відповідно, розрахунок треба здійснювати за консервативним сценарієм.

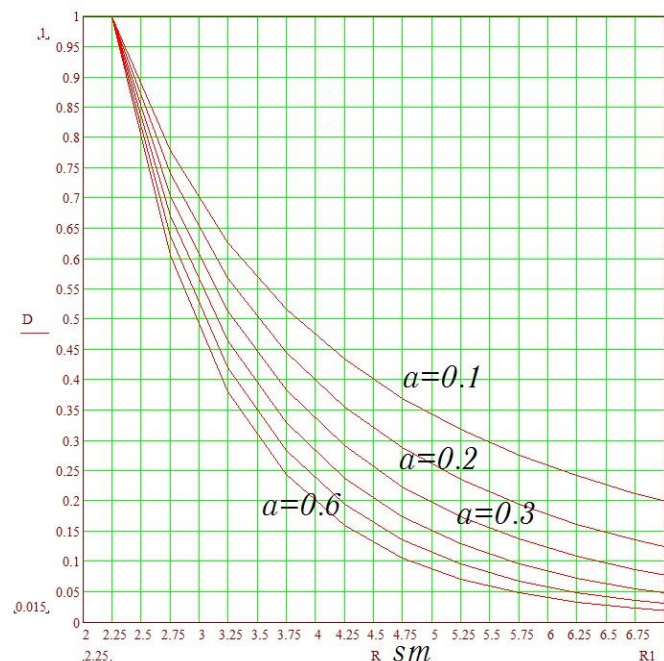


Рисунок 1 – Залежність значення інтенсивності випромінювання для циліндричного джерела од відстані від поверхні для різних значень прозорості води α (від 0,1 до 0,6)

На рис. 1 наведено залежність відносного значення інтенсивності випромінювання для циліндричного джерела од відстані від поверхні для різних значень α . Як бачимо, у випадку зміни значень α , потік води може не отримати задане значення дози. З метою уникнення такої ситуації установка має проєктуватись за консервативним сценарієм, тобто для найбільшого очікуваного значення α . Іншим варіантом досягнення потрібного значення поверхневої дози $D(r)$ [Дж/м²] згідно формули (3) є можливість регулювання швидкості потоку води через камеру обробки, а отже часу набору дози. Поверхнева доза $D(r)$, на відстані r визначається виразом

$$D(r) = I(r) \cdot t, \quad (3)$$

де t – час перебування елементарного об'єму води в точці r .

Ще одним підходом може бути збільшення дози реагенту та/або застосування додаткової електрофізичної обробки високовольтними імпульсами [13].

Адаптація устаткування до чинних міжнародних вимог.

Для запобігання зараженню та порушення екологічної рівноваги було ухвалено Міжнародну конвенцію з очищення баластних вод морських суден (ІМО), відповідно до якої посилено стандарт D-2, який визначає максимальну кількість життєздатних організмів, що містяться в баластних водах.

Відповідно до вимог Міжнародної морської конвенції (ІМО) вся вода, яка використовується морськими і річковими судами для контролю диференту, крену, осаду та інших цілей, повинна бути очищена від мікроорганізмів, водоростей та інших органічних речовин.

Затверджений ІМО стандарт не тільки жорстко регламентує кількість небезпечних бактерій і вірусів, які перебувають у баластних водах, що скидаються, а й обмежує вміст у них фітопланктону, що пред'являє підвищені вимоги до водоочисного устаткування і методів контролю якості очищення баластних вод.

Так відповідно до вимог ІМО в оброблених баластних водах кількість:

- життєздатних організмів розміром понад 50 мкм не має перевищувати 10 шт./м³;
- токсикогенних вібріонів холери (O1 і O139) має бути менше ніж 1 КУО/100 мл або менше ніж 1 КУО/г (сирої ваги) зразків зоопланктону;
- бактерій групи кишкової палички – менше 250 КУО/100 мл;
- кишкових ентерококів – менше 100 КУО/100 мл.

Для забезпечення вимог ІМО більшість морських та річкових суден для вирішення цієї проблеми вимушені використовувати дуже коштовні закордонні розробки, у той час, як на теренах нашої країни вже кілька десятиріч ведуться розробки не менш ефективних засобів боротьби з присутніми у питних, стічних, морських та технічних водах мікроорганізмами.

Технологічна реалізація пілотної установки.

Для дотримання вищевказаних вимог було спроектовано та виготовлено систему електрофізичного очищення та знезараження морських та річкових баластних вод, яка покликана запобігти руйнуванню природних механізмів підтримання біорізноманіття та функціонування процесів збалансованого саморегулювання в водних екосистемах. Технологічний процес ґрунтується на використанні сучасних розробок у галузі електрофізичних променевих технологій, методів очищення та знезараження стічних та сильно мінералізованих вод. Метод засновано на комплексному використанні таких чинників як: напірна фільтрація, ультрафіолетове опромінення інтенсивне окиснення органічних речовин перекисом водню, атомарним киснем та гідроксильними радикалами тощо.

При розробці технології найбільша увага була сконцентрована на ефективності очищення та енергоємності цього процесу. Були ретельно вивчені сучасні технології очищення, які засновані на використанні УФ-опромінення та хімічних методів знезараження. Вивчалися ефективність цих технологій, їх вплив на навколишнє середовище, складність обслуговування технологічного обладнання та інші фактори.

Так було виявлено, що при використанні технології УФ-опромінення для досягнення необхідного ефекту знезараження необхідно використовувати достатньо велику кількість енергії УФ-опромінення. Так для досягнення гарантованого ефекту знешкодження бактерій та більшої частки мікроорганізмів величина знезаражуючої дози УФ-опромінення (кількість бактерицидної енергії) повинна становити 200–400 мДж/см². При цьому навіть така велика кількість бактерицидної енергії не забезпечує гарантованого знищення моллюсків, їх личинок та інших мікроорганізмів. Для порівняння можна привести, що для знешкодження бактерій групи кишкової палички, які присутні у міських стічних водах, величина знезаражуючої дози УФ-опромінення повинна становити 40 мДж/см², а при наявності паразитів – не менше 65 мДж/см² [14].

Крім того, необхідно брати до уваги чутливість мікроорганізмів до спектра УФ-опромінення. Так, більшість бактерій, вірусів і найпростіших мікроорганізмів, як вже зазначалось, найбільш чутливі до УФ-опромінення з довжиною хвилі 260–265 нм, які генеруються УФ-лампами низького тиску. Однак такі мікроорганізми, як личинки мушель, більш чутливі до УФ-випромінювання з довжиною хвилі 280 ... 310 нм, яке генерується

УФ-лампами середнього тиску. Крім того, технологію УФ-зnezараження досить проблематично використовувати для зnezараження осаду.

При виборі типу зnezаражуючих УФ установок окрім ефективності зnezараження варто звертати увагу на такий параметр, як їх електрична потужність. Так при однаковій продуктивності й ефективності зnezараження (за більшою часткою мікроорганізмів) УФ установка з лампами низького тиску споживає електрики у 2–3 рази менше ніж її аналог з УФ-лампами середнього тиску. Питомі витрати електрики, яка використовується для зnezараження 1000 м³ баластної води, становлять 125–150 кВт·годин – для УФ установок з лампами низького тиску, та 250–450 кВт·годин для УФ установок з лампами середнього тиску [15].

Також уважно була вивчена можливість використання традиційних методів очищення і зnezараження баластних вод за допомогою таких хімічних реагентів як хлор, гіпохлорит натрію або кальцію, діоксид хлору та інші [1–4]. Було встановлено, що при використанні таких хімічних речовин можна досягнути значної ефективності очищення баластних вод та осаду, але для забезпечення необхідного ступеню зnezараження необхідно використовувати підвищені дози реагентів. А це веде з одного боку до збільшення вартості процесу зnezараження, а з другого – до забруднення акваторії токсичними хлорорганічними продуктами, які негативно впливають на місцеву флору і фауну.

Дуже перспективним для очищення та зnezараження баластних вод та їх осаду є використання екологічно чистого озону [10]. Озон отримують з глибоко очищеного та осушеного повітря за допомогою спеціальних високовольтних установок, які можуть встановлюватися у машинному відділенні. Але у цьому разі необхідно брати до уваги складність технологічного обладнання та високі витрати електричної енергії, яка необхідна для утворення озону.

У результаті ретельного вивчення існуючих методів очищення та зnezараження баластних вод та їх осаду, керуючись великим досвідом у розробці сучасних зnezаражуючих технологій, була запропонована технологічна схема очищення, яка заснована на використанні комплексу електрофізичних і окиснювальних факторів. Згідно технологічної схеми, яка пропонується вашій увазі, очищення води починається з її фільтрації, що забезпечує механічне видалення макрооб'єктів і підвищує ефективність наступного етапу їх руйнування в результаті процесу окиснення. Процес окиснення забезпечує часткове руйнування клітин мікроорганізмів та підвищує ефективність наступного етапу – УФ-опромінення. У результаті такої комбінованої обробки досягається висока ефективність зnezараження мікроорганізмів і мікрофлори.

Процес очищення баластних вод починається на стадії їх забору. Спочатку забортна вода поступає на промивний автоматичний фільтр, де відбувається видалення з води мікроорганізмів, які завбільшки за 50 мкм. Далі вода подається до блоку електрофізичної обробки, де вона спочатку обробляється високовольтними електричними імпульсами, а потім до блоку окиснення, де відбувається її контакт з перекисом водню (H₂O₂), атомарним киснем (O), гідроксильними радикалами (OH, OH₂). Після контакту з окиснювачем вода потрапляє до УФ установки, де в результаті фотохімічних процесів здійснюється зnezараження мікроорганізмів. Зnezаражена вода направляється до баластних баків. Враховуючи те, що в результаті фотохімічних процесів у баластній воді утворюються активні радикали (OH), процес зnezараження деякий час продовжується у баластних баках, що підвищує ефективність процесу. Корозійна активність активних радикалів, які потрапляють до баластних резервуарів невелика, бо вони достатньо швидко рекомбінують. Крім того, наявність у зnezараженій воді невеликої кількості активних радикал-іонів забезпечує створення на незахищених металевих частинах трубопроводів та ємностей окисну плівку, яка підвищує стійкість металевих конструкцій до корозії.

З погляду зниження витрат електрики, яка витрачається для зnezараження баластної води дуже доцільним є проведення зnezараження у два етапи: при закачуванні води у баластні цистерни у точці відправки судна і при їх спорожненні у точці прибуття. Такий

метод знезараження дозволяє знизити потужність СУБВ за рахунок того, що сумарна доза знезаражуючого УФ-опромінення досягається за два проходи води через камеру знезараження. На першому етапі здійснюється обробка при закачуванні води в баластну цистерну рис. 2.

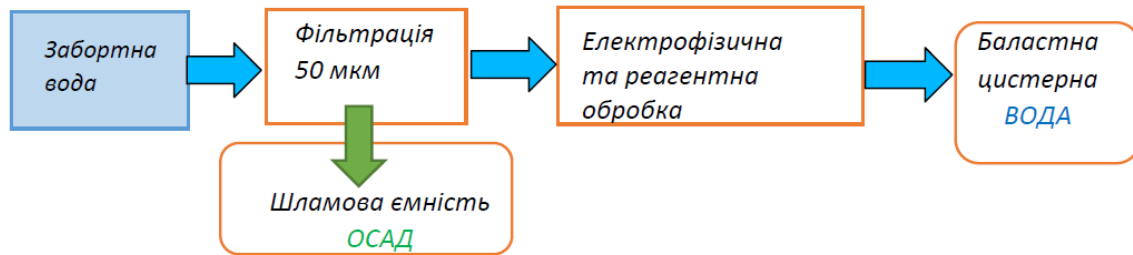


Рисунок 2 – Схема очищення баластної води при її закачуванні до баластних цистерн

При скиданні води обробка здійснюється у зворотному порядку рис. 3.

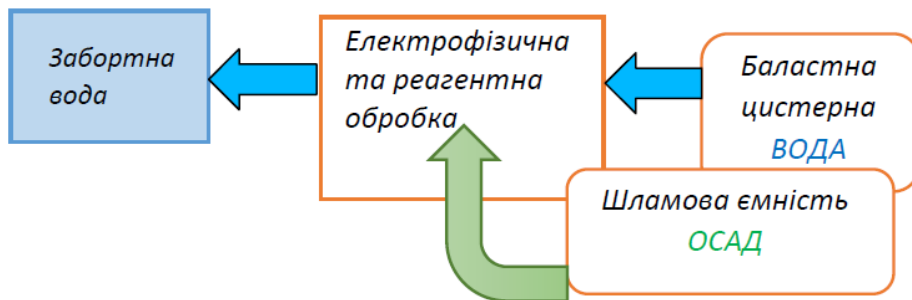


Рисунок 3 – Очищення води та осаду при дебаластуванні

В основу технологічного процесу очищення води покладено принцип підвищення ефективності знезараження води в результаті спільної дії бактерицидного УФ-випромінювання і невеликих кількостей перекису водню, які вводять у воду, яка знезаражується. При контакті з окиснювачем (атомарний кисень, перекис водню, активні гідроксил-радикали) відбувається пошкодження клітинної структури мікроорганізмів та рослин та здійснюється денатуралізація білків, ліпідів, нуклеїнових кислот, які входять до їх клітинної структури [8, 9], що призводить до ослаблення біологічної стійкості цих рослин та мікроорганізмів та суттєво підвищує ефективність наступної фази знешкодження – а саме УФ-опромінення. Під впливом потоку інтенсивного УФ-випромінювання відбувається практично миттєва загибель бактерій і вірусів, що перебувають у воді. Крім того, високоактивна редокс-система OH^* , яка утворюється при контакті УФ-випромінювання з окиснювачем, ефективно руйнує стійкі до дії УФ-випромінювання мікроорганізми, що перебувають у воді. У результаті чого забезпечується висока ефективність знищення мікроорганізмів. Така технологія отримала назву технології активного окислення або АОП (Advanced Oxidation Processes) і застосовується в новому поколінні установок знезараження та очищення води [16, 17].

Для зменшення потужності сумарна доза знезаражуючого УФ-опромінення досягається за два проходи води через камеру знезараження рис. 4. Для реалізації цієї технології розроблена система управління баластними водами (СУБВ), яка здатна забезпечити ефективне очищення та знезараження баластних вод та осаду відповідно до вимог ІМО. Основний процес обробки – знищення мікроорганізмів відбувається всередині фотохімічного реактора, який забезпечує високий ступінь знешкодження мікроорганізмів різного типу.

Попередня електрофізична обробка високовольтними імпульсами та введення в камеру знезараження невеликих кількостей ініціатору – перекису водню забезпечує посилення знезаражувального ефекту, чинить летальну дію на фітопланктон, який перебуває

у воді, та призводить до зниження величини знезаражувальної дози УФ-випромінювання, що, зі свого боку, зменшує енергоємність процесу знезараження.

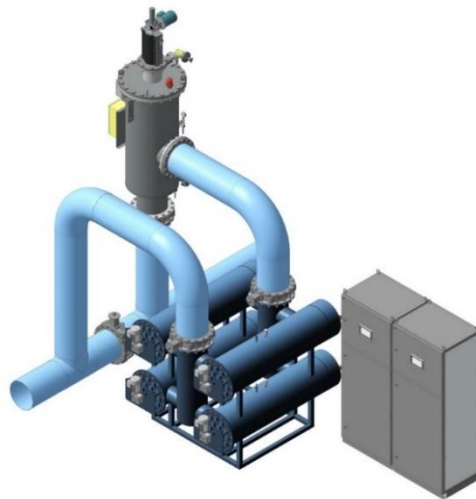


Рисунок 4 – Система управління баластними водами СУВВ ВОДОГРАЙ В500.03 МБФ. Зовнішній вигляд

Система управління баластними водами ВОДОГРАЙ складається з автоматичного фільтра очищення морської води, модуля електрофізичної обробки та модуля дозування ініціатора фотохімічних реакцій. Принцип дії СУВВ ВОДОГРАЙ ґрунтується на комплексній дії окиснювачів та УФ-опромінення на життєздатність мікроорганізмів (бактерій та вірусів), планктону і мікрофлори, які перебувають у баластній воді.

Для збільшення ефективності знешкодження мікроорганізмів та зменшення енерговитрат системи знезараження баластних вод проводиться у два етапи:

- під час закачування забортної води в баластні цистерни;
- під час скидання баластних вод в акваторію.

З метою зменшення витрат електрики, яка витрачається для знищення мікроорганізмів та мікрофлори, модуль УФ знезараження води, який входить до складу СУВВ ВОДОГРАЙ, оснащений УФ-лампами низького тиску, які випромінюють квазімоноенергетичний спектр в області максимальної бактерицидної ефективності (250–265 нм). Застосування УФ-ламп низького тиску з використанням окиснювача, здатне забезпечити високу ефективність знешкодження всіх типів мікроорганізмів.

Для забезпечення високої ефективності знешкодження мікроорганізмів УФ модуль оснащується автоматичною системою очищення захисних кварцових трубок, у яких розміщуються УФ-лампи.



Рисунок 5 – Модуль УФ знезараження СУВВ ВОДОГРАЙ В500.03 МБФ

СУБВ ВОДОГРАЙ має модульну конструкцію. Тобто СУБВ ВОДОГРАЙ складається з окремих модулів, що дозволяє розміщувати СУБВ на діючих суднах з урахуванням обмеженості простору та плану приміщення. Вертикальне компонування окремих модулів дає змогу легко нарощувати потужність СУБВ. Розрахунок кількості джерел випромінювання в модулі здійснюється за консервативним підходом, щодо оптичної прозорості води та очікуваного кола індексу. Вирази для розрахунку кількості джерел та енергетичних витрат на їх експлуатацію наведено в роботі [18]. Згідно даних роботи [19] витрати на здійснення фільтрації становлять від 0,4 кВт х год/м³ для частинок розміром 0,1–0,5 мкм до 5 кВт х год/м³ для 0,005–0,05 мкм.

Основні техніко-економічні параметри модуля наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Основні технічні параметри СУБВ ВОДОГРАЙ В500.03 МБФ

№	Параметр	Значення	Од. вим.
1	Номінальна продуктивність	500	м ³ /годину
2	Розрахункове значення дози УФ-опромінювання при коефіцієнті прозорості морської води T ₁₀ = 35%	150	мДж/м ²
3	Напруга живлення	АС 400 В, 50 Гц	В
4	Потужність	60	кВт
5	Тип УФ-ламп	низького тиску	
6	Ресурс УФ-ламп	16000	годин
7	Розмір сітки фільтра механічного очищення баластної води	50	мкм
8	Питомі витрати ініціатора фотохімічних реакцій (hydrogen peroxide H ₂ O ₂)	2,5	кг/1000 м ³
9	Вартість ініціатора (концентрація перекису водню 35%)	2	EUR/кг
10	Вартість УФ-ламп	180	EUR/шт.
11	Питомі витрати електрики	100	кВт·годин/1000 м ³

Обслуговування установки передбачає наявність певних навичок у фахівців зі служби судового механіка, які набуваються протягом триденного тренінгу. Для цього на базі інструкції з експлуатації розроблено базовий навчальний курс. Установка спроектована таким чином, щоб витрати часу на її обслуговування й експлуатацію були мінімальними.

Установка оснащується шафою управління, в якій розміщуються системи управління УФ-лампами і механізмами очищення захисних кварцових колб, а також система автоматичного контролю й управління знезараженням баластних вод (АСУ). АСУ забезпечує управління і контроль основних параметрів установки відповідно до вимог ІМО. АСУ оснащується пристроями автоматичного моніторингу та регулювання обсягів та інтенсивності обробки баластних вод на базі мікропроцесорного контролера.

З метою проведення офіційних перевірок і технічного обслуговування АСУ забезпечує генерування звітів про параметри автоматичного моніторингу роботи знезаражувальної установки згідно з частиною 5 додатка «Міжнародної конвенції про контроль судових баластних вод і осадів та управління ними 2004 року».

АСУ забезпечує зберігання даних протягом щонайменше 24 місяців, що відповідає дотриманню правила В-2 вимог до обладнання систем контролю та моніторингу.

Перспективи розвитку. Окремого розгляду потребує проблема обробки осаду. Зважаючи на його значно менший об'єм, але більшу в'язкість насиченість домішками та мікроорганізмами, а також меншу оптичну прозорість, застосовувати обробку з ультрафіолетовим випромінюванням буде малоефективним. Для цього доцільно застосовувати обробку електричними імпульсами. Про ефективність такого підходу свідчать роботи [13, 20]. Під дією імпульсного електричного розряду у воді генеруються потужні

ударні хвилі які призводять до збудження кавітації, яка характеризується аномально високим тиском (понад 200 МПа) та температурою (понад 5000 К). Імпульсна кавітація призводить до руйнування захисних оболонок і клітин мікроорганізмів, що суттєво полегшує процес контакту цих мікроорганізмів з окиснювачем. У випадку попередньої електрофізичної обробки високовольтними імпульсами та введення в камеру знезараження невеликих кількостей ініціатору – перекису водню забезпечує посилення знезаражувального ефекту, чинить летальну дію на фітопланктон, який перебуває у воді та призводить до зниження величини знезаражувальної дози УФ-випромінювання, що, зі свого боку, зменшує енергоємність процесу знезараження, але потребує урахування витрат електроенергії на роботу електроімпульсної установки. Також слід шукати компроміс між гідродинамічними втратами в камері обробки, які підсилюються, наприклад, при поперечному розміщенні УФ джерел, про що зазначається в роботах [4, 21] та рівномірністю опромінення середовища за рахунок його перемішування при зіткненні потоку з конструкційними перешкодами.

Висновки. При проектуванні системи управління баластними водами необхідно:

- оптимізувати співвідношення енергетичних витрат, що складаються з живлення насосного устаткування та джерел ультрафіолетового випромінювання;
- передбачити можливість заміни джерел випромінювання з урахуванням загального компонування обладнання в приміщенні судна;
- забезпечити можливість автоматизованого ведення реєстру наповнень та скидів баластної води зі збереженням даних;
- контролювати інтенсивність випромінювання та швидкості проходження води, як параметрів, що підтверджують обробку води належними дозами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дзигар А. К. Реалізація вимог міжнародної конвенції з управління баластними водами на судах компанії OFFSHORE HEAVY TRANSPORT. Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 10-а Міжнародна науково-практична конференція, 12–13 вересня 2019 р. Херсон: Херсонська державна морська академія.
2. Varlan T. / Application of ballast water treatment systems and minization of harmful impacts on the marine ecosystem // No. sge 16–01 (2023): Science for modern man '2023 <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-16-01-019>.
3. Šateikienė D., Janutėnienė J. / Ballast water treatment technologies comparative analysis // Proceedings of 16th International Conference. Transport Means. 2012.
4. Apetroaei M. R., Atodiresei D. V., Rău, et.a. / Overview on the practical methods of I. ballast water treatment // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1122 (2018) 012035 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1122/1/012035>.
5. Базалєєв Н. І., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В. Моделювання і прогнозування змін фізико-хімічних властивостей матеріалів під впливом випромінювань // Доповіді НАН України (4), с. 82–86 (1997).
6. Базалєєв М. І., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В., Шаляпін С. М. Електрофізичні променеві технології: нова концепція знезараження води ультрафіолетовими променями/ Наука та інновації. 2005. т.1., №1. с. 99–109.
7. Базалєєв М. І., Клепиков В. Ф., Литвиненко В. В. Електрофізичні радіаційні технології. Харків: Акта, с. 206 (1998).
8. Донець С. Є., Литвиненко В. В., Прохоренко Є. М. / Термографічний метод діагностики та оцінки ефективності роботи установок для променевого знезараження води // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів», випуск 1 (43), 2021. с. 3–7.

9. Kciuk M., Marciniak B., Mojzych M., Kontek R. / Focus on UV-Induced DNA Damage and Repair—Disease Relevance and Protective Strategies // *Int. J. Mol. Sci.* 2020, 21, 7264; <https://doi.org/10.3390/ijms21197264>.
10. Gibson J., Farnood R., Seto P. Chemical pretreatment of combined sewer overflows for improved UV disinfection. *Water Sci Technol* (2016) 73:375–381. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.447>.
11. Cantwell R. E. , Hofmann R. / Ultraviolet absorption properties of suspended particulate matter in untreated surface waters // *Water Research*. V. 45, Iss. 3, January 2011, Pages 1322–1328 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.10.020>.
12. Клименко В. Г. Загальна гідрологія: навчальний посібник для студентів В. Г. Клименко. Харків, ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2012. 254 с.
13. Бойко Н. І., Макогон А. В. Високовольтна установка імпульсною потужністю 3 МВт для знезараження води у потоці за допомогою наносекундних розрядів у газових бульбках. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 80–83. <https://doi.org/10.15407/techned.2020.05.080>.
14. МУ 3.2.1757-03 «Санітарно-паразитологічна оцінка ефективності. Знезараження води УФ випромінюванням».
15. <https://www.waterlight.pro/uf-znezarazhennya-vody/>.
16. Zhang N., Hu K., Shan B./ Ballast water treatment using UV/TiO₂ advanced oxidation processes: An approach to invasive species prevention // *Chemical Engineering Journal* 243:7–13 <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.12.082>.
17. Guney C. B. / Ballast water problem: Current status and expected challenges // *Mar. Sci. Tech. Bull.* (2022) 11(4): 397–415 <https://doi.org/10.33714/masteb.1162688>.
18. Горбов В. М., Мітенкова В. С., Тимофєєва А. С. Порівняльна оцінка економічної ефективності способів обробки баластних вод / *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. №1(8). 2013. с. 35–44.
19. Turnpenny A. W. H., Coughlan. J. Ng. B., Crews P., Bamber R. N., Rowles P. / Cooling Water Options for the New Generation of Nuclear Power Stations in the UK // Published by: Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD.
20. Тірон-Воробйова Т. Н., Данилян А. Г., Рмановська О. Р. Баластна вода: електрогідродар Юткіна – один із дієвих шляхів щодо її знезараження // *Технології захисту навколишнього середовища*. №4. 2019. с. 67–72 [https://doi.org/10.15589/znp2019.4\(478\).10](https://doi.org/10.15589/znp2019.4(478).10).
21. Маслов І. З., Данилян А. Г., Тірон-Воробйова Н. Б., Романовська О. Р., Бабак А. А. / Установка для очистки баластних вод // *Екологічні науки* №2 (25). 2019. с. 104–108. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-16>.

REFERENCES

1. Dzygar, A. K. (2019). Implementation of the requirements of the international convention on ballast water management on ships of the company OFFSHORE HEAVY TRANSPORT. Modern power plants on transport and technologies and equipment for their maintenance. 10th International Scientific and Practical Conference, September 12–13, Kherson: Kherson State Maritime Academy.
2. Varlan, T. (2023). / Application of ballast water treatment systems and minization of harmful impacts on the marine ecosystem // No. sge16–01: Science for modern man '2023 <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-16-01-019>.
3. Šateikienė, D., Janutėnienė, J. (2012). / Ballast water treatment technologies comparative analysis // *Proceedings of 16th International Conference. Transport Means*.
4. Apetroaei, M. R., Atodiresei, D. V., Rău, I., Apetroaei, G. M., Lilios, G. and Schroder, V. (2018). / Overview on the practical methods of ballast water treatment // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1122. 012035, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1122/1/012035>.

5. Bazaleev, N. I., Klepikov, V. F., Lytvynenko, V. V. (1997). / The simulation and forecasting changes in the physical and chemical properties of materials under the influence of radiation // Reports NAS of Ukraine (4), c. 82–86.
6. Bazaleev, N. I., Klepikov, V. F., Lytvynenko, V. V., Shaliapin, S. M. (2005). / Electrophysical Beam Technologies: A New Concept of Water Disinfection with Ultraviolet Rays./ Science and Innovation. v.1., №1. p.99–109.
7. Bazaleev, N. I., Klepikov, V. F., Lytvynenko, V. V. (1998). Electrophysical radiation technologies. Kharkiv: Acta, p. 206.
8. Donets, S. E., Lytvynenko, V. V., Prokhorenko, E. M. (2021). / Thermographic method for diagnosis and estimation the efficiency of installations for uv ray disinfection of water// Bulletin of Sumy State National Agrarian University. Ser. Mechanization and Automation of Production Processes- v 1 (43). c. 3–7.
9. Kciuk, M., Marciniak, B., Mojzych, M., Kontek, R. (2020). / Focus on UV-Induced DNA Damage and Repair—Disease Relevance and Protective Strategies // Int. J. Mol. Sci, 21, 7264; <https://doi.org/10.3390/ijms21197264>.
10. Gibson, J., Farnood, R., Seto, P. (2016). Chemical pretreatment of combined sewer overflows for improved UV disinfection. Water Sci Technol 73:375–381. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.447>.
11. Cantwell, R. E., Hofmann, R. (2011). / Ultraviolet absorption properties of suspended particulate matter in untreated surface waters // Water Research. V. 45, Iss. 3, January, Pages 1322–1328 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.10.020>.
12. KLymenko, V. G. (2012). Zagalna gidrogeologiya: navchalniy posibnyk dlia studentiv. – Kharkiv. HNU imeni V. N. Karazina, 254 s.
13. Boyko, N. I., Makogon, A. V. (2020). High voltage plant with 3 MW pulse power for disinfection flow of water by nanosecond discharge in gas bubbles. Teknichna elektrodynamika. № 5. p. 80–83. <https://doi.org/10.15407/techned2020.05.080>.
14. MU 3.2.1757-03 “Sanitary and parasitological assessment of effectiveness. Water disinfection with UV radiation”.
15. <https://www.waterlight.pro/uf-znezarazhennya-vody/>.
16. Zhang, N., Hu, K., Shan, B. (2013). / Ballast water treatment using UV/TiO₂ advanced oxidation processes: An approach to invasive species prevention // Chemical Engineering Journal 243:7–13 <https://doi.org/10.1016/j.cej.12.082>.
17. Guney, C. B. (2022). / Ballast water problem: Current status and expected challenges // Mar. Sci. Tech. Bull. 11(4): 397–415 <https://doi.org/10.33714/masteb.1162688>.
18. Gorbov, V. M., Mitienkova, V. S., Tymofeeva, A. S. (2013). The energy efficiency comparative evaluation of ballast water treatment directions // Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy. №1 (8). c. 35–44.
19. Turnpenny, A. W. H., Coughlanю, Jю Ng. B., Crews, P., Bamber, R. N., Rowles, P. / Cooling Water Options forthe New Generation of Nuclear Power Stations in the UK // Published by: Environment Agency, Rio House, Waterside Drive, Aztec West, Almondsbury, Bristol, BS32 4UD.
20. Tiron-Vorobiova, N. B., Danylian, A. G., Romanovska, O. R. (2019). Ballast water: Yutkins electro-hydraulic shock is one of the effective ways to disinfect it // Tekhnologii zahystu navkolyshniogo seredovyscha. №4. p. 67–72 [https://doi.org/10.15589/znp2019.4\(478\).10](https://doi.org/10.15589/znp2019.4(478).10).
21. Maslov, I. Z., Danilyan, A. G., Tiron-Vorobyova, N. B., Romanovska, O. R., Babak, A. A. (2019). / Ballast water treatment plant // Environmental Sciences №2 (25). c. 104–108. <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-2-25-16>.

Lytvynenko V. V., Shaliapin S. M. FEATURES TO OPTIMIZE BALLAST WATER TREATMENT TECHNOLOGY USING ULTRAVIOLET RADIATION

The problems of development and implementation of ballast water disinfection technologies using ultraviolet radiation and advanced oxidation processes are considered. The main water parameters that determine the requirements for the total intensity of radiation sources are analysed. A scheme for forming a disinfection effect is proposed, which takes into account the role of radiation factors, water parameters and reagent activity. The biophysical processes that occur when broad-spectrum ultraviolet radiation acts on microorganisms are analysed. Organizational and technical measures that must be taken into account when implementing these technologies on ships are considered. Using the example of a pilot plant, a list of competencies that ship personnel must master to comply with the standards for the operation of the plant is given. The technical and economic indicators of the ballast water disinfection plant are given, which should be used as a basis when designing the plant for the customer. The design of the plant for ballast water disinfection with ultraviolet radiation is proposed. Methods of controlling the formation of sediment on the surface of ultraviolet radiation sources are described and the method of cleaning them from sediment is proposed. A scheme for cleaning ballast water during pumping into the tank and during de-ballasting is developed. The possibility of modular arrangement of the disinfection system is provided for the purpose of optimal location of equipment in ship's premises. A system for automatic control of ballast water purification technology is described. Directions for improving installations for more complete performance of the functions of neutralizing microorganisms carried by ballast water are indicated.

Key words: ballast water disinfection; ultraviolet radiation; optical characteristics of water; filtration; treatment regulations, technical and economic indicators.

© Литвиненко В. В., Шаляпін С. М.

Статтю прийнято до редакції 25.11.2024

MATEPIAJO3HABCTBO

MATERIALS SCIENCE

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ З УРАХУВАННЯМ РЕКОМЕНДАЦІЙ СТАНДАРТУ ДСТУ EN 1563:2019

Пашинський В. В., д.т.н., доцент, професор ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: v.v.pashinskiy@mipolytech.education, ORCID: 0000-0003-0118-4748;

Пашинська О. Г., д.т.н., старший науковий співробітник, професор ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, провідний науковий співробітник ДОНФТІ ім. О. О. Галкіна НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: elena.pashinska@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7102-1544;

Бойко І. А., к.т.н., доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: igor.boyko@mipolytech.education, ORCID: 0000-0001-7742-4694.

У роботі розглянуті технологічні можливості підвищення межі міцності та відносного подовження високоміцних чавунів з кулястим графітом з урахуванням рекомендацій стандарту ДСТУ EN 1563:2019. В якості основного методу вибрано підвищення вмісту кремнію для отримання феритної матриці, зміцненої по твердорозчинному механізму. З метою забезпечення низької собівартості виробництва, особливу увагу було приділено обґрунтуванню допустимого вмісту фонових та шкідливих домішок з метою використання дешевого комерційного брухту. Розглянуто також питання стабільності механічних характеристик чавуну при коливаннях технологічних параметрів його виробництва. Показано, що основними джерелами варіабельності характеристик є нестабільність результатів обробки металу в ковші при використанні «sandwich»-процесу, а також коливання вмісту фонових та шкідливих домішок у зв'язку з нестабільністю якості металевого брухту. Встановлено, що в дослідженому діапазоні хімічного складу підвищення вмісту магнію та кремнію сприяє одночасному зростанню міцності та пластичності чавуну, тоді як збільшення вмісту марганцю підвищує міцність, але знижує пластичність. Показано, що для отримання відносного подовження $A5 \geq 14\%$ вміст сірки має бути: $S < 0,006$, фосфору: $P < 0,02$, хрому: $Cr < 0,04$. Вміст олова $Sn < 0,008\%$ не створює негативного впливу на механічні властивості високоміцного чавуну. Також встановлено, що при зростанні вмісту кремнію та магнію в чавунах з високим вуглецевим еквівалентом при високій температурі розливання у форми з'являється тенденція до утворення розірваного та зіркоподібного графіту, що приводить до падіння механічних характеристик чавуну. Рекомендовано запровадити додатковий металографічний контроль на наявність у структурі часток цієї морфології.

Ключові слова: високоміцний чавун; кулястий графіт; ферит; перліт; «сендвіч»-процес; відносне подовження; межа міцності; вуглецевий еквівалент.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.084-097

Вступ. Високоміцний чавун як конструкційний матеріал відомий вже більше вісімдесяти років. Перші зразки були отримані у 1943 році, а в 1949 американський інженер та винахідник Кейт Д. Мілліс (Keith Dwight Millis) із співавторами отримав патент США на сам чавун та промислову технологію його отримання [1]. З того часу цей матеріал широко використовується у машинобудуванні. Основною перевагою високоміцного чавуну є поєднання високих ливарних та службових характеристик сірого чавуну з комплексом механічних характеристик, близьких до показників низько- та середньовуглецевих сталей. Це дає можливість отримувати заготовки складної форми з високими механічними характеристиками. Розміри заготовок наближені до кінцевих розмірів виробів, що зменшує об'єм механічної обробки і собівартість виробів.

Високоміцний чавун може вироблятися в електропечах з використанням високої (до 95%) частки вторинної сировини (комерційний сталевий та чавунний брухт та власний оборотний чавунний брухт ливарного підприємства). При застосуванні технології індукційного плавлення газо- та пиловиділення знаходиться на низькому рівні. Крім того, у кінці життєвого циклу виробу з високоміцного чавуну утилізуються повністю шляхом переплаву, вони не містять дефіцитних чи шкідливих компонентів. Це робить даний матеріал

екологічно дружнім і дозволяє знижувати питомі викиди парникових газів протягом життєвого циклу продукції.

Але як конструкційний матеріал, високоміцний чавун має деякі технологічні особливості. Кінцева структура і комплекс властивостей матеріалу формується, зокрема, у процесі порційного модифікування розплаву на різних етапах. Це може бути внесення модифікаторів та нодуляризаторів на розливний жолоб печі, обробка розплаву в ковші й, додатково, у самій ливарній формі при кристалізації відливки. Кінцевий результат також залежить від температурно-часових умов заповнення форми та геометричних параметрів самої деталі. Тому, незважаючи на велику кількість досліджень у напрямку оптимізації комплексу властивостей та технології отримання відливок, для конкретних умов виробництва і параметрів виробу розробка технології виробництва вимагає проведення експериментальних робіт для визначення оптимальних параметрів процесу.

Постановка проблеми. Важливим аспектом отримання виробів з високоміцного чавуну є забезпечення необхідного комплексу властивостей при відносно низькій собівартості виробництва. Ціна відливок масового сортаменту знаходиться в межах 1–3 євро за кілограм готового виробу. Це накладає значні обмеження на пошук шляхів забезпечення комплексу характеристик, які обумовлені замовником, заходи, що пропонуються, мають не тільки не підвищувати собівартість виготовлення відливок, але й, по можливості, знижувати її. Враховуючи високу варіабельність структури та властивостей високоміцного чавуну залежно від коливань параметрів деталей та нестабільності параметрів виробництва, актуальною проблемою є пошук шляхів підвищення механічних властивостей високоміцного чавуну, а також стабільності його структури та властивостей у максимально можливому інтервалі зміни геометричних параметрів відливки. Важливо також знаходити шляхи зниження чутливості матеріалу до технологічно неминучих коливань параметрів процесу виробництва, або виявленню параметрів, які мають найбільший вплив на коливання характеристик кінцевого продукту з метою їх подальшої стабілізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз результатів досліджень вищевказаної проблеми дозволяє виділити кілька принципових підходів до вирішення проблеми підвищення характеристик високоміцного чавуну. Але перед розглядом цих підходів, необхідно наголосити, що зараз основним нормативним документом, який регламентує виробництво високоміцного чавуну з кулястим графітом, в Україні є стандарт ДСТУ EN 1563:2019 [2]. Цей документ є продовженням лінійки європейських стандартів, яка розпочалася зі стандарту EN1563:2011, в якому містилося два важливі положення, що мають вплив на шляхи вирішення проблеми, яка розглядається в даній роботі. По перше, у стандарті фактично знімаються всі обмеження на склад високоміцного чавуну і визначається, що хімічний склад матеріалу та технологія його виробництва (включаючи термічну обробку) вибираються виробником на свій розсуд з метою забезпечення необхідних механічних характеристик, які замовив споживач.

По друге, у стандарті EN1563:2011 у додаток до ферито-перлітних високоміцних чавунів з кулястим графітом (ferritic to pearlitic spheroidal graphite cast irons) було введено поняття феритних чавунів з кулястим графітом з твердорозчинним зміцненням (solid-solution strengthened ferritic spheroidal graphite cast irons). Тільки для феритних чавунів з твердорозчинним зміцненням, стандарт ДСТУ EN 1563:2019 обумовлює значення вмісту таких елементів, як Si, P, Mn, але наведені величини мають характер рекомендацій.

Таким чином, як дослідники, так і виробники високоміцного чавуну мають нормативно підтвержене право на широку експериментальну та інженерну діяльність навіть при виконанні комерційних замовлень. Крім того, виділення в окрему групу феритних висококремнієвих високоміцних чавунів сприяло значному прогресу в їх дослідженні і дозволило отримати важливі наукові та практичні результати.

Аналіз робіт показує, що для отримання чавунів з підвищеною міцністю та пластичністю одночасно використовуються різні підходи. Резервом підвищення механічних властивостей матеріалу без суттєвої зміни технології виплавки є прискорене охолодження за

рахунок використання облицьованих кокілів замість традиційних пісочно-глинистих форм при литті деталей [3]. Технологія має додатковий енерго- та ресурсозберігаючий ефект завдяки відмові від операції термічної розробки та зменшення витратного коефіцієнта металу за рахунок підвищення точності відливки. Проте впровадження такої технології утруднено на підприємствах з автоматичними формувальними лініями. Більш універсальний підхід пов'язаний з удосконаленням складу та технології обробки металу на етапі виплавки. Так, у роботі [4] одночасне підвищення міцності та пластичності перлітних сірих чавунів було досягнуто за рахунок використання високочистих шихтових матеріалів у комбінації з модифікувально-рафінувальним обробленням вихідного розплаву феросіліцій-магній кальцієвою лігатурою у поєднанні з рафінувальним легкоплавким оксидно-фторидним шлаком. Отримані результати дозволяють підвищити не тільки механічні, але і технологічні характеристики, зокрема знизити величину об'ємної усадки та виключити енергоємну операцію термічної обробки відливок. Проте залишається операція легування розплаву міддю і результати роботи не можуть бути безпосередньо перенесені на процеси отримання феритних чавунів з високою пластичністю ($A_5 \geq 15\%$). Тому в роботах [5, 6] колективом авторів було розглянуто питання впливу підвищеного вмісту кремнію на структуру і механічні властивості високоміцних феритних чавунів у поєднанні з використанням високочистої сировини та ефективних комплексних модифікаторів. Встановлено, що запропонована технологія дозволяє отримати у висококремнієвих феритних чавунах, високий комплекс характеристик міцності і пластичності, проте для досягнення максимальних значень раціонально проводити процес економічного гомогенізувально-феритизувального відпалу.

Слід відзначити, що багато дослідників розглядають високоміцні чавуни на феритній основі як перспективну систему для отримання матеріалу, який може мати межу міцності на рівні чавунів на перлітній основі при суттєво більшій пластичності. Основним механізмом зміцнення таких чавунів вважається твердорозчинне зміцнення висококремнієвого фериту [2, 5, 7].

Проте існує думка, що механізм зміцнення має більш складний характер. Наприклад, у роботах [8, 9] досліджена мікроструктура та механічні властивості при випробуванні на розтягнення при кімнатній температурі високоміцних феритних чавунів у діапазоні концентрації кремнію 2,29% до 9,12%. За даними авторів, хоча твердість фериту росте у всьому дослідженому інтервалі, але максимальна міцність досягається при концентрації кремнію 5,0–5,2% і приблизно в цьому ж діапазоні відносно подовження знижується до нульових значень. На думку авторів, це пов'язано, у тому числі, з негативним впливом високих концентрацій кремнію на процес сфероїдизації графіту і підвищення ризику формування так званого розірваного або зіркоподібного графіту.

До схожих висновків приходять автори робіт [10, 11], які також відмічають нелінійний вплив зростання вмісту кремнію на механічні властивості і пов'язують це з його впливом на морфологію графітних часток. Зокрема у [12–14], встановлено, що збільшення вмісту кремнію більше 4,3–4,6% призводить до зниження ступеня сфероїдизації графіту. Зміна морфології графітних часток приводить до того, що оцінки параметрів часток графіту по стандартах ISO 16112:2017 та ISO 945-4-2019 починають суттєво відрізнятися. Дискусійним є питання, який з параметрів форми часток – Roundness Graphite Shape Factor (RSF згідно ISO 945-4-2019) – фактор кулястості форми графіту або Sphericity Graphite Shape Factor (SSF згідно ISO 16112:2017) – фактор сферичності форми графіту, є більш інформативним. На думку авторів [14], параметр SSF більш точно дозволяє оцінити характеристики графітних часток у високоременієвому високоміцному чавуні.

У роботах [15, 16] розглядається вплив хімічного складу металевої феритної матриці чавуну на комплекс механічних властивостей. Аналізується як вплив фонових домішок (мідь, хром) так і вплив цілеспрямованого легування молібденом та ніобієм. Отримані результати свідчать, що завдяки підвищеному запасу пластичності феритної матриці, такі чавуни є перспективною основою для подальшого підвищення комплексу механічних

характеристик шляхом розробки легованих феритних чавунів. Цей підхід заслуговує на увагу, тому що на думку багатьох авторів, зокрема [11, 12–14], підвищення вмісту кремнію вище 5–5,3% не дає подальшого зростання характеристик у зв'язку з сильним падінням пластичності.

Таким чином, технологи та виробничий персонал виконуючи вимоги стандарту ДСТУ EN 1563:2019 мають у своєму розпорядженні широкий арсенал методів впливу на кінцеві властивості високоміцного чавуну і їх вибір залежить від технологічних можливостей конкретного виробництва та співвідношення собівартість/властивості, при якій виконання замовлення є економічно вигідним і ціна виробу є конкурентоспроможною.

Мета та задачі дослідження. Метою даного дослідження є розробка економічної технології виробництва високоміцного чавуну з кулястим графітом, яка забезпечить отримання межі міцності в інтервалі 450–600 МПа при відносному подовженні A_5 в інтервалі 20–10% при мінімізації сумарних виробничих витрат у технологічному ланцюгу виробництва.

Для досягнення мети дослідження необхідно було вирішити наступні задачі:

- визначити базовий склад високоміцного чавуну для його подальшого змінення залежно від вимог замовника до механічних характеристик готової продукції;
- обґрунтувати допустимий рівень вмісту фонових та шкідливих домішок, при яких досягається заданий рівень механічних характеристик;
- дослідити ступінь варіативності характеристик чавуну та технологічних параметрів його виробництва з метою виявлення основних факторів, які збільшують нестабільність характеристик матеріалу;
- дослідити особливості формування мікроструктури високоміцного чавуну при вибраних інтервалах коливання його хімічного складу та технологічних параметрів виробництва.

Матеріал та методи дослідження. Виплавку дослідних чавунів проводили в електричній середньочастотній індукційній печі ємністю 5000 кг. Шихта для виплавки формувалась зі сталевих брухту трьох категорій залежно від стабільності хімічного складу і присутності фонових та шкідливих домішок, сталевих відходів низьковуглецевої листової сталі («висічки»), передільного чавуну та також власного оборотного брухту високоміцного чавуну. Для корекції вмісту вуглецю та кремнію використовували високовуглецеву добавку Carburit, а також карбід кремнію та феросиліцій. Піч обладнана пристроєм для подачі модифікатора на жолоб печі при випуску металу в ківш. Контроль температури в печі проводили з використанням пірометра HERAEUS DIGITEMP-E, хімічний склад контролювали методом оптико-емісійного аналізу на OES-аналізаторі GNRS9 ATLANTIS, у ході ведення плавки для оперативного контролю вмісту вуглецю та кремнію використовували електрохімічний експрес-аналізатор DigLab, в якості допоміжного методу оцінки відливали клинову пробу.

Обробку розплаву в ковші для формування структури високоміцного чавуну проводили по технології «sandwich»-процесу в ковші ємністю 500 кг з використанням сфероїдизуючого реагенту «6Mg – FeSi» та модифікатора системи Fe-Si-Ba. Після закінчення обробки проводили вимір стартової температури розливання для кожного ковша погрузною термопарою AJAY SYSCON TEMPSTICK 429 S. Пробу на визначення хімічного складу відбирали в середині розливки ковша, тоді ж відливали пробу для визначення механічних характеристик згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN 1563:2019.

Оцінку мікроструктури (визначення характеристик графітної фази) проводили на оптичному металографічному мікроскопі METKON IMM 902 згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 945-1:2022. Оцінку співвідношення ферит/перліт проводили в автоматичному режимі з використанням програмного забезпечення мікроскопа.

Вимірювання механічних характеристик при випробуванні на розтягнення на універсальній випробувальній машині SHIMADZU AG-X PLUS проводили згідно з вимогами

стандарту ДСТУ EN ISO 6892-1:2022, підготовка зразків – згідно ДСТУ EN 1563:2019. Вимірювання твердості проводили методом Бринеля на твердомірі QNESS Q250CS згідно з вимогами стандарту ДСТУ EN ISO 6506-4:2019.

Основні результати та їх обговорення. Основною маркою високоміцного чавуну, яка була вибрана як стартова точка для визначення нового складу був ферито-перлітний високоміцний чавун EN-GJS 500-7. На основі попереднього досвіду виробництва для отримання відливок з товщиною стінки 10–50 мм по технології, описаній вище, задовольнити вимогам стандарту ДСТУ EN 1563:2019 до цієї марки можна було при підтриманні хімічного складу чавуну після процедури обробки в ковші у межах: C = 3,4–3,6%, Si = 2,3–2,6%, Mg = 0,03–0,045%, Mn < 0,4%. Вміст S та P визначався співвідношенням у шихті брухту різних категорій та становило в середньому S = 0,11%, а P = 0,027%. Такий склад при використанні технології модифікування, яка описана раніше, дозволяло отримувати межу міцності R_m чавуну не нижче 500 МПа при відносному подовженні A₅ не нижче 7% у 95,7% плавок.

Слід вказати, що рівень 4,3% невідповідних плавок негативно відбивалися на економічних показниках виробничого процесу. Крім того, у портфелі замовлень все більшу частину стали складати відливки з марок з підвищеною пластичністю, таких як EN-GJS 400-15, EN-GJS 450-10, EN-GJS 450-18, EN-GJS 500-14, EN-GJS 600-10. Тому виникла необхідність визначення нового базового складу, який дозволив би отримувати підвищену пластичність металевої матриці. Вирішення цієї задачі дозволило б розширити спектр замовлень, які могли бути прийняті до виробництва та знизити і кількість браку при виконанні замовлень на марку EN-GJS 500-7, яка є одною з основних у портфелі замовлень. Незважаючи на те, що стандарт ДСТУ EN 1563:2019 дозволяє використовувати термічну обробку для підвищення комплексу характеристик чавуну, у такому випадку цей технологічний прийом не міг бути застосований з міркувань собівартості продукції.

В якості основного напрямку зміни хімічного складу базуючись на рекомендаціях стандарту ДСТУ EN 1563:2019 та результатах робіт [5, 6], було прийнято рішення про підвищення вмісту кремнію в чавуні при одночасному зниженні вмісту сірки та фосфору. Було проведено серію дослідних плавок. Приклади варіантів складу, які дозволили отримати позитивні результати, наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад та механічні властивості експериментальних плавок

№ плавки	Вміст елементів, % ваг.							Механічні властивості	
	C	Si	Mn	Mg	P	S	C екв.	R _m , МПа	A ₅ , %
GJS 500-7	3,63	2,48	0,3	0,042	0,04	0,011	4,48	585	10
1	3,21	3,21	0,19	0,036	0,021	0,009	4,28	506	16
2	3,49	3,43	0,37	0,037	0,02	0,006	4,63	566	14
3	3,51	3,53	0,44	0,033	0,018	0,006	4,69	610	18

У першому рядку наведений приклад складу, який використовувався для отримання марки EN-GJS 500-7. Потрібно вказати, що відсутність необхідності отримувати високий рівень відносного подовження (A₅ ≥ 7%) дозволяють працювати на більш дешевій шихті, при використанні якої ми маємо підвищений вміст сірки та фосфору. Це є перевагою марки з погляду собівартості. Проте вибираючи склад матеріалу, технологи повинні враховувати цілий ряд обмежень. Зокрема, необхідність гарантованого отримання межі міцності на рівні не нижче 500 МПа вимагає підвищувати вміст марганцю для збільшення частки перліту в структурі матриці. З тих же міркувань доводиться знижувати вміст кремнію для зменшення його впливу, як феритизатора. Але у цьому випадку для підтримання значень вуглецевого еквівалента матеріалу в діапазоні 4,2–4,6% (що забезпечує максимальні ливарні властивості)

необхідно підвищувати вміст вуглецю. Все це призводить до зниження пластичності матеріалу і для забезпечення значень $A_5 \geq 7\%$ необхідно обмежувати вміст сірки та фосфору. Таким чином, у технологів залишається невеликий простір для керування складом, у випадках коли значення механічних властивостей марки EN-GJS 500-7 потрібно отримати у відливках з різними геометричними параметрами (товщиною стінки).

У подальших експериментах вивчали можливість отримання більш високої пластичності сплаву, щоб гарантовано виконувати вимоги стандарту для марки EN-GJS 500-7, а також мати можливість випускати вироби з марок із підвищеною пластичністю.

Як видно з даних табл. 1, для базової плавки 1 збільшення вмісту кремнію, зниження вмісту вуглецю та марганцю дозволили гарантовано отримати високу пластичність матеріалу, але значення межі міцності наблизилися до нижньої границі, яка задається стандартом. Тому цей варіант складу надалі був взятий за основу для розробки базового сплаву для марок EN-GJS 400-15, EN-GJS 450-10, EN-GJS 450-18. Експерименти показали, що вміст сірки та фосфору для цього варіанту складу може бути відносно високим, що дозволяє використовувати більш дешевий металевий брухт.

Також було встановлено, що для отримання базового складу, який буде придатним для отримання марок EN-GJS 500-14, EN-GJS 600-10 необхідно одночасно підвищити вміст таких елементів, як вуглець, кремній, марганець при одночасному зниженні вмісту сірки та фосфору (плавка №2). Правильність такого підходу підтверджують результати випробувань зразків плавки №3, в якій були отримані максимальні в даній серії експериментів значення межі міцності та відносного подовження одночасно. Проте в складі плавки №3 значення вуглецевого еквівалента стають близькими до верхньої межі оптимальності, що потребує проведення додаткових досліджень можливого впливу цього факту на структуру та властивості чавуну при коливаннях виробничих параметрів у ході серійного виробництва.

Таким чином у результаті проведених експериментів були запропоновані нові базові склади для подальшої оптимізації для отримання марок високоміцних та високопластичних чавунів з використанням рекомендації стандарту ДСТУ EN 1563:2019. Але, як показує виробничий досвід, для отримання гарантованих результатів необхідно провести дослідження стабільності структури та властивостей матеріалу при неминучому коливанні параметрів виробництва. Діапазон цих коливань визначається цілою низкою об'єктивних факторів, включаючи коливання складу сировини, коливання параметрів виробництва відливок (параметри пісочно-глиняних форм, коливання температури розливки, різний час перебування в модифікованому стані перших та останніх порцій металу в ковші та ін.) та суб'єктивних (кваліфікація персоналу та його психофізіологічний стан). Як правило, одночасний вплив на результат процесу великої кількості факторів, які змінюються випадковим чином незалежно один від одного, призводить до розкиду вхідних параметрів по нормальному закону розподілу випадкової величини. Тому надалі дослідження були спрямовані на накопичення та обробку даних щодо стабільності характеристик продукції та виявлення факторів, які в найбільшій мірі впливають на порушення цієї стабільності.

У таблицях 2 та 3 як приклад, приведені характеристики процесу (хімічний склад та температура початку розливання) і механічні характеристики зразків чавуну марки EN-GJS 450-10, відлитих із кожного з 8 ковшів ємністю 500 кг, на які була розлита плавка масою 4000 кг. Коефіцієнт варіації величини розраховували по формулі (1)

$$COV = \frac{Max - Min}{Average} \cdot 100\% \quad (1)$$

Таблиця 2 – Варіативність параметрів процесу розливки плавки та складу матеріалу

№ ковша	T_p , °C	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Mg [%]	Cr [%]	Cu [%]	Sn [%]
1	1429	3,449	3,424	0,209	0,009	0,029	0,0438	0,049	0,055	0,006
2	1432	3,448	3,427	0,209	0,008	0,028	0,0383	0,048	0,055	0,006
3	1439	3,508	3,433	0,193	0,008	0,028	0,0454	0,045	0,093	0,008
4	1440	3,445	3,359	0,192	0,007	0,028	0,0357	0,045	0,092	0,007
5	1428	3,528	3,413	0,196	0,009	0,029	0,0453	0,045	0,093	0,008
6	1425	3,469	3,419	0,194	0,007	0,028	0,0365	0,044	0,092	0,008
7	1430	3,525	3,349	0,199	0,007	0,028	0,0377	0,045	0,093	0,008
8	1422	3,515	3,35	0,195	0,007	0,028	0,0376	0,044	0,092	0,008
Характеристики варіативності										
Максимум <i>Max</i>	1440	3,528	3,433	0,209	0,009	0,029	0,0454	0,049	0,093	0,008
Мінімум <i>Min</i>	1422	3,445	3,349	0,192	0,007	0,028	0,0357	0,044	0,055	0,006
Середнє <i>Average</i>	1431	3,487	3,391	0,201	0,008	0,029	0,041	0,047	0,074	0,007
COV, %	1,26	2,38	2,48	8,48	25,00	3,51	23,92	10,75	51,35	28,57

Таблиця 3 – Варіативність характеристик матеріалу

№ ковша	Межа текучості $R_{0,2}$, Мпа	Межа міцності R_m , Мпа	Відносне подовження A_5 , %
1	418	582	13,1
2	418	549	10,9
3	358	584	10,0
4	388	543	12,2
5	411	591	13,3
6	439	560	10,1
7	440	573	13,4
8	389	508	11,9
Характеристики варіативності			
Максимум <i>Max</i>	440	591	13,4
Мінімум <i>Min</i>	358	508	10,0
Середнє <i>Average</i>	399	549	11,68
COV, %	20,59	15,22	28,69

Аналізуючи дані таблиці 3, можна зробити висновок, що, хоча вся плавка відповідала вимогам до марки EN-GJS 450-10, але варіативність характеристик чавуну є дуже високою. Для характеристик міцності це не є критичним, тому що їх значення відповідають вимогам стандарту з великим запасом ($R_{0,2} \geq 320$ МПа, $R_m \geq 450$ МПа) тоді як мінімальні значення відносного подовження A_5 для зразків від ковшів 2, 3, 6 знаходяться, фактично, на межі допустимого, при чому варіативність показника відносного подовження є максимальною (28, 69%) серед всіх механічних характеристик.

З аналізу даних таблиці 2 видно, що серед параметрів процесу розливки найвищий коефіцієнт варіації мають такі показники, як вміст Cu (51,35%), Sn (28,57%), S (25%), Mg (25,92%). Але проблема полягає в тому, що фізичні причини коливання таких елементів як Cu та Sn у металі однієї плавки відсутні і є наслідком загальної невизначеності процесу

аналізу хімічного складу. Коливання вмісту Mg та S, навпроти, є наслідком нестабільності протікання «sandwich»-процесу в ковші внаслідок коливань температури випуску металу та параметрів потоку металу при зміні його рівня в печі. Тому було зроблено висновок про необхідність стабілізації процесу обробки металу в ковші для зменшення варіативності технологічного процесу в цілому.

Достовірний статистичний аналіз багатофакторного процесу виробництва високоміцного чавуну потребує накопичення значного масиву інформації. На наступному етапі були визначені характеристики варіативності процесу виробництва марки EN-GJS 450-10 за результатами 30 плавок протягом 10 тижнів. З даних таблиці 4 видно, що варіативність процесу у часі значно вища, ніж у межах однієї плавки (див. табл. 2 та 3). Це пов'язано, насамперед із коливаннями складу металеві шихти. Деяко збільшилася і варіативність «sandwich»-процесу, яку оцінювали по варіативності вмісту магнію. Але внаслідок правильного вибору базового складу при розрахунку шихти, мінімальні значення механічних властивостей не вийшли за межі вимог стандарту.

Проте слід зазначити, що значна частина плавок (47%) мала високі значення механічних властивостей і, фактично, відповідала вимогам стандарту до марки EN-GJS 500-14. Відповідні характеристики варіативності плавок EN-GJS 450-10 та EN-GJS 500-14 наведені у таблиці 5. Аналіз даних дозволяє зробити висновок, що показники варіативності хімічного складу двох марок чавунів практично не відрізняються. Практично однакові характеристики варіативності й у межі міцності. Фактично, різниця між марками полягає тільки у значенні відносного подовження. Слід зробити висновок, що формування такої характеристики, як пластичність високоміцного чавуну вказаного базового складу не залежить від його коливань у досліджених межах. Це підтверджується результатами парного кореляційного аналізу зв'язку значень відносного подовження та хімічних елементів, що входять до складу чавуну. Всі коефіцієнти є статистично незначимими на рівні значущості 0,95.

Таблиця 4 – Узагальнені показники варіативності процесу виробництва чавуну EN-GJS 450-10

Показник	Хімічний склад металу								Механічні властивості	
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Mg [%]	Cr [%]	Cu [%]	R _m , Mpa	A ₅ , %
Характеристики варіативності										
Максимум <i>Max</i>	3,736	3,643	0,241	0,010	0,038	0,0531	0,064	0,099	597	20,88
Мінімум <i>Min</i>	3,400	3,020	0,164	0,007	0,028	0,0332	0,036	0,027	486	10,01
Середнє <i>Average</i>	3,513	3,274	0,200	0,008	0,033	0,041	0,046	0,065	535	14,35
COV, %	9,56	19,03	38,51	36,00	30,00	48,11	61,27	111,05	20,82	75,74

Таблиця 5 – Порівняння показників варіативності процесу виробництва чавуну плавок, що відповідають марці EN-GJS 450-10 та EN-GJS 500-14

Показник	Хімічний склад металу								Механічні властивості	
	C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]	P [%]	Mg [%]	Cr [%]	Cu [%]	R _m , Mpa	A ₅ , %
Характеристики варіативності EN-GJS 450-10										
Максимум <i>Max</i>	3,702	3,424	0,240	0,010	0,038	0,0531	0,061	0,092	597	13,7
Мінімум <i>Min</i>	3,408	3,020	0,167	0,007	0,028	0,0338	0,036	0,027	486	10,0

Середнє <i>Average</i>	3,519	3,230	0,208	0,008	0,032	0,041	0,048	0,064	531	12,2
COV, %	8,34	12,51	35,04	35,89	30,97	47,25	52,08	101,3	20,9	29,8
Характеристики варіативності EN-GJS 500-14										
Максимум <i>Max</i>	3,736	3,643	0,241	0,009	0,038	0,0530	0,064	0,099	577	20,9
Мінімум <i>Min</i>	3,400	3,025	0,164	0,007	0,028	0,0332	0,036	0,027	502	14,1
Середнє <i>Average</i>	3,508	3,312	0,193	0,008	0,034	0,042	0,044	0,065	538	16,2
COV, %	9,58	18,66	39,99	24,06	29,20	47,35	64,09	110,0	13,9	42,2

Проте, графіки парних залежностей вказують на наявність певних тенденцій у впливі окремих елементів на значення пластичності (рис. 1). На рис. 1а, б наведені залежності відносного подовження від вмісту елементів, які мають максимальний позитивний вплив на пластичність, на рис. 1 в, г – максимально негативний вплив. При подальшій оптимізації базового складу чавуну слід рекомендувати підвищувати вміст кремнію та магнію, тим більше, що вони мають позитивне значення коефіцієнта парної кореляції і з межею міцності. Відповідно слід знижувати вміст марганцю та хрому у тих випадках, коли необхідне підвищення відносного подовження.

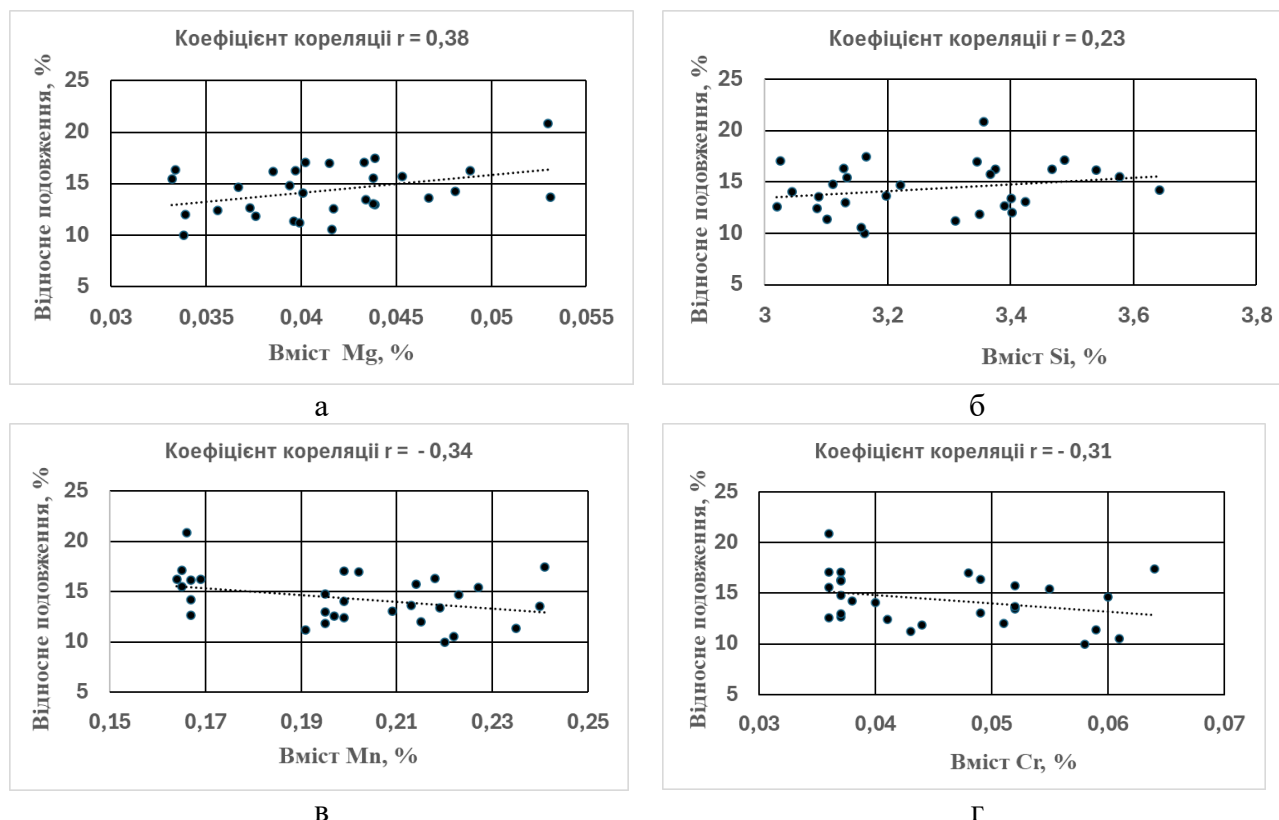


Рисунок 1 – Вплив елементів хімічного складу чавуну на значення відносного подовження
а – вплив магнію; б – вплив кремнію; в – вплив марганцю, г – вплив хрому

Отримані дані не протирічать результатам, отриманим іншими дослідниками. Зниження вмісту хрому технологічно може бути реалізовано шляхом використання лому низьковуглецевих нелегованих марок сталей. При використанні власного необхідно слідкувати за збереженням його чистоти щодо вмісту шкідливих домішок сірки, фосфору, кольорових металів (мідь, олово) та хрому при багаторазовому обертанні його в технологічному процесі.

Проведені дослідження підтвердили, що підвищення вмісту кремнію вище 3% є ефективним засобом отримання чавунів з одночасно високими значеннями межі міцності та відносного подовження. Проте, стабільне отримання високих показників пластичності високоміцного чавуну неможливо тільки шляхом регламентації та стабілізації хімічного складу чавуну. Зміна хімічного складу призводить до зміни морфології графітних часток та структури металевої матриці. Металографічні дослідження показали, що чавуни з базовими складами, які відповідають табл. 1, мають переважно феритну матрицю (рис. 2 б) з графітними частками з високим ступенем сфероїдизації (більше 80%) з переважаючою формою графітних часток типу VI по ДСТУ EN ISO 945-1:2022 (рис. 2 а). Приклади таких структур наведені на рисунку 2. Проте, у процесі роботи було виявлено, що у висококремнієвих чавунах вуглецевий еквівалент як правило, знаходиться на верхній межі оптимальних значень (4,6–4,7%) і при одночасному отриманні вмісту магнію після обробки в ковші на рівні 0,04% і вище можливе протікання небажаного явища формування розірваних та зіркоподібних часток графіту (див. рис. 3). Розірвана форма легко ідентифікується і фіксується як відхилення, тоді як зіркоподібні частки (рис. 3 б) при невеликих збільшеннях мікроскопа ($\times 100$) можуть ідентифікуватися програмою автоматичної обробки зображень як сферичні частки форми типу VI (рис. 3 а), що призводить до неправильної оцінки мікроструктури, яка фактично є небажаною. Оскільки формування графітних часток такого типу призводить, як правило до зниження і міцності і пластичності одночасно, то своєчасне виявлення відхилень і корекція технології виробництва дозволить знизити втрати від барку і буде запобігати випуску невідповідної продукції.

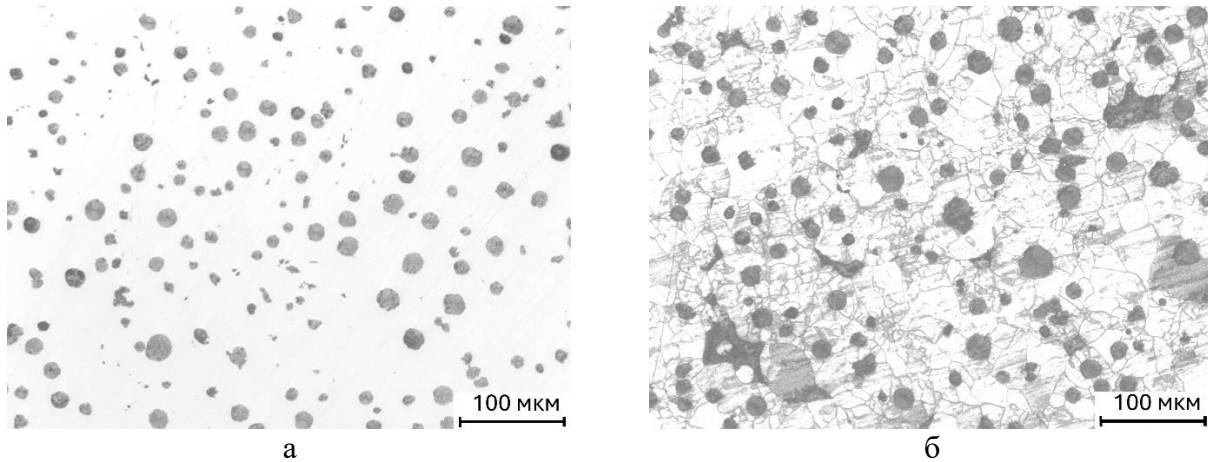


Рисунок 2 – Мікроструктура високоміцного феритного чавуну базового хімічного складу 2 (табл. 1), $\times 100$ а – форма графітних часток; б – структура матриці (травлення 4% розчином HNO_3 в етанолі)

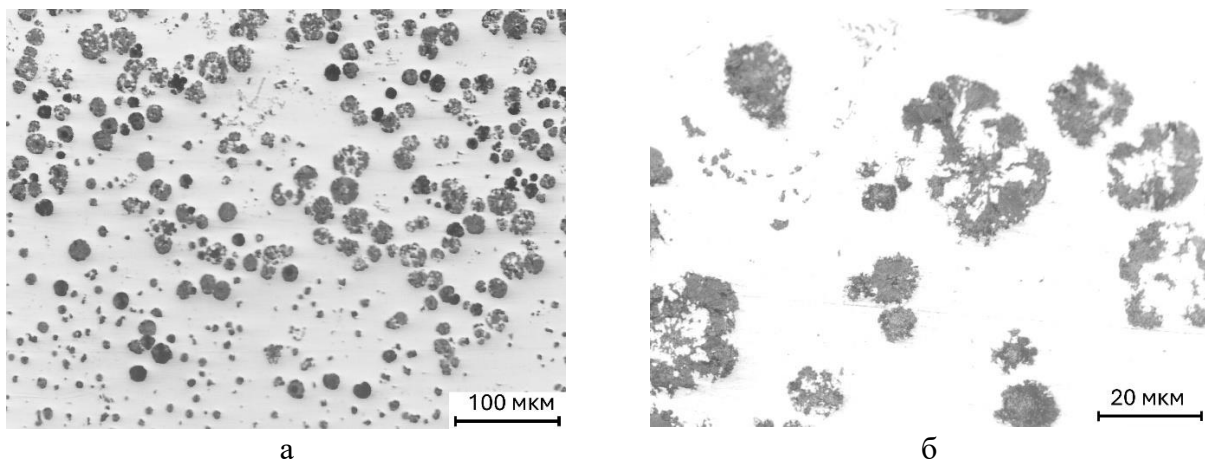


Рисунок 3 – Мікроструктура високоміцного феритного чавуну з виділеннями зіркоподібного графіту, а – форма графітних часток, $\times 100$; б – форма графітних часток, $\times 500$

Для запобігання утворення графітних часток такої морфології потрібно слідкувати за тим, щоб вуглецевий еквівалент та температура металу в ковші при початку розливання не перевищували вказані в інструкції. Персонал лабораторії металографії повинен пройти додатковий інструктаж з розпізнавання часток зіркоподібного фериту.

Таким чином, у результаті проведення роботи були визначені технологічні параметри, які дозволили гарантувати дотримання вимог стандарту щодо значень відносного подовження при виробництві високоміцного чавуну марки EN-GJS 500-7 у 99,2% плавок, тобто знизити кількість отримання браку при виробництві продукції з цієї марки на 3,5%. Економічний ефект при цьому складає 1200–1500 грн/т лиття в залежності від ціни литих деталей.

Значно більша ефективність від впровадження результатів досліджень досягається при виконанні замовлень на вироби з марок EN-GJS 450-10 та EN-GJS 500-14. Оскільки при використанні базової технології виплавки неможливо було гарантувати отримання потрібних значень відносного подовження без проведення додаткової термічної обробки литих деталей, а для її проведення не було відповідного термічного обладнання, то не було можливості приймати замовлення на таку продукцію. Впровадження рекомендацій роботи дозволяє розширити портфель замовлень підприємства та отримати додатковий економічний ефект за рахунок випуску продукції з більшою доданою вартістю.

Висновки. У результаті проведених досліджень були отримані дані, які дозволили зробити наступні висновки:

– З урахуванням рекомендації стандарту ДСТУ EN 1563:2019 і для отримання підвищеної межі міцності та відносного подовження одночасно був запропонований підхід до вибору складу чавуну з підвищеним вмістом кремнію в діапазоні 3,0–3,6% при одночасній корекції вмісту вуглецю таким чином, щоб значення вуглецевого еквівалента були в діапазоні 4,2–4,7%. Додатковим інструментом підвищення міцності може бути збільшення вмісту марганцю до 0,4%, але при збільшенні його вмісту може спостерігатися зниження значень відносного подовження.

– Допустимий рівень вмісту фонових та шкідливих домішок вибирається виходячи з вимог до пластичності матеріалу. Для отримання відносного подовження $A_5 \geq 14\%$ вміст сірки має бути: $S < 0,006$, фосфору: $P < 0,02$, хрому: $Cr < 0,04$. Вміст олова $Sn < 0,008\%$ не створює негативного впливу на механічні властивості високоміцного чавуну.

– Найбільш варіативною характеристикою чавуну вказаного складу є значення відносного подовження, для якого коефіцієнт варіації COV може досягати 42%. Найбільш варіативним параметром процесу при розливці плавки після порційної обробки металу в ковшах є вміст магнію, що може бути пов'язано з нестабільністю протікання «sandwich»-процесу при обробці в ковші. У довгостроковій перспективі основним джерелом варіативності є коливання вмісту фонових та шкідливих домішок у складі чавуну, що пов'язано з нестабільністю складу металевої шихти, зокрема комерційного брухту. Тому для отримання вузького діапазону коливання механічних характеристик потрібно удосконалення операції обробки металу в ковші «sandwich»-процесом та селекція джерел постачання брухту.

– Особливістю формування мікроструктури високоміцного чавуну при вибраних інтервалах коливання його хімічного складу та технологічних параметрів виробництва є підвищений ризик формування розірваних та зіркоподібних часток графіту при одночасному збігу таких факторів, як високий вуглецевий еквівалент, високий вміст магнію та висока температура розливання металу у форми. Формування такої морфології графіту призводить до зниження механічних характеристик. Попередження цього явища потребує більш жорсткої регламентації верхнього рівня вищевказаних параметрів.

– Впровадження результатів роботи дозволило знизити рівень випуску невідповідної продукції з чавуну марки EN-GJS 500-7 на 3,5% та отримати додатковий економічний ефект

внаслідок розширення пакета замовлень на випуск продукції з марок EN-GJS 450-10 та EN-GJS 500-14 з більшою доданою вартістю.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення раціонального верхнього рівня вмісту кремнію, як найбільш дешевого легуючого елемента в чавуні. Також перспективним є проведення досліджень у напрямку мікролегування високоміцного феритного чавуну сильними карбідоутворюючими елементами (V, Nb, Ti, Mo) з метою додаткового зміцнення феритної матриці. З погляду удосконалення технології необхідне проведення досліджень з удосконалення реалізації «sandwich»-процесом. З погляду розвитку методів контролю процесу потрібно удосконалення методики оцінки наявності в структурі небажаних форм графітних часток.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Patel, Shailesh. "A century of discoveries, inventors, and new nickel alloys". *JOM: Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 58 (9). Springer Boston: 18–20. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0076-y>.
2. ДСТУ EN 1563:2019 Литво. Чавун з кулястим графітом (EN 1563:2018, IDT). Розробник: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ»). 2019 р. 47 с.
3. Бубликов В. Б., Нарівський А. В., Бачинський Ю. Д., Технологія отримання тонкостінних виливків з високоміцного чавуну в облицьованих кокілях з використанням внутрішньоформового модифікування розплаву. *Метал та лиття України.*, vol. 29, 2021. №1, с. 46–53. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>.
4. Бубликов В. Б., Бачинський Ю. Д., Нестерук О. П. Одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними та механічними властивостями. *Процеси лиття*. 2024. №1 (155). с. 4–13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003>.
5. Бубликов В. Б., Нарівський А. В., Бачинський Ю. Д., Ясинський О. О. Легований кремнієм високоміцний чавун та його застосування. *Процеси лиття*. 2020. №1 (139). с. 20–29.
6. Бубликов В. Б., Нарівський А. В., Бачинський Ю. Д., Нестерук О. П. Розвиток технологій одержання високопластичних високоміцних чавунів феритного класу. *Метал та лиття України.*, vol. 30, 2022. №3, с. 72–78. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.072>.
7. Lutz Horbach, Jiali Zhang, Tobias Sedlatschek, Felix Weber and oth. The effect of silicon on critical resolved shear stress of solid solution strengthened ferritic ductile iron. *Materials&Design*. 244 (2024) 113130. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113130>.
8. Urko de la Torre Rodolfo González-Martínez Jacques Lacaze Jon Sertucha Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part I – Microstructure *Materials Science and Engineering: A* Volume 712, 17 January 2018, Pages 794–802 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.050>.
9. Rodolfo González-Martínez, Urko de la Torre, André Jacques Lacaze, Ebel Jon Sertucha. Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part II – Mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A* Volume 712, 17 January 2018, Pages 803–811 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.051>.
10. Pashynskiy V. V., Pashynskaya O. G., Boyko I. O. Structure aspects of mechanical properties of ductile iron formation/ International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 1.p. 106–109. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-32>.
11. Daniel Franzen, Bjoörn Pustal and Andreas Buhrig-Polaczek. Influence of graphite-phase parameters on the mechanical properties of high-silicon ductile iron. *International Journal of Metalcasting*. Volume 17, Issue 1, 2023. Pages 4–21 <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00761-5>.

12. Stan S. C., Chisamera M., Riposan I., Neacsu E. L. and Cojocaru A. M. Structure Characteristics of Silicon Alloyed Ductile Cast Iron. 7th International Conference on Advanced Materials and Structures – AMS 2018 IOP Publishing IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* 416 (2018) 012077 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/416/1/012077>.

13. Riposan I., Stan S. Graphite Compactness Degree and Nodularity of High-Si Ductile Iron Produced via Permanent Mold versus Sand Mold Casting. *Materials* 2022, 15, 2712. <https://doi.org/10.3390/ma15082712>.

14. Riposan I., Anca D., Stan I., Chisamera M., Stan S. Graphite Nodularity Evaluation in High-Si Ductile Cast Irons. *Materials* 2022, 15, 7685. <https://doi.org/10.3390/ma15217685>.

15. Alhussein A., Risbet M., Bastien A., Chobaut J. P. and oth. Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron *Materials Science and Engineering: A* Volume 605, 27 May 2014, Pages 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.057>.

16. Márcio Medeiros de Magalhães, Guilherme Vieira Braga Lemos, André Froehlich, Henrique Piaggio and oth. Microstructure and mechanical properties of SiMo ductile cast iron alloys with varied Mo and Nb contents. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 30, May–June 2024, Pages 6301–6308. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.029>.

REFERENCES

1. Patel, Shailesh (September 2006). "A century of discoveries, inventors, and new nickel alloys". *JOM: Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. 58 (9). Springer Boston: 18–20. <https://doi.org/10.1007/s11837-006-0076-y>.

2. DSTU EN 1563:2019 (2019) Lytvo. Chavun z kulyastym graphytom (EN 1563:2018, IDT). Rozrobnyk DP «Ukraynskyi naukovo-doslydnyi s navchalnyi tcentr problm standaryzatsyi, srertyfykatsyi ta yakosti (DP «UkrNDTS»)). 47 p.

3. Bublykov, V. B., Naryvskiy, A. V., Bachynskiy, Y. D. (2021). Technolohiya otrymannya tonkostynnykh vylyvkyv x vysokomytsnogo chavuny v oblytsovanykh kokylyakh z vykorystanniam vnutyryshnyoformovogo madyfykyvannya rozplavu. *Metal ta lyttya Ukrainy*. vol. 29, #1, p. 46–53. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>.

4. Bublykov, V. B., Bachynskiy, Y. D., Nesteruk, O. P. (2024). Oderzhannya vysokomytsnykh chavunyv perlitnogo klasu z pydvyschenymy technologichnymy ta mechanichnymy vlastyvostyamy. *Protsesy Lyttya* #1 (155). p. 4–13. <https://doi.org/10.15407/plit2024.01.003>.

5. Bublykov, V. B., Naryvskiy, A. V., Bachynskiy, Y. D., Yasynskiy, O. O. (2020). Legovanyi kremnyem vysokomytsnyi chavun ta yogo zastosuvannya. *Protsesy Lyttya*. #1 (139). p. 20–29.

6. Bublykov, V. B., Naryvskiy, A. V., Bachynskiy, Y. D., Nesteruk, O. P. (2022). Rozvytok technology oderzhannya vysokoplastychnykh vysokomytsnykh chavunyv ferytnogo klacu. *Metal ta lyttya Ukrainy* vol. 30, #3, p. 72–78. <https://doi.org/10.15407/steeltcast2022.03.072>.

7. Lutz Horbach, Jiali Zhang, Tobias Sedlatschek, Felix Weber and oth. (2024). The effect of silicon on critical resolved shear stress of solid solution strengthened ferritic ductile iron. *Materials&Design*. 244 113130. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113130>.

8. Urko de la Torre Rodolfo González-Martínez Jacques Lacaze Jon Sertucha (2018). Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part I – Microstructure *Materials Science and Engineering: A* Volume 712, 17 January 2018, Pages 794–802 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.050>.

9. Rodolfo González-Martínez, Urko de la Torre, André Jacques Lacaze, Ebel Jon Sertucha. (2018). Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons. Part II – Mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A* Volume 712, 17 January, Pages 803–811 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.051>.

10. Pashynskiy, V. V., Pashynskaya, O. G., Boyko, I. O. (2023). Structure aspects of mechanical properties of ductile iron formation/ International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 29–30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 1.p. 106–109. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-32>.
11. Daniel Franzen, Bjoörn Pustal and Andreas Buhrig-Polaczek (2023). Influence of graphite-phase parameters on the mechanical properties of high-silicon ductile iron. *International Journal of Metalcasting*. Volume 17, Issue 1, 2023. Pages 4–21 <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00761-5>.
12. Stan, S. C., Chisamera, M., Riposan, I., Neacsu, E. L. and Cojocaru A. M. (2018). Structure Characteristics of Silicon Alloyed Ductile Cast Iron. 7th International Conference on Advanced Materials and Structures – AMS 2018 IOP Publishing IOP Conf. Series: *Materials Science and Engineering* 416 012077 <https://doi.org/10.1088/1757-899X/416/1/012077>.
13. Riposan, I., Stan, S. (2022). Graphite Compactness Degree and Nodularity of High-Si Ductile Iron Produced via Permanent Mold versus Sand Mold Casting. *Materials* 2022, 15, 2712. <https://doi.org/10.3390/ma15082712>.
14. Riposan, I., Anca, D., Stan, I., Chisamera, M., Stan, S. (2022). Graphite Nodularity Evaluation in High-Si Ductile Cast Irons. *Materials* 2022, 15, 7685. <https://doi.org/10.3390/ma15217685>.
15. Alhussein, A., Risbet, M., Bastien, A., Chobaut, J. P. and oth. (2014). Influence of silicon and addition elements on the mechanical behavior of ferritic ductile cast iron *Materials Science and Engineering: A* Volume 605, 27 May 2014, Pages 222–228 <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.057>.
16. Márcio Medeiros de Magalhães, Guilherme Vieira Braga Lemos, André Froehlich, Henrique Piaggio and oth. (2024). Microstructure and mechanical properties of SiMo ductile cast irons alloys with varied Mo and Nb contents. *Journal of Materials Research and Technology* Volume 30, May–June 2024, Pages 6301–6308. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.029>.

Pashynskiy V. V., Pashynska O. G., Boyko S. O. RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE HIGH-STRENGTH CAST IRON MECHANICAL PROPERTIES TAKING INTO ACCOUNT THE RECOMMENDATIONS OF THE DSTU EN 1563:2019 STANDARD

The technological issues of the strength and relative elongation of high-strength cast irons (HSCI) are considered in the paper. The main method chosen is to increase the silicon content to obtain a ferrite matrix strengthened by the solid-solution mechanism. To ensure low production costs, special attention was paid to determining the permissible content of trace and harmful impurities in order to use cheap commercial scrap. The issue of the stability of the mechanical characteristics of cast iron during fluctuations in the technological parameters of its production is also considered. It is shown that main sources of variability in characteristics are the instability of the results of metal processing in the ladle when using the “sandwich” process, as well as fluctuations in the content of trace and harmful impurities due to the instability of the quality of metal scrap. It was found that in the studied range of chemical composition, an increase in the content of magnesium and silicon contributes to a simultaneous increase in the strength and ductility of cast iron, while an increase in the content of manganese increases the strength but reduces the ductility. It is shown that to obtain a relative elongation $A_5 \geq 14\%$, the content should be: $S < 0.006$, $P < 0.02$, $Cr < 0.04$. The $Sn < 0.008\%$ does not create a negative impact on the mechanical properties of HSCI. It was also found that with an increase in the content of silicon and magnesium in cast irons with a high carbon equivalent at a high pouring temperature, a tendency to form torn and star-shaped graphite appears, which leads to a decrease in the mechanical characteristics of cast iron. It is recommended to introduce additional metallographic control for the presence of particles of this morphology in the structure.

Key words: high strength cast iron; spheroidal graphite; ferrite; pearlite; “sandwich”-process; relative elongation; ultimate tensile strength; carbon equivalent.

© Пашинський В. В., Пашинська О. Г., Бойко І. О.

Статтю прийнято до редакції 04.12.2024

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН
NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING

МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДЕН В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

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.

Стаття присвячена питанням розвитку методів підтримки прийняття рішень у галузі судноводіння та їх практичному застосуванню в інтелектуальних навігаційних інформаційних системах (ІНІС). Проведено порівняльний аналіз аварійності сучасного світового судноплавства за останні два десятиріччя, визначено її динаміку та з'ясовані основні чинники виникнення аварій. Доведено, що домінуюча частка аварій обумовлена негативним впливом людського фактора на процеси управління суднами, що, як наслідок, призводить до зіткнень, посідань на міліну, а також до виникнення небезпечних ситуацій на судні та відмов у роботі його систем. Показані типи помилок, обумовлених впливом людини на процеси керування судном та запропоновані можливі шляхи зменшення їх кількості. Визначено роль та місце ІНІС та систем підтримки прийняття рішень (СППР) у вирішенні задач підвищення якості та ефективності процесів управління суднами та судновими системами з метою зменшення рівня аварійності. Доведено, що ІНІС мають значний потенціал у вирішенні проблеми зменшення кількості помилок, спричинених впливом людського фактора на процеси керування суднами та допоміжними системами, і, як наслідок, сприятимуть зменшенню кількості аварій у світовому судноплавстві. Показано зростаючу роль сучасних інформаційних технологій, зокрема методів штучного інтелекту та інтелектуального аналізу даних у вирішенні питань підвищення безпеки сучасного судноплавства, зростання рівня його автоматизації. Запропоновано класифікацію методів прийняття рішень у галузі судноводіння за класами задач, що вирішуються. Визначено особливості практичного застосування кожної групи методів в ІНІС та окреслено перспективні шляхи їх подальшого розвитку. Розроблено загальну структуру ІНІС та запропоновано застосування чотирьохетапного циклу для реалізації процесу прийняття рішень із диференційованим використанням різних груп методів та джерел вихідних даних на кожному з етапів. Визначено пріоритетні шляхи та перспективи подальшого застосування СППР та ІНІС у судноплавстві, а також їх місце і роль у розвитку галузі безпілотних та автономних морських суден.

Ключові слова: інтелектуальні системи; навігаційні системи; судноводіння; системи підтримки прийняття рішень; методи прийняття рішень; штучний інтелект, управління судном; безпека мореплавства.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.099-110

Вступ. Попри негативні наслідки пандемії коронавірусу та напружену безпекову ситуацію у світі, розвиток міжнародного морського судноплавства триває, а його обсяги, як і кількість суден світового торговельного флоту, мають стійку тенденцію до щорічного збільшення [1]. Разом з тим, збільшення обсягів морських перевезень також обумовлює зростання як витрат на експлуатацію суден, так і кількості аварій, спричинених процесами судноплавства, у тому числі зі значними негативними техногенними, економічними та екологічними наслідками.

Таким чином, виникає протиріччя, яке обумовлене, з одного боку, наявною потребою підвищення обсягів світових морських перевезень, їх швидкості та безпечності, а з іншого – досягнення цього за умов максимального зменшення всіх видів економічних та часових витрат, що пов'язані з їх реалізацією. Розв'язання зазначеного протиріччя можливе лише в площині одночасного системного і комплексного застосування сучасних інформаційних та інноваційних технологій в усіх сферах керування процесами транспортування вантажів морськими шляхами: забезпечення безпеки морських перевезень, логістики, керування вантажними операціями, технічної експлуатації суден, оптимізації роботи портової інфраструктури тощо.

Окремими питаннями, які потребують вирішення в контексті успішного розв'язання зазначеної проблеми, постають питання комплексного аналізу причин виникнення морських аварій та їх наслідків, визначення пріоритетних шляхів та методів їх попередження та

мінімізації економічних та людських втрат, а також негативного впливу на навколишнє середовище. Важливе місце у вирішенні вищевказаних питань займає інтеграція в галузь судноплавства новітніх інформаційних технологій і методів обробки даних, які дозволяють істотно пришвидшити та покращити якість процесів управління суднами, судовими системами та допоміжними пристроями.

Стрімкий розвиток інформаційних технологій та методів обробки даних, а також наявні запити практики в галузі судноводіння, обумовили створення та запровадження судових електронних картографічних навігаційних інформаційних систем (ЕКНІС), інтегрованих інформаційних систем ходового містка [2] та їх подальший розвиток і вдосконалення у вигляді інтелектуальних навігаційних інформаційних систем (ІНІС) та систем підтримки прийняття рішень (СППР) [3–8], що сприяло відповідному зростанню інтересу дослідників та кількості наукових публікацій у зазначеному напрямку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проведений аналіз публікацій різних авторів за тематикою дослідження [3–24], дозволив виявити доволі широке коло напрямів і методів, що застосовуються для вирішення задач підвищення безпечності і точності сучасного судноводіння та управління загальносудновими системами в цілому.

Так, сучасні ІНІС вже починають інтегрувати в собі найбільш перспективні та затребувані можливості систем підтримки прийняття рішень (СППР), інтелектуального аналізу даних (ІАД), машинного навчання (МН), розпізнавання зображень (машинний зір), сценарно-прецедентного планування дій, та інші наявні кращі надбання в галузі штучного інтелекту (ШІ).

Слід зазначити, що протягом останнього десятиріччя значна увага приділяється створенню моделей і методів керування безекіпажних і повністю автономних суден [9], і в цьому контексті створення та застосування ІНІС та СППР для управління такими об'єктами є особливо важливим напрямом наукових досліджень.

Попри це, однак, слід зазначити, що хоча зростання в майбутньому у світовому суднопластві частки автономних суден для перевезення вантажів і обіцяє позитивним чином вплинути на рівень аварійності, внаслідок зменшення негативного впливу людського фактора на процеси управління суднами, цей процес іде доволі повільно, та, у підсумку, не дозволить ніколи повністю відмовитись від наявності машинної команди на борту судна внаслідок постійної наявності потреб перевезення шкідливих та небезпечних вантажів, енергоносіїв, а також потреб пасажирського флоту та військових.

Таким чином, людський фактор у сфері застосування сучасних інформаційних технологій завжди буде наявним, що лише призведе до стрімкого зростання ролі ІНІС у суднопластві в цілому, як головної сполучної ланки між людиною та автоматизованими системами керування рухом суден. Тому дослідження та вдосконалення методів, що застосовуються в ІНІС для реалізації процесів прийняття рішень, а також вирішення питань, безпосередньо пов'язаних із створенням та практичним запровадженням таких систем, являє собою актуальну науково-практичну проблему сьогодення, що й обумовило вибір мети та основних задач дослідження.

Мета та задачі дослідження. *Метою* дослідження є: провести порівняльний аналіз сучасних методів прийняття рішень з управління рухом суден та визначити особливості їх практичної реалізації в ІНІС, розробити узагальнену структурну схему ІНІС судноводія, визначити її основні функції та шляхи їх практичної реалізації.

Об'єкт дослідження: інтелектуальні навігаційні інформаційні системи в судноводінні.

Предмет дослідження: застосування методів прийняття рішень з управління рухом суден в інтелектуальних навігаційних інформаційних системах судноводія.

Досягнення поставленої мети дослідження передбачає вирішення наступних задач:

1. Провести порівняльний аналіз основних причин аварійності світового флоту та визначити пріоритетні напрями наукових досліджень, спрямованих на зниження її рівня.

2. Визначити роль і місце ІНІС в сучасному судноплаванні, та вплив їх застосування на процеси зниження рівня аварійності.

3. Здійснити класифікацію методів прийняття рішень у галузі забезпечення безпеки судноплавства за класами задач, що вирішуються, та визначити особливості їх практичної реалізації в ІНІС.

4. Розробити загальну структуру ІНІС, визначити коло її базових функцій та шляхи їх реалізації.

Виклад основного матеріалу. Проведений аналіз даних щодо кількості суден світового торгового флоту за період 2002–2022 рр., а також рівня аварійності, на підставі інформації, яка отримана з джерел [1] та [25], дозволяє зробити висновки стосовно наявності стійкої тенденції до зростання обох показників (рис. 1). Важливо зазначити, що в абсолютних показниках кількість аварій суден у 2021 році у порівнянні з 2002 роком зростає у 1,74 рази (на 74%), при цьому найбільша кількість аварій припадає на контейнеровози, пасажирські судна та суховантажі. Але слід також враховувати, що і кількість суден за зазначений період часу зростає майже вдвічі, тому у співвідношенні до кількості суден показник аварійності майже не зазнав змін.

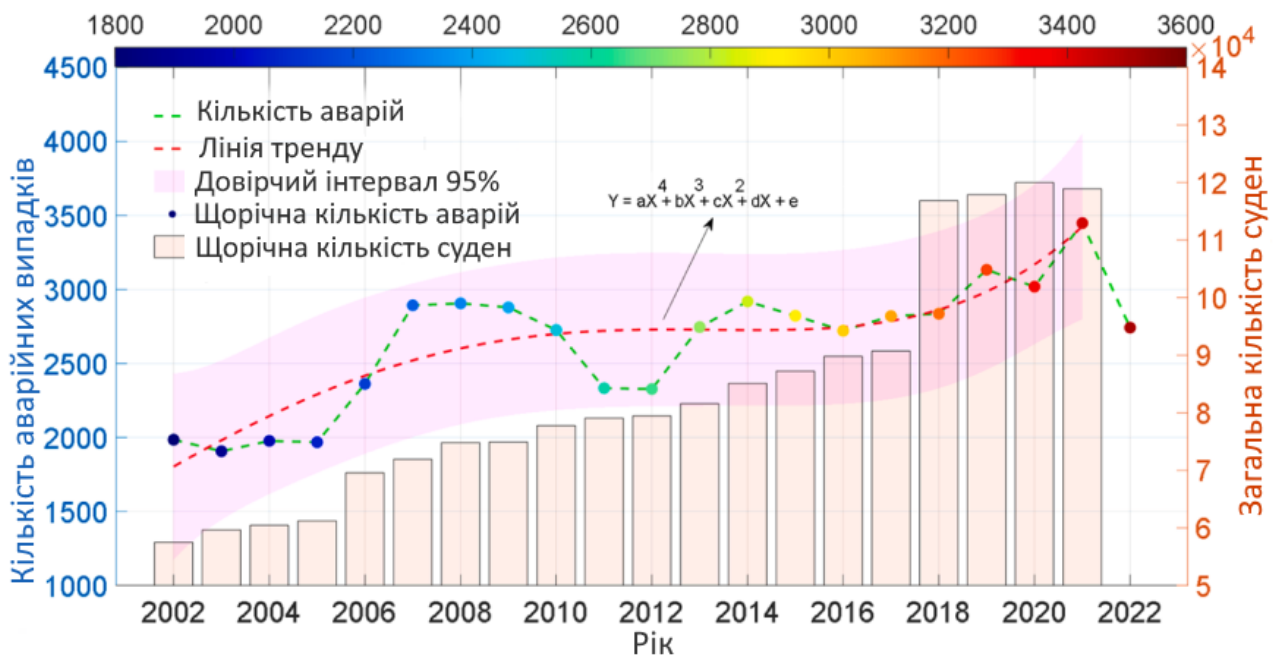


Рисунок 1 – Показники аварійності світового судноплавства за 2002–2022 рр. [25]

Проте, слід мати на увазі, що кожна аварія морського судна створює високі техногенні, екологічні та економічні ризики, що можуть мати суттєвий вплив на світове судноплавство в цілому (наприклад, припинення внаслідок аварій, руху суден у Суецькому, Панамському каналах, протоці Босфор, забруднення Мексиканської затоки та ін.). Тому об'єктивне зростання імовірності настання таких подій майже вдвічі, обумовлює гостру потребу пошуку шляхів зниження аварійності світового судноплавства в абсолютних показниках.

Першим кроком у даному напрямку має бути виявлення основних чинників виникнення аварій суден і з'ясування відносної частки кожного з них від загальної кількості. Розглядаючи причини, що обумовлюють виникнення аварій морських суден згідно з даними джерела [25] (рис. 2), можна виявити, що причиною третини всіх аварійних випадків (33%) є зіткнення суден одне з одним (14%) та посідання на міліну (19%).

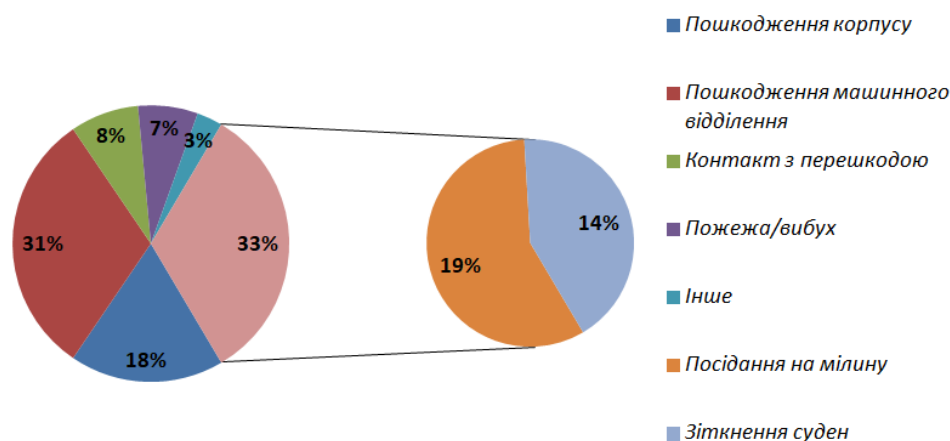


Рисунок 2 – Розподіл основних причин аварійності суден [25]

Ще 8% аварій припадає на зіткнення суден з перешкодами. Таким чином, майже половина (41%) всіх аварійних випадків пов'язані саме з похибками в управлінні рухом суден.

Додатково слід зазначити, що, значна частка аварій, що належать до інших категорій (аварії у машинному відділенні, пожежі, пошкодження конструкцій судна) також доволі часто мають причиною свого виникнення негативний вплив так званого «людського чинника», тобто безпосередньо пов'язані з помилками керування членів суднової команди відповідними системами та пристроями. Частка таких аварій за даними різних авторів [2, 3, 6–8, 26], складає не менш ніж 70–80% від їх загальної кількості.

Помилки, що обумовлені негативним впливом людського фактора виникають внаслідок того, що під час прийняття рішення людина-оператор, або особа, що приймає рішення (ОПР) покладається на свій емпіричний (суб'єктивний) вибір та напівемпіричні знання (критерії прийняття рішень), що може призвести до виникнення двох типів помилок «Відомі помилки» та «Невідомі помилки» [26]. Помилки першого типу виникають внаслідок браку знань, або частково обізнаністю ОПР (недооцінка зовнішніх факторів впливу на траєкторію руху судна, неможливість спрогнозувати подальший сценарій розвитку навігаційної ситуації тощо). Помилки другого типу більш складні, оскільки пов'язані з повною відсутністю обізнаності ОПР про певні фактори або ризики (неправильна оцінка дій інших суден, неправильна оцінка поточної навігаційної ситуації). Проте, помилок другого типу можна уникнути, або істотно знизити їх кількість, шляхом застосування ІНІС або СППР, що використовують новітні інформаційні технології передачі та аналізу даних (ШІ, ІАД, МО та ін.).

Зазначені системи можна застосовувати для прогнозування можливих небажаних подій та сценаріїв розвитку навігаційних ситуацій і керування судновими системами, пропонуючи ОПР упереджувальні (проактивні) управлінські рішення, спрямовані на запобігання виникнення аварій.

Таким чином, ІНІС мають значний потенціал у вирішенні проблеми зменшення кількості помилок, спричинених впливом людського фактора на процеси керування суднами та допоміжними системами, і, як наслідок, сприятимуть зменшенню кількості аварій у світовому судноплаванні. Саме тому дослідження та вдосконалення методів прийняття рішень, які застосовуються в ІНІС, а також визначення пріоритетних шляхів їх практичного запровадження являє собою важливу задачу сьогодення.

Серед методів прийняття рішень, що застосовуються в галузі забезпечення безпеки судноплавання, залежно від типів задач, на вирішення яких вони спрямовані, можна виокремити кілька окремих специфічних напрямів. Нижче запропонована класифікація напрямів наукових досліджень та методів підтримки прийняття рішень, що застосовуються в ІНІС для вирішення задач запобігання зіткнень суден та уникнення навігаційних небезпек і посідань на міліну наведена у таблиці 1. Розглянемо докладніше специфіку та особливості наукових досліджень за кожним з вищенаведених напрямів.

Методи досліджень за напрямом «Загальне керування морськими ризиками та безпекою мореплавства» фокусуються на вирішенні задач, пов'язаних з імплементацією міжнародних норм, правил та систем керування безпекою судноплавства з метою підвищення його безпечності. Дослідження за напрямом мають підтримку з боку Міжнародної морської організації (ІМО), ІСО, багатьох класифікаційних товариств та регіональних морських організацій. Методи підтримки прийняття рішень у зазначеному напрямі слід розділити на дві великі підгрупи: до першої відносяться методи, що вирішують питання, пов'язані з оцінкою довгострокових або стратегічних ризиків у судноплаванні, до другої – методи, пов'язані з оцінкою оперативних ризиків, безпосередньо пов'язаних з операціями керування судном [17].

Значна частка досліджень зазначеного напрямку пов'язана з потребами дотримання вимог ІСО 31000 [27, 28], ІМО FSA та ІСМ, а також виконанням норм міжнародного законодавства, які регламентують правила руху суден, зокрема МППЗС-72 [29] та POLARIS [30]. Важливою складовою напрямку, яка перебуває в стадії активного розвитку, є створення прикладних програмних та апаратних засобів, дозволяють реалізувати на практиці процеси неухильного дотримання судноводіями вимог вказаних нормативних документів. Зазначені обставини обумовлені насамперед тим, що на практиці судноводіям складно обробляти в режимі реального часу великі обсяги навігаційних даних з одночасним врахуванням нормативних вимог, які регламентують рух суден, що призводить до виникнення помилок у процесах керування судном і обумовлює появу негативного впливу так званого людського чинника.

Окремим пріоритетним під напрямом досліджень у межах вищевказаного, є розробка методів і засобів керування автономними суднами. Стратегічний план діяльності ІМО на 2018–2023 рр. вказує на наявну гостру потребу імплементації в міжнародні нормативні документи норм і правил, що регламентують рух автономних суден. Згідно [31], ІМО визначає чотири рівні автономності суден: судно з автоматизацією процесів і прийняттям рішень, дистанційно кероване судно з машиною командою на борту, дистанційно кероване судно без команди на борту, повністю автономне судно. Також ІМО анонсувало розробку нових правил керування ризиками та безпекою для автономних суден, які вступлять в дію з 01.01.2028 р. Застосування таких суден обумовить стрімке зростання частки наукових досліджень, пов'язаних із застосуванням методів ШІ, ІАД, МН та інших методів у галузі сучасних інтелектуальних інформаційних технологій, що будуть розглянуті нижче.

Таблиця 1 – Класифікація напрямів наукових досліджень за колом задач, що вирішуються

№	Спрямування методів досліджень	Коло задач, що вирішуються
1	Загальне керування морськими ризиками та безпекою мореплавства	Створення нормативних документів і правил з метою покращення безпеки мореплавства, шляхом застосування стратегій керування ризиками, що гармонізовані з міжнародними стандартами безпеки
2	Аналіз статичних ризиків	Оцінка та зменшення ризиків мореплавства на основі наявних масивів статистичних даних для визначених районів та маршрутів суден за минулі періоди часу
3	Аналіз динамічних ризиків	Оцінка та зменшення ризиків мореплавства в режимі реального часу на основі наявної навігаційної ситуації та можливих змін зовнішніх факторів, що впливають на її розвиток
4	Аналіз зіткнень суден та посідань на міліну	Оцінка масштабів та наслідків збитків, обумовлених зіткненнями суден та їх посіданням на міліну, із метою визначення найбільш безпечних та ефективних стратегій керування рухом суден
5	Управління та планування руху суден із застосуванням математичних моделей руху	Створення математичних моделей управління рухом суден у різних умовах плавання та за наявності зовнішніх факторів впливу з метою підвищення точності та безпечності навігації

6	Управління та планування руху суден з використанням ШІ, ІАД, МН та ін.	Створення новітніх технологій управління рухом суден із використанням методів ШІ, ІАД, МН метою підвищення точності та безпечності навігації в складних навігаційних умовах та за наявності зовнішніх факторів впливу, що динамічно змінюються
---	--	--

Напрямок досліджень, що пов'язаний з аналізом постійних ризиків охоплює методи ідентифікації, оцінки та мінімізації ризиків судноплавства на стратегічному рівні. Зазначені методи дозволяють визначити наявні фактори ризику, здійснити класифікацію ситуацій за рівнем ризиків та забезпечити відповідний вибір керуючих впливів, спрямованих на їх мінімізацію. Переважна більшість методів, що застосовується для аналізу постійних ризиків, розглядає такі фактори ризику як: людський фактор, вплив зовнішнього середовища, характеристики руху судна та параметри функціонування його систем, організаційні фактори впливу. Найбільш пріоритетним на поточний момент часу є вирішення питань запобігання зіткнень суден, посідання на міліну та оцінки ризиків, що виникають під час експлуатації автономних та безкіпажних суден [16, 17].

У цілому, зазначений напрям досліджень є найбільшим за обсягом серед напрямів, що наведені в таблиці 1, і може бути додатково розподілений ще на дев'ять піднапрямів залежно від типів математичних моделей, що застосовуються для вирішення поставлених задач. До таких піднапрямів слід віднести: методи нечіткої логіки [18], дерева подій та дерева відмов [19], аналіз видів відмов та їх наслідків [20], байєсівські мережі [21], методи імітаційного моделювання [22], методи системного аналізу [23], геометричне моделювання [24], методи оцінки впливу людського фактора [26], інші (або комбіновані) методи.

Головною метою напряму досліджень «Аналіз динамічних ризиків» є виявлення та оцінка ризиків, що обумовлені рухом суден. Методи зазначеного напряму спрямовані на ідентифікацію небезпечних ситуацій, що виникають під час руху суден (зіткнення з іншими суднами, посідання на міліну та зіткнення з нерухомими об'єктами, навігаційні небезпеки тощо) з метою формування сценаріїв дій із керування рухом суден, спрямованих на уникнення таких ситуацій. Виходячи, з математичних моделей, що застосовуються, зазначений напрям також може бути розділений на п'ять піднапрямів, а саме: метод пошуку точок найбільшого зближення, метод безпечної зони судна, метод динамічної безпечної зони судна, метод швидкостей перешкод, гібридні методи [13, 16, 17].

Напрямок досліджень «Аналіз зіткнень суден та посідань на міліну» розглядає методи оцінки наслідків морських аварій суден та рівнів потенційних збитків, до яких вони призводять, з метою мінімізації їх негативного впливу. Таким чином, зазначені методи слугують для визначення дій, спрямованих на зменшення масштабів пошкоджень суден під час морських аварій.

Для визначення масштабів наслідків пошкодження суден під час зіткнень застосовуються аналітичні та імітаційні моделі, а також емпіричні моделі, що базуються на статистичних відомостях, що до пошкоджень суден, що мали місце в минулому під час різних типів аварій. Контакт корпусу судна, що рухається, з твердими перешкодами або посідання на міліну призводить до структурних деформацій, масштаб, яких залежить від множини факторів (швидкість руху, місце, напрям та тривалість зіткнення та ін.) і може бути оцінений шляхом застосування певних математичних або імітаційних моделей та методів. У зазначених моделях корпус судна розглядається як тверде тіло, що рухається в просторі з шістьма ступенями свободи (6DoF) та знаходиться під впливом зовнішніх (хвилі, вітер та течії) та власних рушійних сил (момент інерції, амортизаційні ефекти від руху корпусу у воді, відхилення від траєкторії руху, кінетична енергія тощо) [12].

Виходячи з математичного апарату, що застосовується для вирішення вказаних задач, зазначений напрям досліджень може бути розділений на чотири піднапрями: ймовірнісні методи, аналітичні методи, методи машинного навчання, комбіновані методи [11, 15–19].

Управління та планування руху суден із використанням методів ШІ для запобігання зіткнень є напрямом досліджень, який протягом останніх кількох років набув найбільш стрімкого розвитку [14], як завдяки процесам бурхливої інтеграції новітніх інформаційних технологій у галузі судноводіння так і появи нового сегменту в галузі – автономних та дистанційно керованих, безекіпажних суден. Ключовими задачами, на розв’язання яких спрямовані методи даного напрямку є: прогнозування можливих траєкторій руху суден задля запобігання зіткнень, вибір найкращого маршруту руху суден під час виконання трансокеанських переходів за критеріями економії палива та безпеки виконання рейсу відповідно до гідрометеорологічних умов, керування рухом у вузькостях та каналах, автоматизоване та повністю автономне керування безекіпажними суднами.

Аналізуючи сукупність напрямів досліджень та методів прийняття рішень, що застосовуються в галузі забезпечення безпеки судноплавства, можна виділити коло обов’язкових ключових функцій, які повинні бути реалізовані в ІНІС, визначити структуру ІНІС та шляхи її практичної реалізації.

Розглядаючи процес прийняття рішень в ергатичній системі «ІНІС-ОПР» як цілісний багатоетапний процес взаємодії, можна виділити цикл прийняття рішень, що полягає в послідовній реалізації чотирьох взаємопов’язаних етапів (рис. 3):

- аналіз поточної навігаційної ситуації на підставі наявних вхідних даних та чинних норм та правил, що регламентують рух суден;
- визначення потенційних ризиків, що існують в умовах, які склалися на поточний момент часу, та оцінка ймовірності їх настання;
- визначення можливих наслідків, що матимуть місце у випадку настання кожного із ризиків, та кількісна оцінка пошкоджень або матеріальних збитків, які будуть у такому разі отримані;
- прийняття рішень з управління судном на підставі комплексної згортки критеріїв мінімізації ризиків/негативних наслідків за умов дотримання чинних міжнародних вимог.

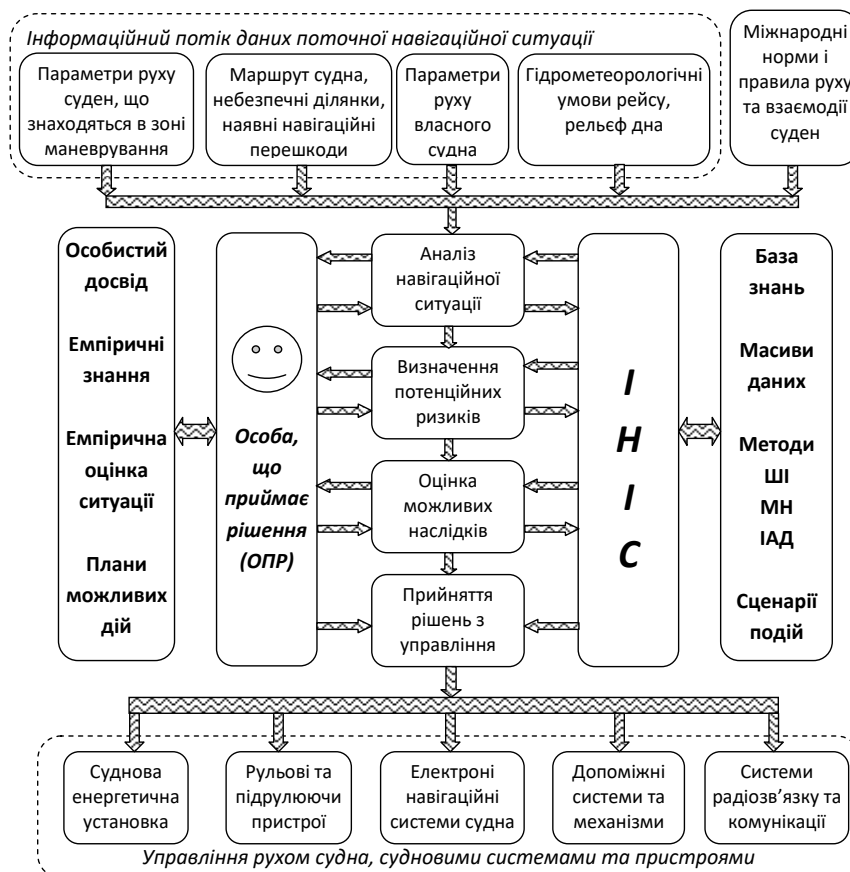


Рисунок 3 – Структура ІНІС та інформаційних потоків у процесі прийняття рішень

При цьому слід зазначити, що вказані етапи відбуваються послідовно та одночасно як безпосередньо з боку ІНІС, так і з боку ОПР, при цьому, однак, сторони застосовують різні підходи до їх реалізації. Так, ОПР у процесі прийняття рішень спирається на власні знання, емпіричні методи та інтуїцію, будуючи певні плани майбутніх дій, тоді як ІНІС застосовує спеціалізовані бази статистичних даних та сучасні методи їх обробки, що дозволяє будувати можливі сценарії подальшого розвитку навігаційної ситуації та формувати на їх основі можливі рішення. Обидва контури (ОПР та ІНІС) обробки інформації під час прийняття рішень є взаємодоповнюючими і саме в їх синергії та злагодженій взаємодії і полягає ключ успішної реалізації процесів безпечного управління рухом судна.

Важливо відзначити, що задля забезпечення ефективної обробки інформації в колі постійної інформаційної взаємодії «ІНІС-ОПР» під час кожного з чотирьох вищезазначених етапів процесу прийняття рішень, слід застосовувати різні методи з узагальненої класифікації напрямів, наведених у таблиці 1, а саме наступні.

1. На першому етапі доцільним є застосування методів ідентифікації та класифікації ситуацій, а також методів, що належать до першого та третього піднапрямку методів досліджень, зазначених у таблиці 1. Результатом виконання етапу є визначення множин статичних та динамічних небезпек, а також обмежень, що накладаються на траєкторію руху власного судна.

2. Під час виконання другого етапу процесу прийняття рішень визначаються потенційні фактори ризику, що можуть виникнути в процесі руху судна згідно з передбаченим маршрутом. На даному етапі слід застосовувати методи (окремі, або їх комбінації) що належать до другого та третього піднапрямків методів досліджень, зазначених у таблиці 1. Результатом етапу є формування множини факторів ризику, яка підлягає подальшому аналізу, впорядкуванню та скороченню.

3. На третьому етапі процесу прийняття рішень здійснюється оцінка наслідків – збитків та втрат, що можуть виникнути у разі настання одного або декількох визначених ризиків. За масштабами ймовірних наслідків здійснюється поділ усіх наявних ризиків на прийнятні, істотні та неприйнятні. Істотні та неприйнятні ризики розглядаються на наступному етапі для визначення керуючих впливів на рух судна та процеси функціонування його систем з метою уникнення ризикових ситуацій. Третій етап реалізується із застосуванням методів, які відносяться до четвертого піднапрямку.

4. Четвертий етап передбачає широке застосування методів, зазначених у п'ятому та шостому піднапрямках таблиці 1, а саме: методів математичного моделювання, ШІ, ІАД та сценарно-прецедентного підходу, із метою формування остаточного рішення з управління судном (для ІНІС) або підмножини можливих рішень (для СППР).

Також слід зауважити, що при практичній реалізації ІНІС вкрай необхідним є застосування модульного принципу побудови системи, відповідно до якого кожен з вищезазначених етапів реалізується в окремому програмному модулі ІНІС, а уніфікованими є лише формати потоків даних між ними. У такому випадку з'являється швидка модернізація та модифікація ІНІС відповідно до потреб конкретного судновласника, або у зв'язку з необхідністю внесення змін, обумовлених змінами у чинних міжнародних нормативних документах у галузі судноплавства.

Висновки. Проведений аналіз аварійності сучасного судноплавства за останні два десятиріччя дозволив визначити наявність стійкої тенденції до збільшення кількості аварій в абсолютних показниках, яка обумовлена передусім зростанням кількості суден світового флоту та загальною інтенсифікацією морських перевезень у цілому. Слід також зазначити, що зростання рівня автоматизації сучасних суден та запровадження новітніх систем навігації та керування рухом, призводить до збільшення частки аварій, обумовлених негативним впливом на процеси прийняття рішень так званого людського чинника, оскільки у цьому випадку саме ОПР постає найбільш «слабкою ланкою» зазначеного процесу.

Зниження кількості аварій суден може бути досягнуте шляхом широкого запровадження ІНІС та СППР у галузі судноводіння, при цьому важливою передумовою їх

успішного застосування є обґрунтований і коректний вибір належних методів обробки інформації в цілісній ергатичній системі «ІНІС-ОПР» на відповідних етапах прийняття рішень. Виділення в циклі прийняття рішень у системі «ІНІС-ОПР» чотирьох базових етапів із диференційованим застосуванням різних методів обробки даних та прийняття рішень на кожному з них позитивно вплине на якість та оперативність формування рішень з управління рухом суден. Застосування принципу модульності побудови ІНІС забезпечує необхідні передумови до її швидкої модернізації та модифікації відповідно до потреб конкретного судновласника, або у зв'язку з необхідністю внесення змін, обумовлених змінами у чинних міжнародних нормативних документах у галузі судноплавства.

Перспективи подальших досліджень. Збільшення кількості автономних та безекіпажних суден потребує подальшого поглиблення та розвитку наукових досліджень не лише галузі сучасних методів прийняття рішень із керування такими суднами (ШІ, ІАД, МН та ін.), але і нових технологічних рішень у розвитку каналів високошвидкісної передачі даних, оскільки для успішної практичної реалізації зазначені методи потребують переробки великих обсягів інформації стосовно руху суден у режимі реального часу. У зазначеному контексті важливим напрямом є розвиток берегових навігаційних систем та портової інфраструктури в рамках розвитку нової технології систем водного транспорту «New Generation of Waterborne Transportation System» (NG-WTS) [10]. Також необхідним є спрямування спільних зусиль міжнародної спільноти на розвиток загальної нормативно-правової бази, що регламентує рух автономних та безекіпажних морських суден та наслідки інцидентів з їх участю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. UNCTAD. Review of maritime transport. 2022.
2. Вагущенко Л. Л. Суднові навігаційно-інформаційні системи. Одеса : НУ «ОМА», 2016. 238 с.
3. 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.
4. 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.
5. Бень А. П. Перспективи розвитку систем підтримки прийняття рішень судноводія / Бень А. П. // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. – Херсон : Видавництво ХДМА, 2012. № 1 (6). С. 12–19.
6. Якусевич Ю. Г., Тришин В. В., Дорофєєва З. Я. Побудова навігаційної системи судна на основі сучасних інформаційних технологій. *Кібернетика та системний аналіз*. №4(70). 2021. С. 83–88.
7. Бень А. П., Мальцев А. С. Системи підтримки прийняття рішень щодо управління рухом судна // Монографія. Херсон : Видавництво ХДМА, 2019. 244 с.
8. Pietrzykowski Z., Wolejsza P., Borkowski P. Decision support in collision situations at sea. *J. Navig.* 2017. Vol. 70. P. 447–464.
9. Abudu R., Bridgelall R. Autonomous Ships: A Thematic Review. *World* 2024, 5, P. 276–292.
10. Yan X., Li C., Liu J., You X., Wang S., Ma F. Architecture and key technologies for new generation of waterborne transportation system. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21(5):22.
11. Krata P., Kniat A., Vettor R., Krata H., Guedes Soares C. The Development of a Combined Method to Quickly Assess Ship Speed and Fuel Consumption at Different Powertrain Load and Sea Conditions. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2021. Vol. 15, № 2. P. 437–444.
12. Sang Jin Kim, Mihkel Kõrgersaar, Nima Ahmadi, Ghalib Taimuri, Pentti Kujala, Spyros Hirdaris, The influence of fluid structure interaction modelling on the dynamic response of ships subject to collision and grounding, *Marine Structures*, Vol. 75, 2021, 102875.

13. Dugan S. A., Skjetne R., Wróbel K., Montewka J., Gil M., Utne I. B. Integration Test Procedures for a Collision Avoidance Decision Support System Using STPA. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2023. Vol. 17, № 2. P. 375–381.
14. MacKinnon S. N., Weber R., Olindersson F. and Lundh M. Artificial Intelligence in Maritime Navigation: A Human Factors Perspective/In book: *Advances in Human Aspects of Transportation*, N. Stanton (Ed.): AHFE 2020, AISC 1212, pp. 429–435.
15. Zhang M. Big data analytics methods for collision and grounding risk analysis in real conditions: framework, evaluation, and applications. Aalto University; Doctoral thesis, 2023, 202 p.
16. Du L, Goerlandt F, Kujala P. Review and analysis of methods for assessing maritime waterway risk based on non-accident critical events detected from AIS data. *Reliability Engineering and System Safety*, 200, 2020, 106933.
17. Huang Y., Chen L., Chen P., Negenborn R. R., Van Gelder PHAJM. Ship collision avoidance methods: state-of-the-art. *Safety Science*, 2020,121, P. 451–473.
18. Li Y., Song G., Yip T.-L., Yeo G.-T. Fuzzy Logic-Based Decision-Making Method for Ultra-Large Ship Berthing Using Pilotage Data *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, 12, 717.
19. Tunçel A. L., Yüксеkyıldız E., Akyuz E., & Arslan O. Probability-based extensive quantitative risk analysis: collision and grounding case studies for bulk carrier and general cargo ships. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 2021. 15(1), 89–105.
20. Başhan, V., Demirel, H. & Gul, M. An FMEA-based TOPSIS approach under single valued neutrosophic sets for maritime risk evaluation: the case of ship navigation safety. *Soft Computing*, 24, 2020, 18749–18764.
21. Bünyamin Kamal, Erkan Çakır, Data-driven Bayes approach on marine accidents occurring in Istanbul strait, *Applied Ocean Research*, 2022, Volume 123, 103180.
22. Axel Hörteborn, Jonas W. Ringsberg, A method for risk analysis of ship collisions with stationary infrastructure using AIS data and a ship manoeuvring simulator, *Ocean Engineering*, 2021, Volume 235, 109396.
23. Leveson N. G. *Engineering a safer world: systems thinking applied to safety*. The MIT Press, 2016. p. 560.
24. Kujala P., Hänninen M., Arola T., Ylitalo J. Analysis of the marine traffic safety in the Gulf of Finland, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94, Issue 8, 2009, pp. 1349–1357.
25. <https://lloydlist.maritimeintelligence.informa.com/sectors/casualty>.
26. Wu B., Yip T. L., Yan X., Soares C. G. Review of techniques and challenges of human and organizational factors analysis in maritime transportation. *Reliability Engineering and System Safety*, 2022, 219:108249.
27. IMO. Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the imo rule-making process. London, UK: International Maritime Organization – MSC/Circ.1023-MEPC/Circ.392, 2002.
28. ISO. ISO 31000:2018. Risk management – guidelines. International Organization for Standardization, 2018.
29. IMO. Convention on the international regulations for preventing collisions at Sea, 1972 (COLREGs).
30. IMO. Maritime safety committee POLARIS – proposed system for determining operational limitations in ice. In: Submitted by the International Association of Classification Societies, MSC 94/3/7,9th Session, Agenda 3, September 12; 2014. 2014.
31. IMO. Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS) – MSC.1-Circ.1638, London, UK. 2021.

REFERENCES

1. UNCTAD (2022). Review of maritime transport.
2. Vahushchenko, L. L. (2016). *Sudnovi navihatsiino-informatsiini systemy*. Odesa : NU «OMA», 238 с.

3. 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.
4. 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. 1035–1048.
5. Ben A. P. (2012). Perspektyvy rozvytku system pidtrymky pryiniattia rishen sudnovodiia / Ben A. P. // *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. – Kherson : Vydavnytstvo KhDMA. № 1 (6). S. 12–19.
6. Iakusevych, Yu. H., Tryshyn, V. V., Dorofieieva, Z. Ya. (2021). Pobudova navihatsiinoi systemy sudna na osnovi suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii. *Kibernetyka ta systemnyi analiz*. №4(70). C. 83–88.
7. Ben, A. P., Maltsev, A. S. (2019). Systemy pidtrymky pryiniattia rishen shchodo upravlinnia rukhom sudna // Monohrafiia. Kherson : Vydavnytstvo KhDMA. 244 s.
8. Pietrzykowski, Z., Wołajsza, P., Borkowski, P. (2017). Decision support in collision situations at sea. *J. Navig.* Vol. 70. P. 447–464.
9. Abudu, R., Bridgelall, R. (2024). Autonomous Ships: A Thematic Review. *World* 2024, 5, P. 276–292.
10. Yan, X., Li, C., Liu, J., You, X., Wang, S., Ma, F. (2021). Architecture and key technologies for new generation of waterborne transportation system. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 21(5):22.
11. Krata, P., Kniat, A., Vettor, R., Krata, H., Guedes Soares, C. (2021). The Development of a Combined Method to Quickly Assess Ship Speed and Fuel Consumption at Different Powertrain Load and Sea Conditions. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 15, № 2. P. 437–444.
12. Sang Jin Kim, Mihkel Kõrgersaar, Nima Ahmadi, Ghalib Taimuri, Pentti Kujala, Spyros Hirdaris (2021). The influence of fluid structure interaction modelling on the dynamic response of ships subject to collision and grounding, *Marine Structures*, Vol. 75, 102875.
13. Dugan, S. A., Skjetne, R., Wróbel, K., Montewka, J., Gil, M., Utne, I. B. (2023). Integration Test Procedures for a Collision Avoidance Decision Support System Using STPA. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 17, № 2. P. 375–381.
14. MacKinnon, S. N., Weber, R., Olindersson, F. and Lundh, M. (2020). Artificial Intelligence in Maritime Navigation: A Human Factors Perspective/In book: *Advances in Human Aspects of Transportation*, N. Stanton (Ed.): AHFE 2020, AISC 1212, pp. 429–435.
15. Zhang, M. (2023). Big data analytics methods for collision and grounding risk analysis in real conditions: framework, evaluation, and applications. Aalto University; Doctoral thesis, 202 p.
16. Du, L., Goerlandt, F., Kujala, P. (2020). Review and analysis of methods for assessing maritime waterway risk based on non-accident critical events detected from AIS data. *Reliability Engineering and System Safety*, 200, 106933.
17. Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R., Van Gelder PHAJM (2020). Ship collision avoidance methods: state-of-the-art. *Safety Science*, 121, P. 451–473.
18. Li, Y., Song, G., Yip, T.-L., Yeo, G.-T. (2024). Fuzzy Logic-Based Decision-Making Method for Ultra-Large Ship Berthing Using Pilotage Data *J. Mar. Sci. Eng.* 12, 717.
19. Tunçel, A. L., Yüksesyıldız, E., Akyuz, E., & Arslan, O. (2021). Probability-based extensive quantitative risk analysis: collision and grounding case studies for bulk carrier and general cargo ships. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*. 15(1), 89–105.
20. Başhan, V., Demirel, H. & Gul, M. (2020). An FMEA-based TOPSIS approach under single valued neutrosophic sets for maritime risk evaluation: the case of ship navigation safety. *Soft Computing*, 24, 18749–18764.
21. Bünyamin Kamal, Erkan Çakır (2022). Data-driven Bayes approach on marine accidents occurring in Istanbul strait, *Applied Ocean Research*, Volume 123, 103180.

22. Axel Hörteborn, Jonas, W. Ringsberg (2021). A method for risk analysis of ship collisions with stationary infrastructure using AIS data and a ship manoeuvring simulator, *Ocean Engineering*, Volume 235, 109396.
23. Leveson, N. G. (2016). *Engineering a safer world: systems thinking applied to safety*. The MIT Press. p. 560.
24. Kujala, P., Hänninen, M., Arola, T., Ylitalo, J. (2009). Analysis of the marine traffic safety in the Gulf of Finland, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 94, Issue 8, pp. 1349–1357.
25. <https://lloydlist.maritimeintelligence.informa.com/sectors/casualty>.
26. Wu, B., Yip, T. L., Yan, X., Soares, C. G. (2022). Review of techniques and challenges of human and organizational factors analysis in maritime transportation. *Reliability Engineering and System Safety*, 219:108249.
27. IMO (2002). Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the imo rule-making process. London, UK: International Maritime Organization – MSC/Circ.1023-MEPC/Circ.392.
28. ISO (2018). ISO 31000:2018. Risk management – guidelines. International Organization for Standardization.
29. IMO (1972). Convention on the international regulations for preventing collisions at Sea, 1972 (COLREGs).
30. IMO (2024). Maritime safety committee POLARIS – proposed system for determining operational limitations in ice. In: Submitted by the International Association of Classification Societies, MSC 94/3/7, 9th Session, Agenda 3, September 12; 2014.
31. IMO (2021). Outcome of the regulatory scoping exercise for the use of maritime autonomous surface ships (MASS) – MSC.1-Circ.1638, London, UK.

Ben A. P. DECISION-MAKING METHODS FOR SHIP TRAFFIC CONTROL IN INTELLIGENT NAVIGATION INFORMATION SYSTEMS

The article is devoted to issues of development of decision-making support methods in the field of navigation and their practical application in intelligent navigation information systems (INIS). An analysis of the accident rate of modern world shipping over the past two decades was carried out, its dynamics were determined, and the main factors of the occurrence of accidents were clarified. It has been proven that the dominant share of accidents is due to the negative influence of the human factor on the processes of ship control, which, as a result, leads to collisions, groundings, as well as to the occurrence of dangerous situations on ships and failures in the operation of its systems. The types of errors caused by human influence on ship control processes are shown and possible ways to reduce their number are proposed. The role and place of INIS and decision-making support systems (DSS) in solving the problems of improving the quality and efficiency of ship and ship systems control processes with the aim of reducing the level of accidents have been determined. It has been proven that INIS have a significant potential in solving the problems of reducing the number of errors caused by the influence of human factor on processes of controlling ships and auxiliary systems, and, as a result, will contribute to reducing the number of accidents in world shipping. The growing role of modern information technologies, in particular the methods of artificial intelligence and intelligent data analysis, in the solved issues of improving the safety of modern shipping, increasing the level of its automation, is shown. The classification of decision-making methods in the field of shipping by classes of problems to be solved is proposed. Features of the practical application of each group of methods in INIS are determined, and promising ways of their further development are outlined. The general structure of INIS was developed, and the application of a four-stage cycle was proposed for the implementation of the decision-making process with the differentiated use of different groups of methods and sources of initial data at each of the stages. The priority ways and prospects for the further application of DSS and INIS in navigation, as well as their place and role in development of the industry of unmanned and autonomous sea vessels, have been determined.

Key words: intelligent systems; navigation systems; navigation; decision-making support systems; decision-making methods; artificial intelligence, ship control; safety of navigation.

© Бень А. П.

Статтю прийнято до редакції 05.12.2024

ІНТЕГРАЦІЯ CHATGPT ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ АВТОНОМНИХ СУДЕН В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Козачок Ю. А., аспірант, Software development Company N-IX LTD, м. Миколаїв, Україна, e-mail: kozak9995@gmail.com, ORCID: 0009-0005-6430-3961;

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.

Стаття досліджує інтеграцію мовної моделі ChatGPT у системи автономних суден для підтримки процесів прийняття рішень у режимі реального часу, що є важливим компонентом для покращення морських операцій. У матеріалі висвітлюються основні функціональні можливості ChatGPT, такі як аналіз складних навігаційних сценаріїв, планування ефективних маневрів, оптимізація морських маршрутів і безперешкодна взаємодія з іншими бортовими системами та береговими службами. Використовуючи ці можливості, автономні судна можуть діяти з підвищеною точністю та адаптивністю.

Важливим внеском цього дослідження є запропонована модульна архітектура для інтеграції ChatGPT в операційну структуру автономних суден. Архітектура розроблена з окремими модулями для збору й обробки даних, взаємодії з API ChatGPT та виконання рішень. Ці модулі забезпечують здатність системи збирати інформацію з різних джерел – таких як радары, камери, системи GPS та метеорологічні станції – і обробляти її для забезпечення сумісності з аналітичними можливостями ChatGPT. Модуль виконання трансформує рекомендації ChatGPT у конкретні команди для операційних систем судна, таких як навігація та механізми уникнення зіткнень.

Особлива увага приділяється практичним сценаріям використання, зокрема уникненню зіткнень, адаптації до динамічних погодних умов і навігації через регіони з високою щільністю морського трафіку. Наприклад, у разі зустрічі з іншим судном на траєкторії ChatGPT аналізує дані сенсорів, такі як відстань, швидкість і напрямок обох суден, для надання рекомендацій щодо коригування курсу та швидкості. Такий швидкий і точний аналіз мінімізує ризики зіткнень навіть у стресових ситуаціях. Інший приклад включає перенаправлення судна за несприятливих погодних умов або за умови перевантаження порту призначення. ChatGPT генерує альтернативні маршрути, аналізуючи погодні дані в реальному часі, доступність портів і положення судна, що забезпечує своєчасне та безпечне прибуття.

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи; навігаційна безпека; автоматизація процесів керування; людський чинник; ChatGPT; підтримка прийняття рішень у режимі реального часу; автономні судна; штучний інтелект (ШІ); морська галузь; координація суден; автономна навігація; розподілені системи управління.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.111-121

Вступ. Автономні судна стають однією з найперспективніших технологій морської галузі [1–2] забезпечуючи зниження експлуатаційних витрат, підвищення безпеки судноплавства та мінімізацію впливу людського фактора. Проте управління автономними суднами в реальному часі є складним завданням, що вимагає обробки великого обсягу даних, швидкого прийняття рішень і дотримання морських правил. Штучний інтелект, зокрема моделі обробки природної мови, такі як ChatGPT, відкриває нові можливості для підтримки прийняття рішень в автономних системах [3–4]. ChatGPT здатний аналізувати великі масиви інформації, генерувати рекомендації та навіть взаємодіяти з екіпажем або іншими суднами у зрозумілій формі. Його інтеграція може значно підвищити адаптивність і ефективність автономних суден у складних і динамічних умовах.

Постановка проблеми. Генеративні моделі штучного інтелекту, зокрема ChatGPT, демонструють високий потенціал у створенні гнучких рішень завдяки здатності до аналізу, прогнозування та адаптації на основі великих обсягів даних. Виникає потреба у розробці моделі керування автономним судном, яка б інтегрувала ChatGPT для підтримки прийняття рішень у реальному часі, враховуючи специфічні вимоги морської галузі, такі як безпека, надійність і ефективність.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сфера інтеграції штучного інтелекту в морські системи активно розвивається завдяки зростаючому попиту на автономні рішення. У науковій літературі розглядається широкий спектр підходів до вирішення проблем автономної навігації та управління суднами. Наприклад, роботи Johansson K. [5] присвячені розподіленим системам для координації суден, що забезпечують надійність і масштабованість у складних навігаційних сценаріях. Zhang W. та Li H. [6] детально аналізують оптимізацію маршрутів за допомогою алгоритмів машинного навчання, акцентуючи увагу на зниженні витрат палива та мінімізації часу подорожі.

Крім того, Miller J. [7] підкреслює важливість дотримання стандартів безпеки при розробці автономних систем, особливо в контексті динамічних і непередбачуваних ситуацій. Інші дослідники, такі як Yamada T. і Nakajima M. [8], пропонують інтегрувати гібридні системи, що поєднують локальні та хмарні моделі для підвищення ефективності та зменшення затримок в обробці даних.

Деякі пілотні проекти вже демонструють ефективність ChatGPT. Наприклад, у рамках експериментів великих судноплавних компаній було розроблено прототипи систем, де ChatGPT використовувався для прогнозування ризиків у складних навігаційних умовах. Одним із таких проектів є впровадження системи підтримки прийняття рішень для суден, що працюють в арктичних регіонах. У цих умовах ChatGPT аналізував дані про льодові покриття, погодні умови та маршрути інших суден для пропонування оптимальних рішень [9].

Іншим прикладом є застосування ChatGPT для автоматизації взаємодії з портовими службами. У пілотному проекті однієї з азіатських компаній система автоматично обробляла запити від портів, генерувала відповіді та коригувала маршрути залежно від завантаженості портів і доступності доків. Результати показали значне зменшення часу на координацію операцій та підвищення точності планування [10].

Ці реальні приклади демонструють, що ChatGPT може стати ключовим компонентом систем автономного управління, підвищуючи ефективність і безпеку морських операцій.

Мета та задачі дослідження. Мета цієї статті – запропонувати підходи в застосуванні нейронних мереж [11–12] у вигляді ChatGPT у системи управління автономними суднами для підтримки прийняття рішень у режимі реального часу. У роботі проаналізовано потенційні сценарії використання, наведено архітектуру інтеграції та визначено основні переваги й виклики впровадження цієї технології.

Основна частина. Автономні судна повинні працювати в умовах постійно змінного середовища, яке включає динамічні навігаційні обставини, погодні умови та взаємодію з іншими суднами [13–16]. ChatGPT – генеративний штучний інтелект, здатний швидко обробляти текстову та числову інформацію, генерувати рекомендації та аналізувати можливі наслідки.

У даній статті запропоновано інтегрувати ChatGPT у систему автономного судна використавши модульний підхід, де кожен компонент виконує чітко визначену функцію. Основні елементи архітектури:

- Модуль збору даних: отримує інформацію з радарів, камер, GPS, AIS та метеостанцій.
- Модуль обробки даних: нормалізує отримані дані, забезпечуючи їх сумісність із форматами, прийнятими ChatGPT.
- API ChatGPT: використовується для передачі запитів до моделі та отримання відповідей [3].
- Модуль виконання: передає результати від ChatGPT на виконавчі механізми судна або інші програмні модулі.

У роботі розглядається розробка модуля AI помічника, щоб застосувати його можливості в системах автономних суден, а саме:

- аналіз навігаційної ситуації: генерація текстових або числових рекомендацій на основі вхідних даних із сенсорів судна;

- планування дій: пропонування оптимальних маршрутів або маневрів для уникнення зіткнень;
- взаємодія з іншими системами: передача даних у зрозумілому форматі для інших модулів або для екіпажу.

Для досягнення оптимального використання ChatGPT та його навчання, створимо власну AI модель (рис. 1).

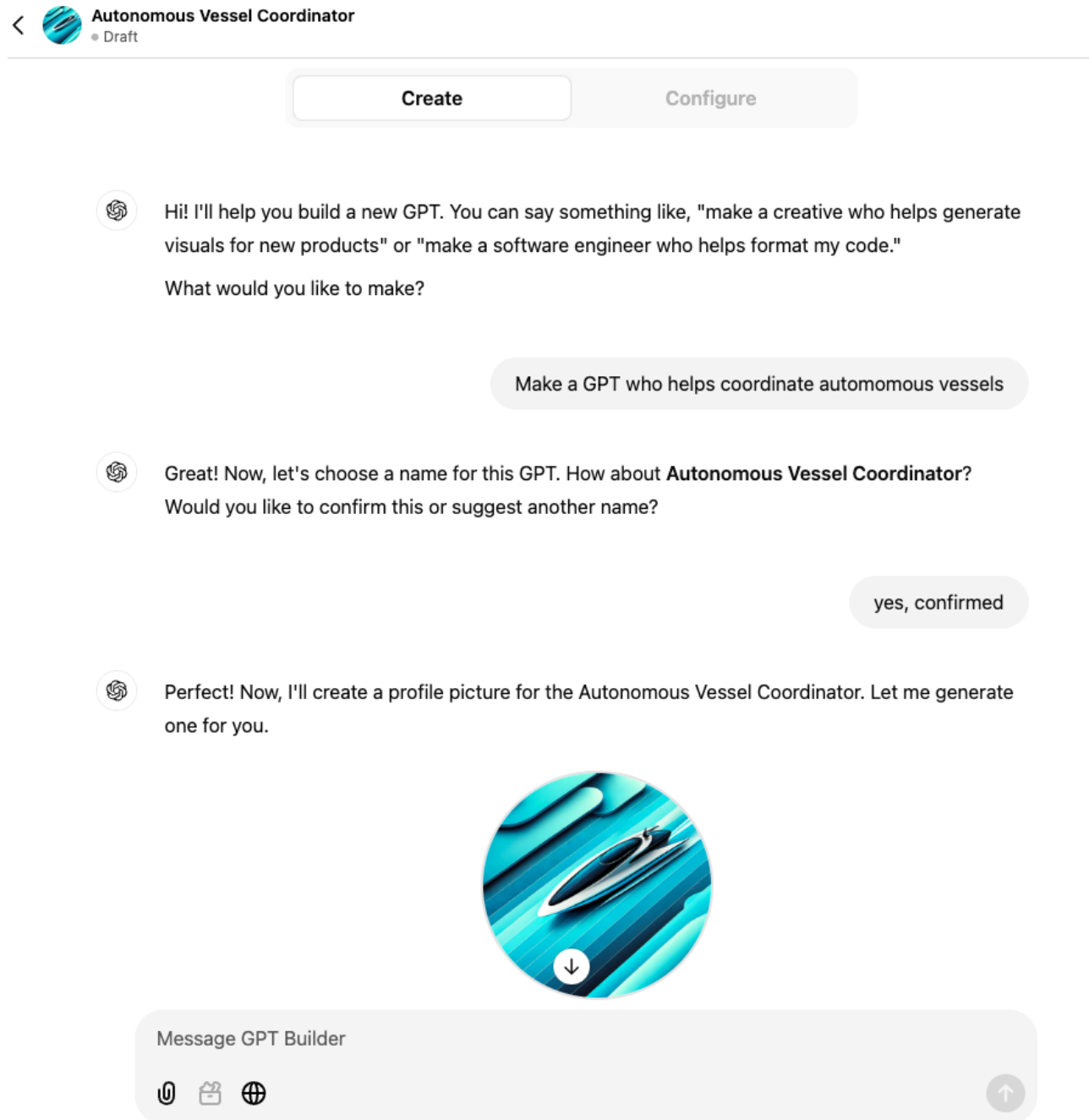


Рисунок 1 – Процес створення AI моделі для координації автономного судна

Після створення AI моделі виконаємо навчання. Для цього можна завантажити файли з базами знань по координації суден, а також надамо інструкції через обмін текстовими повідомленнями, після чого отримаємо початкову модель, яку зможемо використати як один з модулів автономного судна (рис. 2).



Autonomous Vessel Coordinator

By Kozachok Yuriy Anatolevich &

Assists in coordinating autonomous vessel operations with JSON input/output.

Provide recommended actions for this...

Analyze this sensor data for collision risks.

Optimize paths based on this sensor data in...

Simulate emergency response for give...

Please, be informed, vessel will be used next format of request to you to get response

```
{
  "sensors": {
    "radar": "radar inforamation",
    "ais": "AIS information",
    "gps": "GPS information"
  },
  "task": "Task what to do"
}
```



Рисунок 2 – Процес навчання AI моделі

Після процесу навчання, отримуємо налаштований інструмент під назвою «Autonomous Vessel Coordinator». Інструмент створений для допомоги у координації роботи автономних суден, включаючи кораблі, дрони та підводні апарати. Він використовує формат JSON для отримання вхідних даних і надання рекомендацій, забезпечуючи підтримку процесів прийняття рішень. Основні функції включають аналіз даних, оптимізацію маршрутів, вирішення проблем та логістичне планування для ефективної роботи суден. Інструмент також здатен симулювати аварійні ситуації, прогнозувати ризики. У ньому є початкові пропозиції для взаємодії, такі як надання рекомендацій для вхідних даних JSON, аналіз даних сенсорів на ризики зіткнення, оптимізація маршрутів і симуляція реагування на надзвичайні ситуації. Інтерфейс дозволяє завантажувати файли для аналізу, особливо якщо увімкнений Code Interpreter.

Навчання нейромережевої моделі здійснювалося на основі даних, зібраних під час штатного моделювання експлуатації судна. У набір даних входила інформація про маневри судна, умови навколишнього середовища та показники датчиків. Дані були попередньо оброблені для видалення шумів і нормалізації ключових параметрів, що забезпечило точність моделі. Навчання здійснювалося інтерактивно з використанням алгоритму зворотного поширення помилки та перевіркою на незалежних наборах даних для тонкого налаштування точності передбачень. Такий підхід дозволив моделі адаптуватися до специфічних характеристик і сценаріїв експлуатації судна, забезпечуючи високу точність оцінки маневрених можливостей.

Для демонстрації роботи взаємодії системи автономного судна зі штучним інтелектом, розглянемо наступні моделювання поведінки судна:

1. На курсі автономного судна виявлено інше судно. Радар і AIS забезпечують інформацію про об'єкт, зокрема відстань, швидкість і напрямок його руху. GPS передає поточну позицію автономного судна. ChatGPT аналізує дані від сенсорів та пропонує рішення, що включає зміну курсу та швидкості, а також вказівку на необхідність подальшого моніторингу. Такий підхід дозволяє моделі швидко обробляти вхідні дані та видавати дієві інструкції, що зменшує ризики аварій (рис. 3).

```
{
  "sensors": {
    "radar": "Object detected 300m ahead at bearing 45 degrees",
    "ais": "Vessel ID 12345, speed 12 knots, course 90 degrees",
    "gps": "Position: 47.6062° N, 122.3321° W"
  },
  "task": "Suggest collision avoidance action."
}

{
  "decision": "Adjust course 15 degrees starboard and reduce speed to 8 knots. Maintain visual monitoring of the target vessel."
}
```

Рисунок 3 – Запит та рішення AI моделі по уникненню зіткнення з судном по курсу

2. Наступна подія моделює ситуацію, коли автономне судно стикається з проблемами маршруту через погодні умови та перевантаженість порту призначення. Сенсори передають інформацію про штормову зону (радіус і швидкість вітру), статус порту (затримка) та поточне місцезнаходження судна. ChatGPT генерує альтернативний маршрут, враховуючи погодні умови та стан портів. Результат підкреслює здатність моделі аналізувати погодні умови, стан інфраструктури та геолокацію для створення альтернативного маршруту, що дозволяє уникнути шторму та мінімізувати затримки (рис. 4).

```
{
  "sensors": {
    "weather": "Storm predicted within 50 nautical miles, wind speed 35 knots",
    "port_status": "Port A congested, estimated delay 4 hours",
    "gps": "Current position: 47.6062° N, 122.3321° W"
  },
  "task": "Suggest optimal route to destination Port B."
}

{
  "decision": "Divert course 10 degrees north to avoid storm zone. Adjust arrival at Port B via alternate route through Sector C to minimize delay."
}
```

Рисунок 4 – Запит та рішення AI моделі по обходу шторму

3. Судно отримує запит від диспетчера порту. ChatGPT формулює відповідь або пропонує дії відповідно до інструкцій (Рис. 5).

```

{
  "request": "Provide estimated time of arrival and cargo details.",
  "current_status": {
    "eta": "ETA: 2024-12-12 08:00 UTC",
    "cargo": "Containerized goods, weight 15,000 tons"
  },
  "task": "Generate formal response to port authority."
}

{
  "response": "This is autonomous vessel X. Estimated time of arrival (ETA
) at your port is 2024-12-12 08:00 UTC. The vessel is carrying
containerized goods with a total weight of 15,000 tons. Please confirm
docking instructions."
}

```

Рисунок 5 – Запит та рішення AI моделі з ведення радіо обміну

Наступна ситуація ілюструє складний сценарій навігації, де автономне судно має враховувати більше змінних. Радар і GPS передають інформацію про навколишнє середовище. Виявлені об'єкти (два судна і буй) мають різні відстані, напрямки, швидкості та курси. Сенсор глибини фіксує потенційно небезпечну мілководну ділянку. Модель має визначити безпечний маршрут, щоб уникнути зіткнень із суднами, обійти буй та уникнути мілини. AI модель пропонує зменшити швидкість для безпечного маневрування. Пропонується поворот на 20 градусів управо, щоб уникнути мілини та буя. Модель враховує положення інших суден і пропонує паралельний курс з одним із них, а також моніторинг іншого для можливих змін. (рис. 6–7).

```

{
  "sensors": {
    "radar": [
      {
        "object": "Vessel 1",
        "distance": 500,
        "bearing": 30,
        "speed": 10,
        "course": 120
      },
      {
        "object": "Vessel 2",
        "distance": 700,
        "bearing": 90,
        "speed": 15,
        "course": 270
      },
      {
        "object": "Buoy",
        "distance": 300,
        "bearing": 60
      }
    ],
    "gps": "Position: 47.6062° N, 122.3321° W",
    "depth": "Shallow water detected at 600m, bearing 45 degrees"
  },
  "task": "Determine safe navigation route."
}

```

Рисунок 6 – Запит до AI моделі

```
{
  "decision": "Reduce speed to 6 knots. Turn 20 degrees starboard to avoid
    Buoy and shallow water. Maintain a parallel course with Vessel 1 and
    monitor Vessel 2 for possible adjustments."
}
```

Рисунок 7 – Рішення AI моделі

Для обробки відповіді від ChatGPT система автономного судна повинна забезпечити кілька рівнів перевірки, інтеграції та виконання отриманих рекомендацій (рис. 8). Першим кроком є аналіз отриманої відповіді, щоб переконатися у її форматі та логічності. Система перевіряє, чи всі параметри відповідають встановленим правилам, наприклад, чи є значення курсу або швидкості в допустимих межах. Це дозволяє уникнути потенційно небезпечних або некоректних дій.

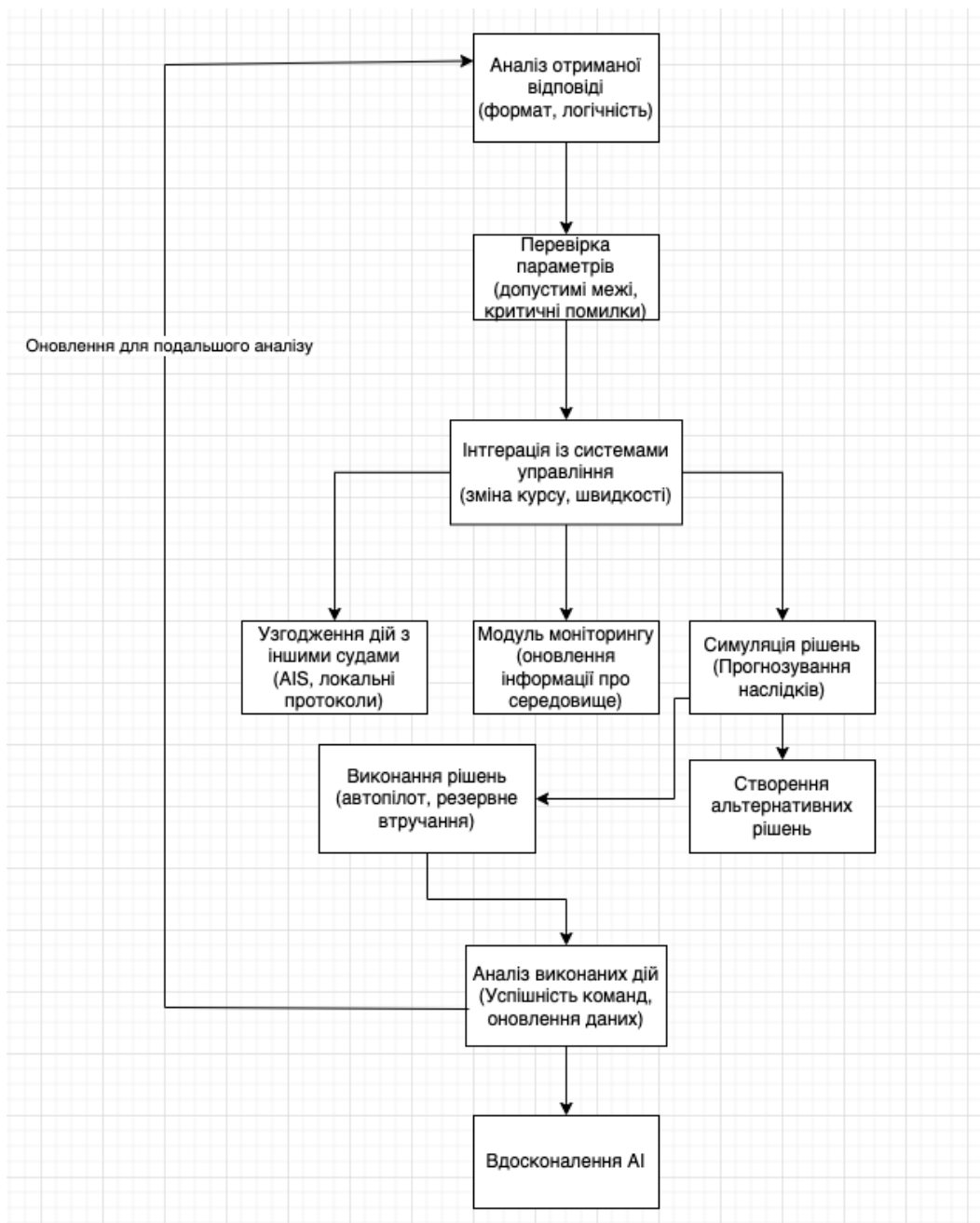


Рисунок 8 – Система управління автономним судном із безперервним навчанням

Після цього інтеграція із системами управління забезпечує виконання рішень. Наприклад, модуль управління рухом приймає команди для зміни курсу або швидкості та передає їх на автопілот судна. Якщо потрібно узгодити дії з іншими суднами, модуль координації надсилає відповідні повідомлення через AIS чи інші канали зв'язку. Одночасно модуль моніторингу забезпечує постійне оновлення інформації про стан навколишнього середовища, щоб переконатися, що ситуація не виходить за рамки прогнозованих умов.

Система також може виконувати симуляцію запропонованих рішень для прогнозування їхніх наслідків перед виконанням. Наприклад, якщо ChatGPT рекомендує зміну курсу, система може віртуально «прорахувати» траєкторію, щоб переконатися у безпеці цього маневру. Якщо симуляція виявляє ризики, рішення відхиляється, і система запитує альтернативну рекомендацію. Це значно підвищує надійність системи.

На етапі виконання система виконує команди автоматично, але передбачає можливість резервного втручання у разі помилок. Наприклад, якщо запропоноване рішення не виконується через технічний збій, система перемикається на базові правила навігації, такі як уникнення зіткнень або дотримання мінімальної безпечної дистанції. Після виконання дій система надсилає оновлені дані до ChatGPT або іншої аналітичної моделі для подальшого аналізу, що дозволяє моделі навчатися та покращувати свої рекомендації.

Таким чином, обробка відповіді ChatGPT є багатоступеневим процесом, що забезпечує як точність, так і безпеку дій автономного судна. Ця архітектура дозволяє системі адаптуватися до змінних умов, зменшуючи ризики та підвищуючи ефективність морських операцій.

При комунікації зі штучним інтелектом можуть виникнути проблеми з затримкою в обробці даних, адже робота ChatGPT залежить від швидкості передачі даних та супутникового інтернету, тому пропонується використання дублюючих локальних моделей або попередньо навчених систем для прийняття колективного рішення. Вся передача даних повинна проходити через шифрування та використовувати захищений канал зв'язку, а також модель має постійно навчатись, адже не навчена модель може не враховувати специфічних ситуацій.

Основні результати та їх обговорення. Інтеграція кастомізованого ChatGPT у системи автономних суден забезпечує швидке прийняття рішень завдяки можливості аналізувати складні навігаційні сценарії та генерувати відповіді за лічені секунди. Вона зменшує ризики, пов'язані з людським фактором, і робить систему більш надійною та адаптивною до різноманітних завдань. Крім того, використання AI дозволяє ефективно взаємодіяти з іншими системами та службами, а також гнучко реагувати на зміни в умовах навігації. Система демонструє високу швидкість прийняття рішень: середній час обробки запиту та генерування рішення в складних навігаційних сценаріях становить лише 1–2 секунди, що є придатним для роботи в режимі реального часу. Навіть у сценаріях з високою інтенсивністю трафіку швидкість обробки залишалася стабільною завдяки ефективній оптимізації запитів до API.

На сьогодні немає відомих наукових статей, які безпосередньо пропонують використання ChatGPT у системах управління автономними суднами. Водночас існує аналогічна AI-модель, розроблена компанією «KONSBERG», яка використовується на автономному судні Yara Birkeland під назвою Orca AI [17], але саме модель управління системою невідома. Таким чином, представлена у статті модель взаємодії саме з CHATGPT має значний потенціал для подальшого вивчення та вдосконалення.

Модель була протестована на 500 різних сценаріях, пов'язаних із керуванням та прийняттям рішень автономним судном. Результати засвідчили високий рівень точності рекомендацій: у тестових умовах система правильно ідентифікувала ризик зіткнення у 98% випадків. У помилкових рішеннях рівень перевірки «Симуляція рішень» (рис. 9) відіграє ключову роль, забезпечуючи захист судна від потенційно небезпечних наслідків. Кожна виявлена помилка активує механізм зворотного зв'язку з моделлю штучного інтелекту, що сприяє її безперервному вдосконаленню шляхом навчання на нових даних. Рівень помилок

моделі штучного інтелекту пропорційно знижувався в міру її навчання, тому необхідне подальше тестування та дослідження моделі.

ChatGPT продемонстрував здатність ефективно адаптуватися до змінних умов, таких як погіршення погоди чи перевантаженість портів, забезпечуючи високу якість підтримки прийняття рішень у динамічних ситуаціях. Ці результати свідчать про значний потенціал використання ChatGPT у вдосконаленні систем автономного управління.

Висновок. Інтеграція ChatGPT у системи автономних суден демонструє значний потенціал у підвищенні ефективності, безпеки та автономності морських операцій. Завдяки здатності швидко аналізувати складні навігаційні сценарії, пропонувати оптимальні рішення та забезпечувати ефективну взаємодію з іншими системами, ChatGPT може стати одним із важливих модулів системи для підтримки прийняття рішень у реальному часі. Хоча існують певні виклики, такі як затримки в обробці даних або потреба в адаптації до нових ситуацій, впровадження цієї технології відкриває нові можливості для розвитку автономного судноплавства та підвищення загальної ефективності морської галузі.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження в цій галузі можуть бути зосереджені на декількох важливих напрямках. По-перше, оптимізація навігаційних алгоритмів може включати глибший аналіз складних сценаріїв, таких як робота в умовах високої інтенсивності судноплавства або обмеженої видимості. По-друге, інтеграція багатоплатформених моделей штучного інтелекту може розширити можливості автономних суден, поєднуючи моделі обробки текстової інформації (як-от ChatGPT) з алгоритмами комп'ютерного зору для аналізу зображень. Крім того, створення системи навчання, заснованої на реальних даних з експлуатації автономних суден, дозволить підвищити точність прогнозів і прийняття рішень.

Для перевірки ефективності інтеграції ChatGPT у системи автономних суден необхідно розробити комплекс експериментів, що дозволять оцінити її здатність вирішувати складні завдання в реальних умовах. Моделювання може включати кілька ключових етапів.

По-перше, створення симуляторів, які відтворюють реальні морські сценарії, такі як висока інтенсивність трафіку, несприятливі погодні умови або зіткнення з непередбаченими перешкодами. У таких симуляторах ChatGPT може бути протестований на здатність швидко аналізувати дані з сенсорів, генерувати оптимальні рішення та адаптуватися до змінних умов.

По-друге, вимірювання параметрів ефективності системи, таких як точність прогнозів, час прийняття рішень, споживання обчислювальних ресурсів і рівень автономності. Наприклад, можна оцінити, наскільки швидко система реагує на загрозу зіткнення або як точно вона планує маршрути в умовах змінної погоди.

По-третє, порівняння результатів роботи ChatGPT з іншими алгоритмами чи моделями штучного інтелекту, що вже використовуються в морській галузі. Це дозволить визначити конкурентні переваги та недоліки ChatGPT у конкретних сценаріях.

На завершення, результати моделювання та експериментів слід використовувати для подальшого вдосконалення системи. Це може включати оптимізацію параметрів моделі, адаптацію архітектури інтеграції або розробку додаткових функцій для підвищення її надійності та ефективності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Cruz A., Smith J., Developing Decision Support Systems for Autonomous Vessels, *Journal of Autonomous Intelligence*. 2023, Vol. 5, nom. 3.
2. Коростін О. О., Ефективність розпізнавання тексту в автоматизації міжнародних морських перевезень за допомогою штучного інтелекту, *Таврійський науковий вісник*, 2024, № 3, 29–38.
3. OpenAI. ChatGPT API Documentation [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://platform.openai.com>.

4. IMO. Guidelines for Autonomous Maritime Operations. *International Maritime Organization*. 2021.
5. Smith R., Autonomous Navigation in Maritime Systems. A Distributed Approach, *Journal of Maritime Technology and Engineering*. 2023, Vol. 12, No. 4, 101–120.
6. Zhang W., Li H., Optimizing Routes in Autonomous Vessels Using AI, *Applied Ocean Research*. 2022, 192–205.
7. Miller J., Safety Standards in AI-Controlled Maritime Systems, *Maritime Safety Journal*. 2022, 23–53.
8. Yamada T., Nakajima M., Hybrid Systems in Maritime Autonomy, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. 2023, 32–54.
9. Brown P., Artificial Intelligence in Maritime Operations, *AI & Marine Tech Journal*. 2022, 23–43.
10. Johansson K., Distributed Systems for Autonomous Navigation, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2023, 54–99.
11. Зінченко С. М., Ляшенко В. Г., Використання нейромережевої моделі судна для вирішення задач управління, *Науковий вісник ХДМА*. 2017. №2 (17). С. 231–237.
12. Козачок Ю. А., Автоматизація проєктування архітектури інформаційної системи прийому комунальних платежів з використанням штучного інтелекту, *Таврійський науковий вісник*. Технічні науки. 2024. (2). С. 62–72. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.2.6>.
13. Wang, X., Liu, Y., & Zhang, Y., Deep Learning-Based Collision Avoidance for Autonomous Surface Vessels. *Ocean Engineering*. 2023, 250–254.
14. Martinez, C., & Perez, D., Machine Learning Approaches in Maritime Navigation Systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(5). 2023, 4210–4220.
15. Müller, J., & Schmidt, T., Enhancing Maritime Safety with AI-Based Decision Support Systems. *Safety Science*. 2023, 157–165.
16. Зінченко С. М., Ляшенко В. Г., Шалаєва А. А. Оцінка маневрених можливостей судна за допомогою нейромережевої моделі, синтезованої у процесі його штатної експлуатації. *Матеріали IV МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві освіта, наука, практика»*, Херсон, 14–16 вересня 2017 р., с. 236–240.
17. Deshayes P. H., “First electric autonomous cargo ship launched in Norway”, [Online]. <https://protect.kongsberg.com/kongsberg---the-first-electric-autonomous-ship-ever>.

REFERENCES

1. Cruz, A., Smith, J. (2023). Developing Decision Support Systems for Autonomous Vessels, *Journal of Autonomous Intelligence*. Vol. 5, nom. 3.
2. Korostin, O. O. (2024). Efektyvnist rozpoznavannia tekstu v avtomatyzatsii mizhnarodnykh morskyykh perevezen za dopomohoiu shtuchoho intelektu, *Tavriiskiyi naukovyi visnyk*. № 3, 29–38.
3. OpenAI. ChatGPT API Documentation [Electronic resource]. Available at: <https://platform.openai.com>.
4. IMO (2021). Guidelines for Autonomous Maritime Operations. International Maritime Organization. 1–50.
5. Smith, R. (2023). Autonomous Navigation in Maritime Systems. A Distributed Approach, *Journal of Maritime Technology and Engineering*. Vol. 12, No. 4, 101–120.
6. Zhang, W., Li, H. (2022). Optimizing Routes in Autonomous Vessels Using AI, *Applied Ocean Research*. 192–205.
7. Miller, J. (2022). Safety Standards in AI-Controlled Maritime Systems, *Maritime Safety Journal*. 23–53.
8. Yamada, T., Nakajima, M. (2023). Hybrid Systems in Maritime Autonomy, *Journal of Robotics and Autonomous Systems*. 32–54.
9. Brown, P. (2022). Artificial Intelligence in Maritime Operations, *AI & Marine Tech Journal*. 23–43.

10. Johansson, K. (2023). Distributed Systems for Autonomous Navigation, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 54–99.
11. Zinchenko, S. M., Lyashenko, V. G. (2017). Usage of Neural Network Model of the Ship for Control Tasks, Scientific Bulletin of KSMA. No. 2 (17), 231–237.
12. 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.
13. Wang, X., Liu, Y., Zhang, Y. (2023). Deep Learning-Based Collision Avoidance for Autonomous Surface Vessels, Ocean Engineering. Vol. 250, 876.
14. Martinez, C., Perez, D. (2022). Machine Learning Approaches in Maritime Navigation Systems, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. Vol. 23(5), 4210–4220.
15. Müller, J., Schmidt, T. (2023). Enhancing Maritime Safety with AI-Based Decision Support Systems, Safety Science. Vol. 157, 105921.
16. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Shalaeva, A. A. (2017). Otsenka manevrennykh vozmozhnostey sudna s pomoshchyu neyrosetvoy modeli, sinteziruemoi v protsesse yego shtatnoy ekspluatatsii // Materialy IV MNPK «Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti na transporte i proizvodstve: obrazovanie, nauka, praktika», Kherson, 236–240.
17. Deshayes, P. H. “First electric autonomous cargo ship launched in Norway”, [Online]. <https://protect.kongsberg.com/kongsberg---the-first-electric-autonomous-ship-ever>.

Kozachok Y. A., Zinchenko S. M. INTEGRATION OF CHATGPT FOR DECISION-MAKING SUPPORT OF AUTONOMOUS VESSELS IN REAL-TIME MODE

The article explores the integration of the ChatGPT language model into autonomous vessel systems to support real-time decision-making processes, a critical component for improving maritime operations. The discussion highlights the primary functionalities of ChatGPT, such as analyzing complex navigation scenarios, planning efficient maneuvers, optimizing maritime routes, and seamlessly interacting with other onboard systems and coastal services. By leveraging these capabilities, autonomous vessels can operate with enhanced precision and adaptability.

A significant contribution of this research is the proposed modular architecture for integrating ChatGPT into the operational framework of autonomous vessels. The architecture is designed with distinct modules for data collection and processing, interfacing with the ChatGPT API, and executing decisions. These modules enable the system to gather information from diverse sources – including radars, cameras, GPS systems, and meteorological stations – and process it to ensure compatibility with ChatGPT's analytical capabilities. The execution module translates ChatGPT's recommendations into actionable commands for the vessel's operational systems, such as navigation and collision avoidance mechanisms.

Special attention is given to practical use cases, including collision avoidance, adaptation to dynamic weather conditions, and navigation through high-traffic maritime regions. For instance, when encountering another vessel on its trajectory, ChatGPT analyzes sensor data such as the distance, speed, and direction of both vessels to recommend adjustments in course and speed. This rapid and accurate analysis minimizes collision risks, even in high-pressure scenarios. Another case involves rerouting the vessel during adverse weather conditions or when the designated port is congested. ChatGPT generates alternative routes by analyzing real-time weather data, port availability, and vessel positioning, thereby ensuring timely and safe arrivals.

The study also addresses several challenges inherent in integrating AI systems like ChatGPT into maritime operations. Data processing delays, for instance, are mitigated through optimized communication protocols and the use of local AI models to supplement cloud-based systems. Security is another critical area, with the architecture employing encrypted data transmission channels and robust cybersecurity measures to prevent unauthorized access. Moreover, the adaptability of ChatGPT is continuously enhanced through iterative learning, enabling it to handle novel and unforeseen maritime scenarios effectively.

Key words: intelligent transportation systems; navigation safety; automation of control processes; human factor; ChatGPT; real-time decision-making support; autonomous vessels; artificial intelligence (AI); maritime industry; vessel coordination; autonomous navigation; distributed control systems.

© Козачок Ю. А., Зінченко С. М.

Статтю прийнято до редакції 03.12.2024

УДК 656.61:629.12.087.5:004.942

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАВІГАЦІЙНИХ РОЗРАХУНКІВ НА БОРТУ СУДНА В КРИТИЧНИХ СИТУАЦІЯХ

Носов П. С., к.т.н., доцент, завідувач кафедри суднових комп'ютерних систем і мереж, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, email: rason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766.

Сокол І. В., к.п.н., завідувач судноводійного відділення, Відокремлений структурний підрозділ «Морський фаховий коледж Херсонської державної морської академії», м. Херсон, Україна, email: kherson.sokol@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7324-1441.

Подобєда В. В., завідувач лабораторії, Відокремлений структурний підрозділ «Морський фаховий коледж Херсонської державної морської академії», м. Херсон, Україна, email: vladimirpodobieda@gmail.com, ORCID: 0009-0002-5987-5541.

У межах дослідження розроблено комплексний підхід до підвищення надійності навігаційних систем морських суден за умов відмов електронного навігаційного обладнання, кібератак та енергетичних blackout-сценаріїв. Запропоновано інноваційні алгоритмічні рішення, що забезпечують оперативний перехід від цифрових навігаційних технологій до альтернативних систем, заснованих на методах морехідної астрономії та принципів методу Dead Reckoning ECDIS.

Створено програмний інструмент для автоматизованого розрахунку координат судна за допомогою секстана. Цей інструмент враховує поправки, методи статистичної обробки серій даних, автоматично виявляє промахи та визначає середні значення з мінімальною сумарною похибкою. Визначення обсервованих координат реалізовано на підставі математичних моделей висотних ліній положення з урахуванням курсу, швидкості й часу між спостереженнями.

Крім того, розроблено автономну електронну картографічну систему на базі Python-бібліотек (folium, geopy, ipuwidgits), що забезпечує інтерактивне введення координат маршрутних точок, побудову відрізків маршруту, обчислення швидкості й курсу судна, а також візуалізацію результатів на інтерактивних картах. Система може функціонувати локально без доступу до мережі Інтернет завдяки використанню web-орієнтованих картографічних даних, що забезпечує стабільність та надійність обсервації навіть у критичних умовах.

Експериментальна перевірка підтвердила високу точність розрахунків та ефективність запропонованих рішень у ситуаціях збоїв електронних навігаційних систем. У разі blackout розроблена система дає змогу екіпажу оперативно відновити навігаційні функції та гарантувати безпеку судна.

Практична значущість роботи полягає у створенні гнучкої, надійної навігаційної системи, здатної мінімізувати ризики під час технічних збоїв або цілеспрямованих кібератак. Перспективи подальших досліджень передбачають удосконалення алгоритмів для зниження похибок і адаптацію системи до реальних умов експлуатації на морських суднах за будь-яких умов плавання.

Ключові слова: традиційні методи навігації; морехідна астрономія; інтерактивні картографічні системи; альтернативні системи позиціонування; автономна навігація; секстан; візуалізація маршруту.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.122-138

Вступ. Останнім часом, галузь морського судноплавства стала надзвичайно залежною від електронних навігаційних систем, таких як ECDIS, GPS, AIS та GNSS. Ці технології забезпечують високу точність визначення місцеперебування судна та ефективне керування його рухом, водночас істотно спрощуючи планування маршрутів, контроль безпеки та оперативне прийняття рішень. Однак така залежність від електронних засобів навігації має й зворотний бік: уразливість до технічних збоїв, неточностей супутникових сигналів або часткової втрати електроживлення (blackout). Зокрема, відмови обладнання, маніпуляції даними (спуфінг GNSS, несанкціоновані втручання в AIS чи ECDIS) та вплив людського фактора можуть призвести до ситуацій, коли сучасні високоточні системи навігації стають недоступними або недостовірними.

У таких умовах важливого значення набуває застосування резервних, традиційних підходів до визначення місцеположення судна: астрономічні методи визначення місця судна, метод «Dead Reckoning» та інші методики, які не залежать від зовнішніх електронних

сигналів. Проте самі по собі традиційні методи, не інтегровані у загальний навігаційний комплекс, лише частково компенсують недоліки електронних систем.

Проблема дослідження. Відсутність чітких та комплексних алгоритмічних рішень та технічних засобів для оперативного переходу від цифрових до традиційних методів у реальному часі ускладнює створення по-справжньому стійкої навігаційної системи. Додатковою проблемою є брак цілісних моделей, здатних одночасно враховувати відмови обладнання та забезпечувати безперервність контролю за місцем судна.

Актуальність даного дослідження визначається нагальною потребою у розробці універсальних інтегрованих рішень, що поєднують переваги сучасних електронних систем з надійністю та автономністю традиційних методів. Такий підхід не лише підвищить стійкість судна до технічних збоїв, а й надасть і алгоритмічну основу для швидкого перемикання між різними джерелами навігаційної інформації. Це дозволить забезпечити точну та безперервну навігацію, гарантувати безпеку екіпажу та зберегти економічну ефективність морських перевезень.

З метою визначення слабких та сильних сторін наявних підходів, проведемо критичний аналіз наукової літератури, що дозволить визначити стан наукового поля в питаннях забезпечення навігаційної безпеки суден, застосування традиційних і сучасних навігаційних методів, протистояння відмовам навігаційного обладнання.

Основні напрями наукового пошуку по тематиці дослідження є наступні:

1. Традиційні та резервні навігаційні методи. У роботі Урум Н. С. та ін. (2023) [1], а також Дакі О. А. (2021) [4], увагу зосереджено на історії та розвитку секстанта (1) та застосуванні методів морехідної астрономії. Ключовий внесок цих джерел – підкреслення важливості традиційних навігаційних інструментів як резервних методів визначення координат судна у разі відмови електронних систем. Сучасна навігація надто залежна від електронних рішень, проте дослідження показують: секстант, астрономічні розрахунки та інші автономні підходи можуть забезпечити стійкість та надійність у випадках збоїв. Недоліком цих досліджень є недостатнє висвітлення інтеграції традиційних методів із сучасними автоматизованими системами та відсутність адаптації цих рішень до умов кібератак або втрат електронної інфраструктури, негативного впливу фактору людини.

2. Інформаційна безпека та моделювання ризиків. У дослідженнях Вільського Г. Б., Надича М. М. (2011) [2], а також Мельника О.М. та ін. (2021) [6] мова іде про забезпечення інформаційної безпеки суден, моделювання ризиків та методів їх зниження. Ці роботи пропонують ймовірнісні моделі для виявлення зон небезпеки, підвищення стійкості навігаційних систем у складних умовах. Однак у цих джерелах бракує комплексної оцінки впливу кібератак та інформаційних маніпуляцій на роботу навігаційних систем, а також чіткого алгоритмічного базису для інтеграції з традиційними методами навігації.

3. Сучасні системи курсовказання та супутникова навігація. Роботи Мельника О. М. та ін. (2022) [3], а також Nguyen T. D. (2020) [8] і Маранова О. В. (2023) [7] аналізують сучасні супутникові системи навігації, їхню точність і надійність. Зокрема, супутникові компаси, GNSS та інші технології розглядаються як основа навігаційної безпеки. Проте ці дослідження вказують на уразливість електронних засобів до спуфінгу сигналів, зависання чи втрати точності. Недоліком є те, що вони недостатньо уваги приділяють комплексному сценарію, де GNSS може виявитися недоступним через кібератаки чи технічні збої. Також бракує чітких рекомендацій щодо використання альтернативних методів визначення місцеположення у моменти кризових ситуацій.

4. Машинне навчання та прогнозування відмов. У роботі Маранова О. В. (2023) [5] застосовано машинне навчання для прогнозування відмов навігаційних систем. Це перспективний напрям, що дозволяє превентивно виявляти потенційні несправності й планувати технічне обслуговування. Проте нинішні підходи зосереджені переважно на внутрішніх технічних проблемах обладнання, ігноруючи зовнішні впливи, такі як кібератаки або масовані помилки сигналів GNSS. Також відсутня інтеграція з традиційними методами навігації, які могли б слугувати резервом у разі недостовірності електронної інформації.

5. Управління ризиками blackout та резервні джерела енергії. DNV (2024) [9] та Utomo M. N. S. et al. (2024) [11] розглядають проблему blackout і роль аварійних генераторів. Чітко показано, що відмова електропостачання критично впливає на навігаційну безпеку, особливо поблизу портів чи у важких погодних умовах. Однак ці дослідження мало висвітлюють, як саме забезпечувати точне визначення положення судна під час таких аварійних ситуацій, коли основні системи навігації можуть бути недоступні. Відсутня повноцінна інтеграція між концепцією підтримки електроживлення та використанням альтернативних методів навігації.

б. Інтегровані системи навігації та електронна навігація. Робота Якусевича Ю. Г. та ін. (2021) [10] фокусується на побудові суднової навігаційної системи на основі сучасних ІТ-технологій. Хоча дослідження приділяє увагу стандартизації, інтеграції різних сенсорів і систем, воно майже не розглядає сценарії повних збоїв чи атак, коли неможливо довіряти електронним системам. Також бракує глибокого аналізу використання резервних способів навігації, які можна було б автоматично задіяти в кризових умовах.

Загалом аналіз літератури свідчить про значну фрагментарність підходів до проблеми надійного визначення положення судна у критичних ситуаціях. Є дослідження, присвячені традиційним методам (методи морехідної астрономії та класичної навігації), але вони не інтегровані з сучасними автоматизованими системами.

Проте, є ряд досліджень, які також стосуються забезпечення навігаційної безпеки суден, зокрема в умовах відмов навігаційного обладнання чи виникнення ситуацій blackout [12–14]. Представлені публікації присвячені теоретичним та практичним аспектам застосування традиційних і інноваційних методів навігації, використанню програмних інструментів для моделювання, а також резервних та автономних способів визначення положення судна, що відкривають новий погляд для аналізу та вирішення зазначеної проблеми.

1. Інтеграція математичних інструментів для навчання та симуляцій. Робота Kalinichenko Y. та співавторів (2023) [12, 13], суттєво акцентує увагу на використанні програмного середовища GeoGebra для навігаційних цілей. Зокрема, у працях «GeoGebra for navigational purposes» та «GeoGebra for navigation purposes: Theory and application» автори досліджують можливості цього інструмента для моделювання геометричних задач, пов'язаних із визначенням місця судна, розрахунком курсів, шляхів обходу перешкод, а також для виконання базових астрономічних та геодезичних розрахунків.

Цінність цього підходу полягає у створенні та візуалізації навчальних моделей: здобувачі освіти та фахівці можуть швидко опанувувати базові принципи навігації, аналізуючи різноманітні сценарії без необхідності використання дорогого навігаційного обладнання. GeoGebra виступає інтерактивним середовищем, в якому можуть бути перевірені теоретичні припущення та алгоритми визначення місцеперебування судна. Однак застосування цього підходу в реальних умовах мореплавства має певні обмеження, оскільки GeoGebra не інтегрована безпосередньо з бортовими системами й не враховує в реальному часі зовнішні фактори (наприклад, сигнали навігаційних супутникових систем). Вона скоріше є допоміжним інструментом для навчання, тренування, теоретичних досліджень та попереднього моделювання.

2. Застосування методу «Dead Reckoning» як резервного інструмента навігації. Стаття «Застосування методу «Dead Reckoning» для забезпечення роботи ЕКНІС при відмові суднової станції GPS» (Калініченко Є. та ін., 2023) [14], зосереджується на практичному аспекті: як забезпечити безперебійне функціонування електронної картографічно-інформаційної системи (ЕКНІС) у випадках, коли GPS-сигнал відсутній, пошкоджений або спотворений. Запропонований підхід полягає у використанні методу «Dead Reckoning» (DR) – традиційної навігаційної методики [15], за якою визначення положення судна відбувається за останніми достовірними координатами, власним ходом (швидкістю), курсом та часом на маршруті.

Цей підхід має низку важливих переваг. По-перше, він не залежить від зовнішніх джерел сигналу (супутників, радіомаяків), отже залишається працездатним при

GPS-спуфінгу, збої енергосистеми чи кібератаках на навігаційне обладнання. По-друге, DR метод уже інтегрований у класичні навчальні програми судноводіїв, тому його застосування є інтуїтивно зрозумілим. Однак недоліком DR є поступове накопичення похибки, що обмежує тривалість використання цього методу без додаткової корекції. Застосування DR найбільш ефективно як проміжне рішення, поки екіпаж не відновить нормальну роботу систем або не отримає альтернативні дані для корекції курсу.

До того ж слід зазначити що ряд досліджень вже направлено на рішення схожої задачі. Так, у дослідженні [16], запропонована автоматизація демонструє суттєві переваги щодо точності та зручності обчислень, проте застосування її на практиці може бути обмеженим через специфіку вимог до обчислювальних ресурсів і чутливість до вихідних даних. Для досягнення більш широкого практичного застосування необхідна додаткова інтеграція алгоритмів у стандартні судові системи навігації. Зокрема, метод Ньютона чутливий до вибору початкової точки, і невірні початкові припущення можуть призвести до хибної конвергенції або потреби повторювати обчислення, що вимагає уважного налаштування параметрів. Аналітичний підхід, хоча й позбавлений ітерацій, у випадках великої кількості розрахункових точок значно збільшує обчислювальне навантаження через стрімке зростання кількості комбінацій. Крім того, округлення результатів у тривимірному просторі може спричинити похибки при високоточних розрахунках. Для реального застосування на судах методика потребує адаптації до систем ECDIS та інтеграції з наявними навігаційними платформами, оскільки наразі вона більше орієнтована на освітні цілі.

У статті [17], автори досліджують вплив розміру поля зору (FOV) автоматизованих систем небесної навігації на точність вимірювань та ймовірність успішної ідентифікації зірок для морських автономних надводних суден.

Запропоновані методики мають потенціал для покращення автоматизованої небесної навігації на морських автономних судах. Однак, їх впровадження супроводжується низкою складнощів, пов'язаних із необхідністю балансу між розміром FOV та точністю вимірювань, удосконаленням алгоритмів ідентифікації зірок, а також врахуванням впливу морського середовища та технічних обмежень обладнання, зокрема:

Збільшення поля зору (FOV) покращує ймовірність ідентифікації зірок, але водночас знижує точність вимірювань їхніх позицій, що може негативно вплинути на загальну точність навігації. Багато сучасних алгоритмів ідентифікації розраховані на обробку обмеженої кількості спостережуваних об'єктів, тому при ширшому FOV виникає потреба у розробці нових алгоритмів для ефективного обробки більшого обсягу даних. Крім того, фізичні перешкоди, такі як хмари або місяць, можуть закривати частину зірок, зменшуючи кількість доступних для спостереження об'єктів і ускладнюючи позиціонування. Збільшення FOV також може вимагати використання більш складних та дорогих оптичних систем, що не завжди прийнятно для різних типів суден.

Наукові підходи, проаналізовані у наведених роботах [1–17], вказують на перспективність поєднання традиційних навігаційних методів (зокрема, використання методів морехідної астрономії для визначення місця судна) з інноваційними інструментами та спеціалізованими програмними середовищами. Така інтеграція забезпечить надійність та безперервність навігації у випадках, коли судно втрачає доступ до глобальних навігаційних систем.

Однак, цей напрям потребуватиме розробки автоматизованих і інтуїтивно-зрозумілих засобів, зручних та швидких у використанні, що дозволять створити комплекс: секстан – автоматизовані розрахунки – альтернативна візуалізація на інтерактивній web-карті.

Такий комплексний підхід сприятиме підвищенню безпеки мореплавства та ефективності управління судном у критичних ситуаціях.

Основною метою дослідження є розробка та обґрунтування інтегрованого підходу до забезпечення безперервного та надійного визначення місцеположення судна в умовах збоїв навігаційного обладнання, blackout та негативного фактора людини.

Для досягнення поставленої мети слід вирішити наступні завдання:

1. Розробити та впровадити систему розрахунків що передбачає інтеграцію традиційних навігаційних методів зокрема, методів морехідної астрономії з альтернативними та незалежними автоматизованими системами розрахунку положення судна. Впровадити алгоритмічні рішення для автоматичного переходу на резервні методи визначення координат у разі компрометації або недоступності електронних сигналів.

2. Розробити програмний засіб альтернативної електронної картографії на прикладі методу «Dead Reckoning», але повністю незалежної від ECDIS та GPS, з можливістю візуалізації дійсного положення судна на інтерактивній web-карті.

Основний матеріал дослідження. Задля виконання першого завдання дослідження слід побудувати систему розрахунків на основі методів морехідної астрономії.

Забезпечення виконання першого завдання дослідження фактично передбачає розв’язок класичної задачі на визначення місця судна за різночасними спостереженнями Сонця. Внесення даних для перших і других спостережень організовано на різних аркушах (рис. 1). Спостерігач особисто вносить до програми наступні дані:

- гринвіцьку дату і час спостережень;
- швидкість судна;
- істинний курс судна;
- відлік лагу на момент перших і других спостережень;
- зчислимі координати;
- висоту ока спостерігача над рівнем моря, атмосферний тиск, температуру повітря на момент перших і других спостережень;
- визначену поправку індексу секстана;
- значення гринвіцького годинного кута та схилення з Nautical Almanac.

Для зручності використання, температуру повітря та атмосферний тиск можна вносити у тих одиницях у яких показують прилади на судні.

Програма побудована таким чином, що дозволяє опрацювати спостереження виконанні за допомогою секстана.

Перші спостереження			
Гринвіцька дата спостережень	14 травня 2024		
Швидкість судна	12,0 уз		
Істинний курс судна	273,0 °		
Відлік лагу	12,4 милі		
Зчислима широта	Lat = 42 ° 47,0 ' N		
Зчислима довгота	Long = 27 ° 16,0 ' W		
Обробка спостережень	Гринвіцький час	відлік секстану	
	15 h 38 m 01 s	56 ° 08,5 '	
	15 h 39 m 28 s	55 ° 55,3 '	
	15 h 40 m 58 s	55 ° 40,9 '	
	15 h 41 m 34 s	55 ° 25,0 '	
	15 h 43 m 02 s	55 ° 12,5 '	
Середній відлік секстану	55 ° 41,4 '		
Середній час	15 h 40 m 36 s		
Висота ока спостерігача	eye = 12,0 m		
Атмосферний тиск	pressure = 1000 mb		
	mb		
	105 Pa		
	750 mmHg		
	inHg		
Температура	temperature = 10 ° C		
	10 ° C		
	°F		
Поправка індексу секстана	I = 0 ° 02,4 '		
Показання GHA Sun на UT	15 h	45 ° 54,7 '	
Показання GHA Sun на UT	16 h	60 ° 54,7 '	
Показання Dec Sun на UT	15 h	18 ° 50,8 ' N	
Показання Dec Sun на UT	16 h	18 ° 51,3 ' N	

Другі спостереження			
Гринвіцька дата спостережень	14 травня 2024		
Відлік лагу	48,8 милі		
Зчислима широта	Lat = 42 ° 49,0 ' N		
Зчислима довгота	Long = 28 ° 08,4 ' W		
Обробка спостережень	Гринвіцький час	відлік секстану	
	18 h 50 m 35 s	23 ° 10,2 '	
	18 h 52 m 18 s	22 ° 51,8 '	
	18 h 53 m 46 s	22 ° 29,0 '	
	18 h 55 m 20 s	22 ° 16,8 '	
	18 h 56 m 58 s	21 ° 53,1 '	
Середній відлік секстану	22 ° 32,2 '		
Середній час	18 h 53 m 47 s		
Висота ока спостерігача	eye = 12,0 m		
Атмосферний тиск	pressure = 994,6 mb		
	mb		
	105 Pa		
	746 mmHg		
	inHg		
Температура	temperature = 9 ° C		
	9 ° C		
	°F		
Поправка індексу секстана	I = 0 ° 02,4 '		
Показання GHA Sun на UT	18	90 ° 54,7 '	
Показання GHA Sun на UT	19	105 ° 54,6 '	
Показання Dec Sun на UT	18	18 ° 52,5 ' N	
Показання Dec Sun на UT	19	18 ° 53,1 ' N	

Рисунок 1 – Загальний вигляд аркушів внесення даних

Спостерігач вносить для перших і других спостережень значення кожного відліку секстана та момент гринвіцького часу. Вважається, що спостерігач робить серію з п'яти спостережень за Сонцем під час перших і других спостережень. Програма спочатку визначає середній час спостережень і до визначеного середнього часу приводить висоти, що були виміряні за допомогою секстана з урахуванням руху судна (рис. 2). Зміна висоти для кожного окремого спостереження визначається формулою:

$$\Delta H' = -0,25 \cdot \cos Lat \cdot \sin Z \cdot \Delta T + v \cdot \cos(Lat - TC), \quad (1)$$

де Lat – значення широти, Z – азимут на світило, ΔT – проміжок часу між середнім часом серії спостережень і часом конкретного спостереження у серії, v – швидкість судна, TC – істинний курс судна. Відповідно приведена висота буде визначатися формулою:

$$H_{\text{привед}} = H_s + \Delta H', \quad (2)$$

де H_s – відлік секстану на світило.

1	перші спостереження																			
2			обробка спостережень																	
3		GT	HS	Проміжки від середнього моменту часу	DN	Приведена висота														
4		15,63361111	56,14166667	0,0432222222	155,6 s	23,6223426'	56,53537238'													
5		15,65777778	55,92166667	0,0190555555	68,6 s	10,41447752'	56,09524129'													
6		15,68277778	55,68166667	-0,005944444	-21,4 s	-3,24883118'	55,62751948'													
7		15,69277778	55,41666667	-0,015944444	-57,4 s	-8,714154661'	55,27143076'													
8		15,71722222	55,20833333	-0,040388888	-145,4 s	-17,33418185'	54,9194303'													
9	середні значення	15,67683333	55,674				55,68979884													
10																				
11	кількість вимірів			5																
12																				
13	другі спостереження																			
14																				
15		18,84305556	23,17	0,0534444444	192,4 s	35,13699845'	23,75561664'													
16		18,87166667	22,86333333	0,0248333333	89,4 s	16,32665105'	23,13544418'													
17		18,89611111	22,48333333	0,0003888888	1,4 s	0,2556746249'	22,48759458'													
18		18,92222222	22,28	-0,025722222	-92,6 s	-16,91105019'	21,99814916'													
19		18,94944444	21,885	-0,052944444	-190,6 s	-34,80827394'	21,3048621'													
20	середні значення	18,8965	22,53633333				22,53633333													
21																				
22	кількість вимірів			5																
23																				

Рисунок 2 – Аркуш обробки спостережень висот світила

Після приведення кожної висоти в серії спостережень, програма визначає чи є промахи у спостереженнях. Промах визначається як значення більше чи менше за потрійне значення середнього квадратичного відхилення:

$$H_{\min}^{max} = \bar{H}_{\text{привед}} \pm 3 \cdot \sqrt{\frac{\sum_1^n (H_i \text{привед} - \bar{H})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

де $\bar{H}_{\text{привед}}$ – середня приведена висота з серії спостережень, \bar{H} – середня висота серії спостережень, $H_i \text{привед}$ – кожна приведена висота в серії спостережень.

Сповіднення про наявність промаху у серії спостережень відображається на аркуші внесення даних (рис. 3).

11	Обробка спостережень	Гринвіцький час			відлік секстану		
12		15 h	38 m	01 s	56 °	08,5'	промах
13		15 h	39 m	28 s	55 °	50,3'	
14		15 h	40 m	58 s	55 °	40,9'	
15		15 h	41 m	34 s	55 °	25,0'	
16		15 h	43 m	02 s	55 °	12,5'	
17							

Рисунок 3 – Сповіднення про наявність промаху у серії спостережень

Визначення зчислимих висоти й азимуту відбувається для кожного спостереження окремо за формулами

$$\cos H_c = \frac{\sin LHA \cdot \cos Dec}{\sin Z}, \quad (4)$$

$$\tan Z = \frac{\sin LHA}{(\tan Dec - \tan Lat \cdot \cos LHA) \cos Lat}, \quad (5)$$

де *LHA* та *Dec* – відповідно місцевий годинний кут та схилення Сонця на час спостережень. Визначення місцевого годинного кута та схилення Сонця відбуваються на окремому аркуші за відомою схемою наведеною у *Nautical Almanac* (рис. 4).

1	Перше спостереження			Друге спостереження		
2						
3	UT	15 h	40 m 36 s	18 h	53 m	47 s
5	GHA Sun		45 ° 54,7 '		90 °	54,7 '
6	GHA Sun inc		10 9,0		13	26,7
8	Sum GHA Sum		56 ° 3,7 '		104 °	21,4 '
9	Long	W	27 16,0	W	28	08,4
11	LHA Sun	W	28 ° 47,7 '	W	76 °	13,0 '
13	LHA Sun	W	28 ° 47,7 '	W	76 °	13,0 '
15	LHA Sun	W	28 ° 47,7 '	W	76 °	13,0 '
17	Dec Sun	N	18 ° 50,8 '	N	18 °	52,5 '
18	Dec Sun corr		0 ° 0,3 '		0 °	0,5 '
20	Sum Dec Sun	N	18 ° 51,1 '	N	18 °	53,0 '

Рисунок 4 – Визначення місцевого годинного кута та схилення Сонця

Визначення місцевого годинного кута та схилення Сонця на середній гринвіцький час спостережень відбувається за тією ж схемою, що наводяться у *Nautical Almanac*, що в свою чергу, дозволяло контролювати правильність розрахунків екваторіальних координат програмою (рис. 5).

Перші спостереження						
	Lat =	42 °	47,0 '	N	42,78333	
	Dec =	18 °	51,1 '	N	18,85231	
	LHA Sun =	28 °	47,7 '	W	28,79500	
	tanZc =	-1,39760				
Зчислимий азимут	Zc =	125 °	35,1 '	N W	-54,41580	125,5841!
	cosHc =	0,56047				
Зчислима висота	Hc =	55 °	54,7 '		55,91194	
Другі спостереження						
	Lat =	42 °	49,0 '	N	42,81667	
	Dec =	18 °	53,0 '	N	18,88396	
	LHA Sun =	76 °	13,0 '	W	76,21601	
	tanZc =	10,91791				
Зчислимий азимут	Zc =	84 °	46,0 '	N W	84,76673	84,76673
	cosHc =	0,92277				
Зчислима висота	Hc =	22 °	39,9 '		22,66535	

Рисунок 5 – Визначення висоти й азимута світила на момент спостережень

Виправлення висот Сонця відбувались з урахуванням поправки індексу секстана, нахилення горизонту, атмосферної рефракції з урахуванням температури повітря і атмосферного тиску, паралаксу та півдіаметру Сонця на день спостережень (рис. 6).

1	Перші спостереження									
2										
3	Відлік секстану	HS =	55 °	41,4 '					перший день року	
4	Поправка індексу	I =	02,4						день місяць рік	
5	Нахилена горизонту	D =	-6,1		55,62816				1 1 2024	
6	Атмосферна рефракція з урахуванням тиску і температури	R =	-0,6		90°- HS = 34,31020				1/1/2024	
7	Паралакс	HP =	0,1						133 - кількість днів від початку року	
8	Півдіаметр	SD =	15,8							
10	Обсервована висота світила	Ho =	55 °	52,9 '	55,88215	55	52,92934			
12	Другі спостереження									
13										
14	Відлік секстану	HS =	22 °	32,2 '					перший день року	
15	Поправка індексу	I =	02,4						день місяць рік	
16	Нахилена горизонту	D =	-6,1		22,47470				1 1 2024	
17	Атмосферна рефракція з урахуванням тиску і температури	R =	-2,2		90°- HS = 67,46366				1/1/2024	
18	Паралакс	HP =	0,1						133 - кількість днів від початку року	
19	Півдіаметр	SD =	15,8							
21	Обсервована висота світила	Ho =	22 °	42,2 '	22,70276	22	42,16614			

Рисунок 6 – Виправлення висоти Сонця

Нахилення видимого горизонту визначається за формулою

$$D = -1,7603\sqrt{eye}, \quad (6)$$

де eye – висота ока спостерігача над рівнем моря.

Атмосферна рефракція з урахуванням атмосферного тиску і температури повітря –

$$R = -\frac{57,085}{60} \cdot \tan(90^\circ - H_s) - \frac{0,0666}{60} \cdot \tan^3(90^\circ - H_s) \cdot \frac{0,28 \cdot \text{pressure}}{273^\circ + \text{temperature}}. \quad (7)$$

Паралакс –

$$HP = 0,0024 \cdot 60 \cdot \cos(H_s + I + D), \quad (8)$$

де I – поправка індексу секстана.

Значення півдіаметру Сонця визначається за таблицею.

Таблиця 1 – Значення півдіаметру Сонця від кількості днів від початку року

Кількість днів від початку року		Півдіаметр Сонця
0 – 33	331 – 365	16,3'
34 – 63	302 – 330	16,2'
64 – 86	280 – 301	16,1'
87 – 107	258 – 279	16,0'
108 – 132	234 – 257	15,9'
133 – 233		15,8'

Визначення переносу для кожного спостереження визначається на окремому аркуші (рис. 7).

1	Перші спостереження		
2	Но =	55 °	52,9 '
3	Нс =	55 °	54,7 '
5	Но - Нс =	0 °	-1,8 '
6			
7	Другі спостереження		
8	Но =	22 °	42,2 '
9	Нс =	22 °	39,9 '
11	Но - Нс =	0 °	2,2 '
12			

Рисунок 7 – Визначення переносу

Обсервоване місце судна визначається на гринвіцький момент других спостережень за наступними формулами:

$$Lat_o = Lat_c + DifLat; \quad (9)$$

$$Long_o = Long_c + DifLong. \quad (10)$$

де $DifLat$ та $DifLong$ визначаються з наступної системи, де кожне рівняння уявляє собою висотну лінію положення.

$$\begin{cases} DifLat = -\tan Z_1 \cdot DifLong + \frac{(H_o - H_c)_1}{\cos Z_1}; \\ DifLat = -\tan Z_2 \cdot DifLong + \frac{(H_o - H_c)_2}{\cos Z_2}. \end{cases} \quad (11)$$

Для врахування всіх можливих ситуацій розташування висотних ліній положення складено 64 системи рівнянь, а саме для таких випадків.

Таблиця 2 – Ситуації у розташуванні висотних ліній спостереження

Перша висотна лінія положення	Друга висотна лінія положення
$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c < 0$	$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c < 0$
	$90^\circ < Z < 180^\circ; H_o - H_c < 0$
	$180^\circ < Z < 270^\circ; H_o - H_c < 0$
	$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c < 0$
	$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c > 0$
	$90^\circ < Z < 180^\circ; H_o - H_c > 0$
	$180^\circ < Z < 270^\circ; H_o - H_c > 0$
	$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c > 0$
...	...
$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c >$	$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c < 0$
	$90^\circ < Z < 180^\circ; H_o - H_c < 0$
	$180^\circ < Z < 270^\circ; H_o - H_c < 0$
	$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c < 0$
	$0^\circ < Z < 90^\circ; H_o - H_c > 0$
	$90^\circ < Z < 180^\circ; H_o - H_c > 0$
	$180^\circ < Z < 270^\circ; H_o - H_c > 0$
	$270^\circ < Z < 360^\circ; H_o - H_c >$

Із метою оцінки точності визначення місця обсервованої точки місця судна визначався радіус кола середньої квадратичної похибки

$$R = \frac{\sqrt{2m^2 + m_c^2}}{\sin(Z_2 - Z_1)} \tag{12}$$

де m – середня квадратична похибка у визначенні висотної лінії положення (приймалася така, що дорівнює $0,5'$), m_c – середня квадратична похибка зчислення між першою та другою висотними лініями положення

$$m_c = \pm \sqrt{\left(\frac{S \cdot m_k}{57,3^\circ}\right)^2 \sin^2(Z_1 - TC) + \left(\frac{S \cdot m_l}{100}\right)^2 \cos^2(Z_1 - TC)}, \tag{13}$$

де m_k – середня квадратична похибка у визначенні курсу судна (приймалася така, що дорівнює $\pm 0,5^\circ$), m_l – середня квадратична похибка у визначенні поправки лага (приймалася така, що дорівнює $\pm 0,2\%$), S – плавання, TC – істинний курс судна.

Впровадження запропонованих алгоритмічних рішень для автоматичного переходу на резервні методи визначення координат у разі недоступності сигналів GPS, запропонований метод розрахунків, дозволяє у лічені хвилини отримати результат.

Розрахована відповідь наводилась на окремому аркуші (рис. 8).

Обсервовані координати		
Гринвіцький час	GT =	18 h 53 m 47 s
Обсервована широта	lat =	42 ° 54,51 ' N
Обсервована довгота	long =	28 ° 10,78 ' W
Радіус кола погрішності місця точки	R =	1,13 '

Рисунок 8 – Обсервовані координати місця судна

Перевірка математичної моделі здійснювалась за допомогою розв'язання задач на визначення місця судна за різночасними спостереженнями Сонця із збірника [20], і показала, що визначення обсервованих координат за допомогою розробленої програми потрапляє в 95% коло обсервованої точки місця судна при визначенні класичним зчислимо-обсервованим методом координат місця судна.

Після отримання результатів розрахунків з'являється можливість їх застосування у незалежній інтерактивній картографічній системі.

Отже, задля другого завдання дослідження, слід розробити засіб альтернативної електронної картографії на прикладі методу «Dead Reckoning», такий, що є незалежним від ECDIS та GPS, із можливістю візуалізації дійсного положення судна на інтерактивній web-карті.

Отже, у рамках завдання, представлено інтерактивний програмний засіб, що надає можливість судноводієві вводити географічні координати суднових позицій, автоматично візуалізувати їх у вигляді маркерів на цифровій карті, будувати відрізки маршруту між точками та обчислювати ключові навігаційні параметри (швидкість руху судна у вузлах та курс у градусах). Програма побудована на основі відкритих бібліотек Python, таких як folium, геору та іруwidgets, що забезпечують доступність, гнучкість і можливість автономної роботи. Система є потенційно корисною в умовах непередбачуваних комунікаційних обмежень, зокрема під час «blackout» або обмеженого доступу до інтернет-мережі, оскільки може бути розгорнута локально на пристроях із попередньо підготованими картографічними даними.

Геоінформаційні системи (ГІС) та навігаційні програмні продукти традиційно залежать від постійного доступу до мережі інтернет, онлайн-сервісів картографування та актуалізації даних про місцеперебування об'єктів. Проте в сучасних реаліях все частіше виникають ситуації, коли забезпечення безперервної роботи електронних навігаційних засобів може бути ускладненим через відсутність електроенергії (blackout), відсутність стійкого мережевого з'єднання або логістичні перешкоди щодо оновлення даних. Відтак виникає потреба у програмних інструментах, здатних функціонувати з використанням мінімальних ресурсів та забезпечувати основні навігаційні функції локально, без залежності від зовнішніх джерел інформації.

Отже, розробка програмного засобу дозволить:

1. Інтерактивно вводити координати морських маршрутних точок.
2. Візуалізувати ці точки та з'єднувати їх відрізками маршруту.
3. Автоматично розраховувати та відображати швидкість судна та орієнтовний курс руху.

Програмний засіб реалізовано мовою програмування Python. Основними компонентами є:

1. folium – бібліотека Python, що інтегрує можливості leaflet.js для побудови динамічних, інтерактивних мап у середовищі Jupyter Notebook або автономних HTML-файлах.

2. іруwidgets – бібліотека для створення інтерактивних елементів інтерфейсу (поля введення, кнопки) безпосередньо у середовищі Jupyter Notebook. Це дозволяє користувачеві оперативно взаємодіяти з програмою без необхідності розробляти окремий графічний застосунок.

3. геору – інструмент для географічних обчислень, зокрема розрахунку відстаней між точками за допомогою формули великого кола. На основі цих даних здійснюється конвертація в морські милі та визначається швидкість, а також обчислюється азимутальний кут (курс).

Архітектурно програмний засіб складається з модулів (рис. 9):

1. Модуль введення даних: забезпечує отримання широти та довготи від судноводія через елементи інтерфейсу іруwidgets.

2. Модуль обробки координат: зберігає послідовність точок, опрацьовує їх при кожному оновленні.

3. Модуль обчислень: використовує функціонал геору для визначення відстані та внутрішньо реалізовані формули для обчислення курсу.

4. Модуль візуалізації: генерує карту за допомогою folium, розміщує маркери, відрізки маршруту та текстові позначення швидкості й курсу.

5. Модуль автономності: передбачає можливість попереднього кешування картографічних тайлів або використання локальних даних про місцевість, що забезпечить роботу застосунку в офлайновому режимі.

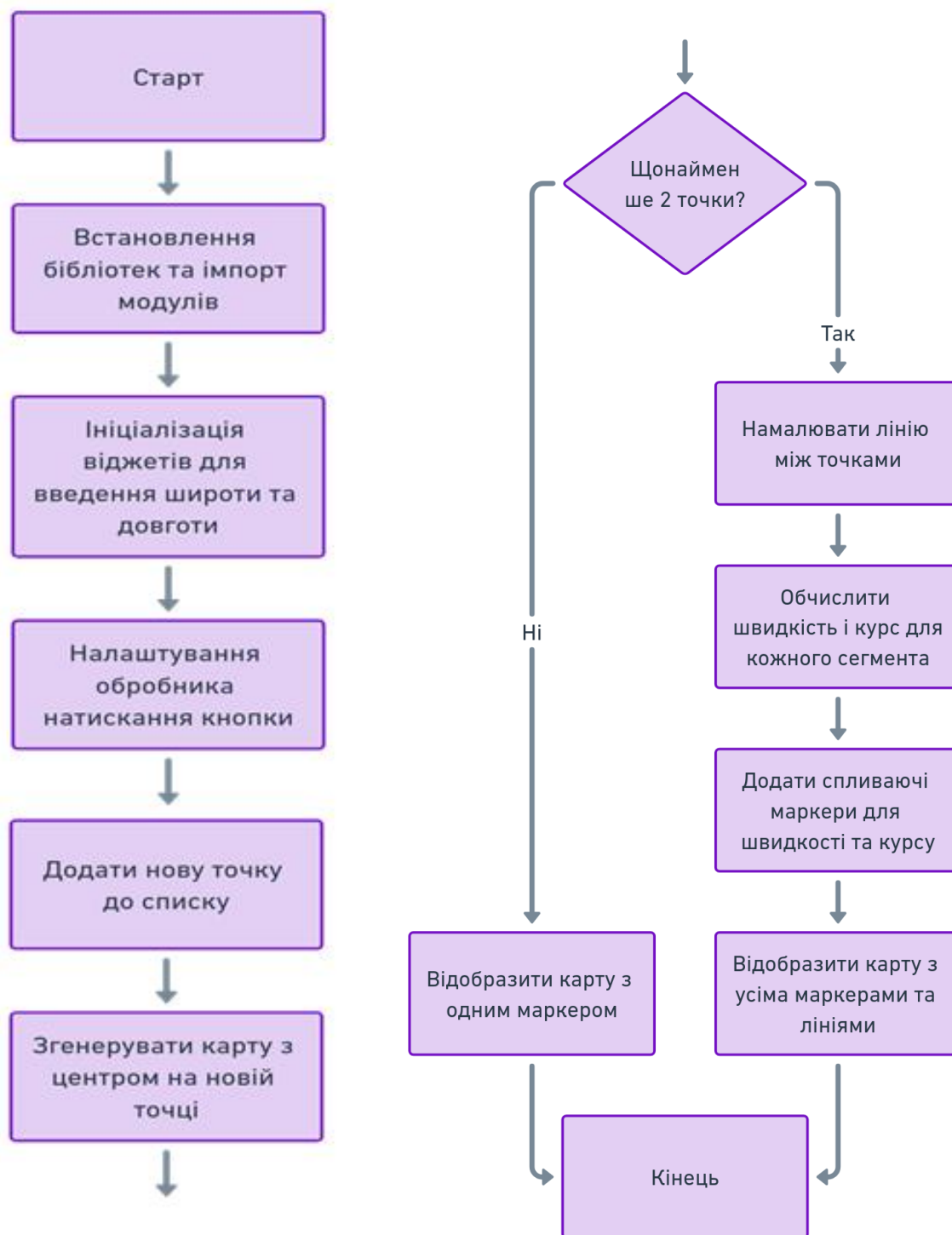


Рисунок 9 – Блок-схема роботи програмного засобу

Реалізація та лабораторне тестування.

1. Інтерактивне додавання нових точок: Судноводій вводить широту та довготу, після чого натискає кнопку оновлення. Маркер нової точки з'являється на карті, а маршрут оновлюється, якщо це не перша точка (рис. 10, 11).

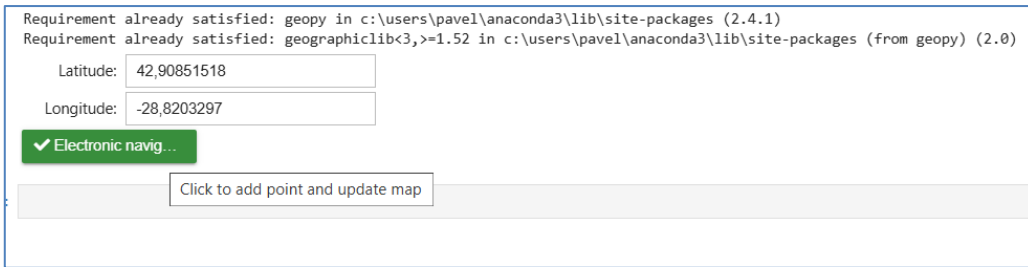


Рисунок 10 – Введення першої координати у діалогове вікно програмного засобу

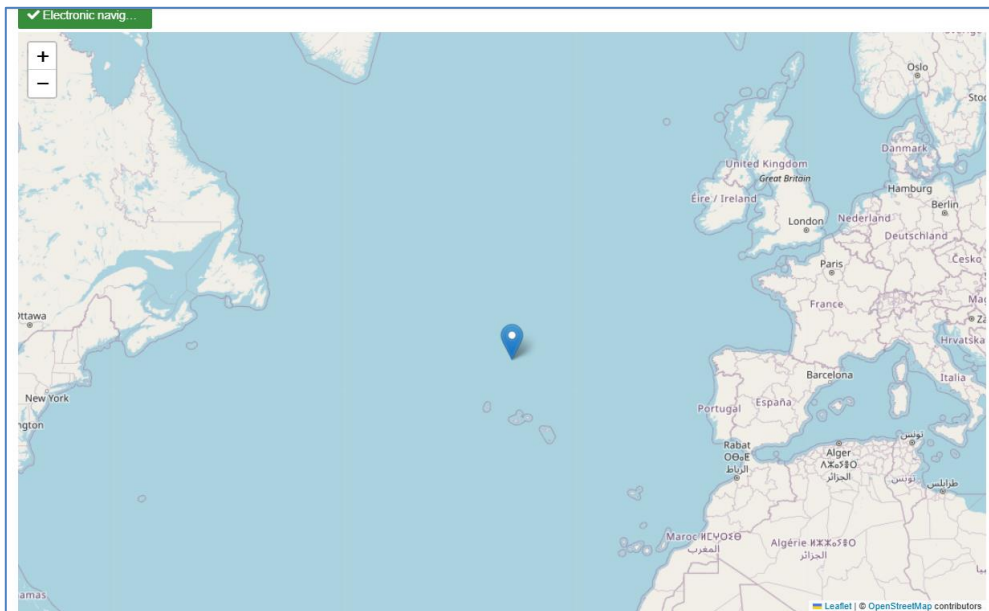


Рисунок 11 – Автоматичне встановлення маркера на інтерактивній карті

2. Автоматична побудова маршруту (рис. 12): При кожному додаванні координати програма будує лінійну секцію між новою та попередньою точкою.

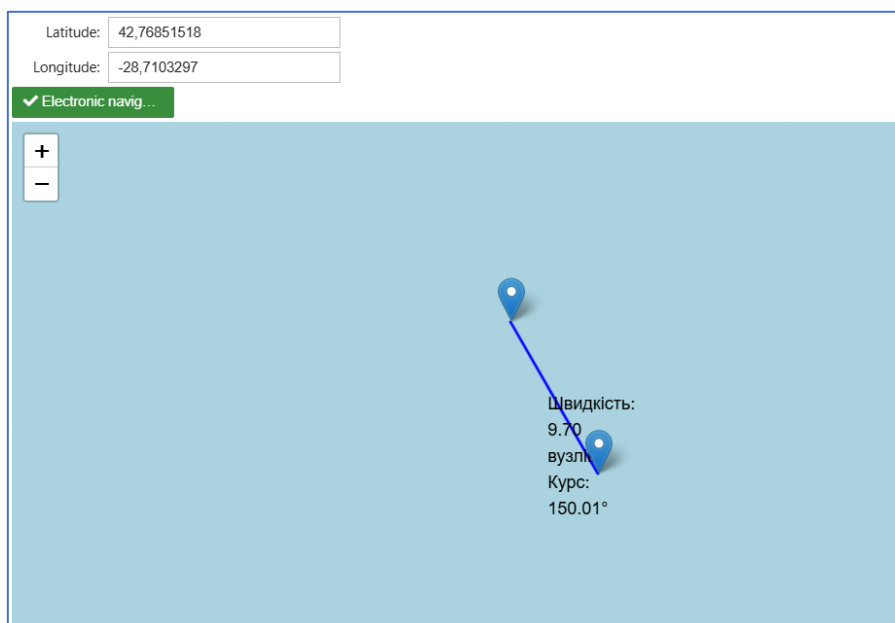


Рисунок 12 – Автоматичне додавання другої точки маршруту

3. Розрахунок швидкості та курсу: Відстань між останніми двома точками перетворюється у морські милі, а при заданому часовому інтервалі між фіксаціями точок отримана величина використовується як наближена швидкість (у вузлах). Паралельно обчислюється азимутальний курс руху. Ці дані візуалізовано на карті у вигляді текстових міток (рис. 13).

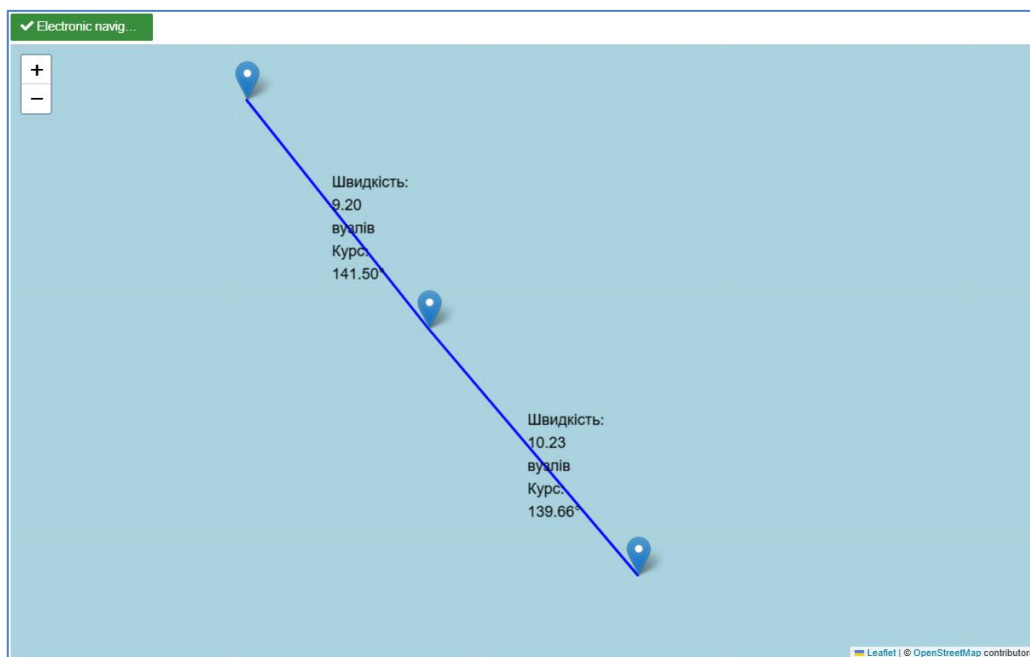


Рисунок 13 – Додавання нових точок і параметрів руху судна на інтерактивну карту

Реалізація програмного засобу на судні буде зручним інструментом для:

1. Штурманів та мореплавців, які бажають оперативно візуалізувати свій маршрут у випадках обмеженого доступу до спеціалізованих навігаційних систем.
2. Рятувальних операцій та експедиційних груп, коли стабільний зв'язок відсутній або тимчасово недоступний, але необхідно швидко оцінювати пройдену відстань та орієнтуватися в просторі.
3. Навчальних цілей, для студентів та курсантів морських навчальних закладів, які можуть досліджувати основи навігації в режимі локальної роботи з картою.

Таким чином, перевагами розробленої системи є:

1. Автономність: можливість роботи на ноутбуках та портативних пристроях з попередньо встановленим ПЗ та кешованими картами.
2. Простота використання та гнучкість: дружній інтерфейс, розширюваність коду та використання відкритих інструментів дозволяє швидко адаптувати рішення під конкретні завдання.
3. Незалежність від постійного інтернет-з'єднання: програма може функціонувати за умови наявності лише електроживлення пристрою (чи тимчасової автономії батареї), без запиту до віддалених серверів.

Актуальність під час блекауту. Умови блекауту характеризуються відсутністю стабільного енергопостачання та можливими проблемами з інтернет-підключенням. У свою чергу, запропонований інструмент дозволяє:

- використовувати попередньо згенеровані або локальні дані карти;
- продовжувати відображення та планування маршруту судна без онлайн-сервісів;
- оцінювати швидкість та напрямок руху під час екстремальних умов, що може відіграти важливу роль у прийнятті навігаційних рішень або пошуково-рятувальних операціях.

Отже, розроблений програмний інструмент демонструє практичний підхід до побудови інтерактивної навігаційної системи, здатної працювати автономним чином, без

безперервного доступу до інтернет-ресурсів. Завдяки відкритій архітектурі та використанню доступних бібліотек Python, систему можна легко адаптувати та розширювати під специфічні потреби користувача. Такий підхід є актуальним у контексті зростаючих викликів стабільності енергопостачання та інфраструктурного забезпечення навігаційних технологій.

Висновки. У дослідженні проаналізовано проблему залежності сучасного морського судноплавства від електронних навігаційних систем та запропоновано інноваційний підхід до забезпечення безпеки мореплавства в умовах технічних збоїв. Науковий внесок полягає у створенні алгоритмічної моделі, яка дозволяє швидко переходити від цифрових систем навігації до традиційних методів та астрономічних спостережень. Використання інтегрованої системи розрахунків, а також розробка програмного забезпечення для візуалізації траєкторії судна на інтерактивній карті дозволяє забезпечити автономну та надійну навігацію навіть у складних умовах. Розроблені рішення є практично орієнтованими та можуть бути використані для підвищення стійкості навігаційних систем до зовнішніх загроз і технічних обмежень.

Окрім автоматизованого переходу на резервні методи, важливим є впровадження програмного інструменту на базі відкритих бібліотек Python (folium, geopy, ipywidgets), що забезпечує можливість локальної роботи без доступу до глобальних систем картографування. Запропонований інструмент дозволяє інтерактивним шляхом вводити координати, будувати маршрут. Це надає екіпажу гнучкий і надійний інструмент для навігації у критичних ситуаціях, мінімізуючи ризики відхилення від маршруту та забезпечуючи оперативну обробку даних у реальному часі.

Загалом, прискорення розрахунків засобами автоматизації й інтерактивної візуалізації дозволяє виконати обчислення упродовж 7–11 хвилин.

Перспективні напрямки дослідження. Перспективи подальшого розвитку зосереджуються на кількох ключових напрямках. Удосконалення алгоритмів адаптивного перемикачання між традиційними та сучасними методами з урахуванням, технічних збоїв та людського фактора. Апробація системи на реальних суднах та впровадження навчальних модулів для підготовки судноводіїв сприятиме підвищенню кваліфікації екіпажу та стійкості навігаційних процесів до зовнішніх викликів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Урум Н. С., Майданевич С. Б., Іваненко В. М., & Трофименко І. В. Морський секстан: історія виникнення, етапи і шляхи розвитку, кращі технічні рішення. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2023. 34(2), 221–234. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/37>.
2. Вільський Г. Б., & Надич М. М. Моделювання інформаційної безпеки судна. Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2011. (4), 149–153.
3. Мельник О. М., Щербина О. В., Корякін К. С., & Бурлаченко Д. А. Огляд та перспективи використання сучасних систем курсовказання на морських суднах для забезпечення навігаційної безпеки. Судноводіння, 2022. 21(1), 13–22. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-13>.
4. Дакі О. А., Урум Н. С., Федунів В. М., & Бажак О. В. Методи морехідної астрономії в сучасності. Системи управління, навігації та зв'язку, 2021. 3(65), 24–29. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.024>.
5. Маранов О. В. Прогнозування відмов судових навігаційних систем з використанням методів машинного навчання. Системи управління, навігації та зв'язку, 2023. 3(65), 37–46. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.037>.
6. Мельник О. М., Онищенко С. П., Логінов О. В., Окулов В. І., & Пуляев І. О. Актуальні проблеми морської безпеки та сучасні шляхи забезпечення охорони судна. Комунальне господарство міст, 2021. 6(166), 204–210. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210>.

7. Маранов О. В. Метод моніторингу та підвищення характеристик точності суднового супутникового навігаційного обладнання. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки, 2023. 46, 158–165. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288185>.
8. Nguyen T. D. Applying the least square method to calculate the non-simultaneous errors of ship's position determined by global positioning system (GPS). Journal of Physics: 2020. Conference Series, 1679, 052015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052015>.
9. DNV. Managing the Risks of Blackout for Passenger Ship Owners and Operators. DNV Guidance Paper. 2024. <https://www.dnv.com>.
10. Якусевич Ю. Г., Тришин В. В., & Дорофєєва З. Я. Побудова навігаційної системи судна на основі сучасних інформаційних технологій. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2021. 4(70), 83–92. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.70.12>.
11. Utomo M. N. S., Wiweko A., Siregar M. S., David M., & Nurmala E. The Role of Emergency Generator during Black-Out on the MV. Kelud. Jurnal Transportasi dan Bahari, 2024. 1(1), 9–20. <https://jurnal.atriastar.com/index.php/altair>.
12. Kalinichenko Y., Tomchakovsky G., Adamchuk M., Koliesnik O., & Khlebnikov S. GeoGebra for navigational purposes. Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference, Tokyo, Japan, 2023. 389–392. Retrieved from <https://isg-konf.com/innovative-approaches-to-solving-scientific-problems/>.
13. Kalinichenko Y., Adamchuk M., Tomchakovsky G., Koliesnik O., & Oberto Santana L. GeoGebra for navigation purposes: Theory and application. Innovative Approaches to Solving Scientific Problems. 2023. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-7\(21\)-230-243](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-7(21)-230-243).
14. Калініченко Є., Томчаковський Г., Приходько В., Оберто Сантана Л., & Пічков В. Застосування методу "Dead Reckoning" для забезпечення роботи ЕКНІС при відмові суднової станції GPS. Технічні науки: Інноваційні наукові дослідження: теорія та практика, 2023. 490–493. Retrieved from <https://radionavlab.ae.utexas.edu/images/stories/files/papers/yacht.pdf>.
15. Збірник задач з морехідної астрономії / ред. В. А. Сеняєва. Одеса, 2002. 184 с.
16. Tsai, K.-C., Tseng, W.-K., Chen, C.-L., & Sun, Y.-J. (2022). A Novel Analytical Solution Method for Celestial Positioning. Journal of Marine Science and Engineering, 10(6), 771. <https://doi.org/10.3390/jmse10060771>.
17. Wakita, K., Hane, F., Sekiguchi, T., Shimizu, S., Mitani, S., Akimoto, Y., & Maki, A. (2024). Conceptual design on the field of view of celestial navigation systems for maritime autonomous surface ships. arXiv preprint arXiv:2408.15765. <https://arxiv.org/abs/2408.15765>.

REFERENCES

1. Urum, N. S., Maidanevych, S. B., Ivanenko, V. M., & Trofymenko, I. V. (2023). Morskyi sekstan: istoriia vynyknennia, etapy i shliakhy rozvytku, krashchi tekhnichni rishennia. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seria: Tekhnichni nauky, 34(2), 221–234. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/37>.
2. Vilskyi, H. B., & Nadych, M. M. (2011). Modeliuvannia informatsiinoi bezpeky sudna. Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu, (4), 149–153.
3. Melnyk, O. M., Shcherbyna, O. V., Koriakin, K. S., & Burlachenko, D. A. (2022). Ohliad ta perspektyvy vykorystannia suchasnykh system kursovkazannia na morskykh sudnakh dlia zabezpechennia navihatsiinoi bezpeky. Sudnovodinnia. 21(1), 13–22. <https://doi.org/10.33216/2222-3428-2021-21-13>.
4. Daki, O. A., Urum, N. S., Fedunov, V. M., & Bazhak, O. V. (2021). Metody morekhidnoi astronomii v suchasnosti. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku, 3(65), 24–29. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.3.024>.
5. Maranov, O. V. (2023). Prohnozuvannia vidmov sudnovykh navihatsiinykh system z vykorystanniam metodiv mashynnoho navchannia. Systemy upravlinnia, navihatsii ta zviazku,

3(65), 37–46. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.037>.

6. Melnyk, O. M., Onyshchenko, S. P., Lohinov, O. V., Okulov, V. I., & Puliaiev, I. O. (2021). Aktualni problemy morskoi bezpeky ta suchasni shliakhy zabezpechennia okhorony sudna. Komunalne gospodarstvo mist, 6(166), 204–210. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210>.

7. Maranov, O. V. (2023). Metod monitorynhu ta pidvyshchennia kharakterystyk tochnosti sudnovoho suputnykovoho navihatsiinoho obladnannia. Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Serii: Tekhnichni nauky, 46, 158–165. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.46.2023.288185>.

8. Nguyen, T. D. (2020). Applying the least square method to calculate the non-simultaneous errors of ship's position determined by global positioning system (GPS). Journal of Physics: Conference Series, 1679, 052015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1679/5/052015>.

9. DNV (2024). Managing the Risks of Blackout for Passenger Ship Owners and Operators. DNV Guidance Paper. <https://www.dnv.com>.

10. Yakusevych, Yu. H., Tryshyn, V. V., & Dorofieieva, Z. Ya. (2021). Pobudova navihatsiinoi systemy sudna na osnovi suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii. Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho natsionalnogo universytetu Povitrianykh Syl, 4(70), 83–92. <https://doi.org/10.30748 /zhups.2021.70.12>.

11. Utomo, M. N. S., Wiweko, A., Siregar, M. S., David, M., & Nurmala, E. (2024). The Role of Emergency Generator during Black-Out on the MV. Kelud. Jurnal Transportasi dan Bahari, 1(1), 9–20. <https://jurnal.atrriestar.com/index.php/altair>.

12. Kalinichenko, Y., Tomchakovsky, G., Adamchuk, M., Koliesnik, O., & Khlebnikov, S. (2023). GeoGebra for navigational purposes. Proceedings of the XIX International Scientific and Practical Conference, Tokyo, Japan, 389–392. Retrieved from <https://isg-konf.com/innovative-approaches-to-solving-scientific-problems/>.

13. Kalinichenko, Y., Adamchuk, M., Tomchakovsky, G., Koliesnik, O., & Oberto Santana, L. (2023). GeoGebra for navigation purposes: Theory and application. Innovative Approaches to Solving Scientific Problems. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-7\(21\)-230-243](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2023-7(21)-230-243).

14. Kalinichenko, Ye., Tomchakovskiy, H., Prykhodko, V., Oberto Santana, L., & Pichkov, V. (2023). Zastosuvannia metodu "Dead Reckoning" dlia zabezpechennia roboty EKNIS pry vidmovi sudnovoi stantsii GPS. Tekhnichni nauky: Innovatsiini naukovi doslidzhennia: teoriia ta praktyka, 490–493. Retrieved from <https://radionavlab.ae.utexas.edu/images/stories/files/papers/yacht.pdf>.

15. Zbirnyk zadach z morekhidnoi astronomii (2002). / red. V. A. Seniaieva. Odesa, 184 s.

16. Tsai, K.-C., Tseng, W.-K., Chen, C.-L., & Sun, Y.-J. (2022). A Novel Analytical Solution Method for Celestial Positioning. Journal of Marine Science and Engineering, 10(6), 771. <https://doi.org/10.3390/jmse10060771>.

17. Wakita, K., Hane, F., Sekiguchi, T., Shimizu, S., Mitani, S., Akimoto, Y., & Maki, A. (2024). Conceptual design on the field of view of celestial navigation systems for maritime autonomous surface ships. arXiv preprint arXiv:2408.15765. <https://arxiv.org/abs/2408.15765>.

Nosov P., Sokol I., Podobieda V. DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS FOR AUTOMATING ONBOARD NAVIGATION CALCULATIONS IN CRITICAL SITUATIONS

The research developed a comprehensive approach to improve the reliability of marine navigation systems in situation of electronic navigation equipment failures, cyber-attacks and blackout conditions. Innovative algorithmic solutions are proposed to ensure a rapid transition from digital navigation technologies to alternative systems based on the methods of marine astronomy and principles of the Dead Reckoning ECDIS method.

The software tool has been created for the automated calculation of vessel coordinates using a sextan. This tool takes corrections into account, methods of statistical processing of data series, automatically detects misses and determines average values with a minimum total error. Determination of observed coordinates is implemented based on mathematical models of altitude lines of position taking into account course, speed and time between observations.

In addition, an autonomous electronic mapping system based on Python libraries (folium, geopy, ipywidgets) has been developed, which provides interactive input of route points coordinates, construction of route segments, calculation of vessel's speed and course, as well as visualization of results on interactive maps. The system can function locally without access to the Internet due to the use of web-oriented map data, which ensures stability and reliability of observation even in extreme conditions.

Experimental testing has confirmed high accuracy of calculations and effectiveness of proposed solutions in situations of electronic navigation system failures. In case of blackout, the developed system allows to restore navigation functions and ensure vessel's safety.

The practical value of the work is to create a flexible, reliable navigation system that minimizes risks in case of technical failures or targeted cyberattacks. Prospects for further research include improving algorithms to reduce errors and adapting the system to real-world operating conditions on vessels in any navigation conditions.

Key words: *traditional methods of navigation; navigational astronomy; interactive mapping systems; alternative positioning systems; autonomous navigation; sextant; route visualization.*

© Носов П. С., Сокол І. В., Подобєда В. В.

Статтю прийнято до редакції 04.12.2024

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ПЕРЕДАВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ДЕТАЛЯМИ РУЛЬОВОЇ МАШИНИ ПЛУНЖЕРНОГО ТИПУ

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;

Настасенко В. О., д.т.н., професор, професор кафедри транспортних технологій та судноремонту Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, email: Nastasenko2004@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0330-1138;

Бабій М. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри суднових технічних систем і комплексів Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, email: M_Babiy@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0560-2081.

Стаття стосується навантажувальної здатності рульових машин плунжерного типу. Представлена математична модель враховує величину та співвідношення зазорів між плунжером та втулкою, а також плунжером і напрямною балкою. Залежно від співвідношення зусиль: бічного, достатнього для вибирання кутового зазору між плунжером та втулкою, та достатнього для вибирання лінійного зазору між повзуном плунжера та напрямною балкою, сприйняття бічного навантаження плунжером та напрямною балкою може відбуватись за шістьма варіантами. Записані співвідношення між згаданими зусиллями, що визначають кількість та границі переходів між описаними варіантами сприйняття навантаження. Розрахунки виконувались із використанням розробленої моделі на прикладі рульової машини Р-18. При цьому показано, що за наявності найбільших гранично допустимих правилами експлуатації зазорів, напрямна балка може сприймати 50...59% бічного навантаження лише при кутах перекладки стерна $\alpha = 21...35^\circ$, а в діапазоні найбільш поширених при роботі магістральних суден кутів повороту стерна $\alpha = 0...10^\circ$ напрямна балка взагалі свою функцію не виконує, перевантажуючи плунжери, втулки та ущільнення. Показано, що з огляду на низьку ефективність роботи та суттєве ускладнення конструкції машини напрямною балкою, резерв для підвищення технічного рівня рульових машин плунжерного типу лежить у площині застосування нових типів механізмів для передачі навантаження від плунжерів на румпель.

Ключові слова: рульова машина; плунжер; момент; навантаження; прогин.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.139-150

Вступ. Рульові машин, є одними з найбільш відповідальних елементів гвинторульового комплексу сучасних суден, від безвідмовності яких залежить безпека мореплавства та екологічна безпека людства [1]. Важливою характеристикою будь-якої машини є збережуваність – здатність зберігати стабільність технічної характеристики та робочих параметрів протягом всього періоду експлуатації. У механізмах з надлишковими зв'язками, протягом експлуатації відбувається перерозподіл навантажень між ланками, що призводить до перевантаження одних деталей і недовантаження інших [2–4]. Це може спричинити зміну технічної характеристики машини, зростання механічних втрат, що формує умови для удосконалення механізмів існуючих машин різноманітного призначення [5, 6].

Аналіз публікацій. Відомі дослідження суднових гідравлічних рульових машин (ГРМ) стосуються проблем удосконалення керування ними [7]. Дослідженню власне механізмів ГРМ присвячені роботи [8–11]. Так, у роботі [8] показано, що для механізмів плунжерних ГРМ з напрямними балками характерна наявність значної кількості надлишкових зв'язків, що потребує виконання значного обсягу пригонювальних робіт при встановленні машини на фундамент, один із варіантів удосконалення механізму для зменшення обсягу таких робіт запропоновано у [9]. У роботах [10, 11] розглянуто частинні випадки передавання поперечного навантаження плунжером та напрямною балкою за відсутності заземлення плунжера в опорах. Загальної моделі сприйняття навантаження плунжером у парі з напрямною балкою за наявності зазорів, що враховує їх величину та співвідношення між ними, наразі не створено, що планується вирішити в даній роботі.

Метою роботи є розроблення моделі сприйняття навантаження плунжером у парі з напрямною балкою, що враховує величину та співвідношення зазорів між плунжером і втулкою, а також плунжером і напрямною балкою, для подальшого аналізу впливу експлуатаційних факторів, на розподіл навантаження між плунжером та напрямною балкою, а також оцінки ефективності роботи останньої.

Завдання роботи:

– розкрити механізм сприйняття та передавання бічного навантаження плунжером та напрямною балкою за умов наявності зазорів між плунжером та втулкою, а також плунжером та напрямною балкою, а саме встановити можливі варіанти сприйняття навантаження цими деталями залежно від умов закріплення плунжера;

– отримати співвідношення для оцінки піддатливості плунжера за умови жорсткого защемлення його в одній з опор;

– записати співвідношення, що визначають кількість та границі переходів між варіантами сприйняття навантаження деталями ГРМ;

– оцінити ефективність роботи напрямної балки при перекладці стерна за наявності значних зазорів між елементами.

Виклад основного матеріалу. Аналіз розподілу навантаження між плунжером та напрямною під час роботи машини з урахуванням можливих зазорів, що виникають за рахунок зносу її деталей виконуватимемо на прикладі рульової машини Р-18 (рис. 1).



Рисунок 1 – Загальний вигляд механізму рульової машини типу Р-18

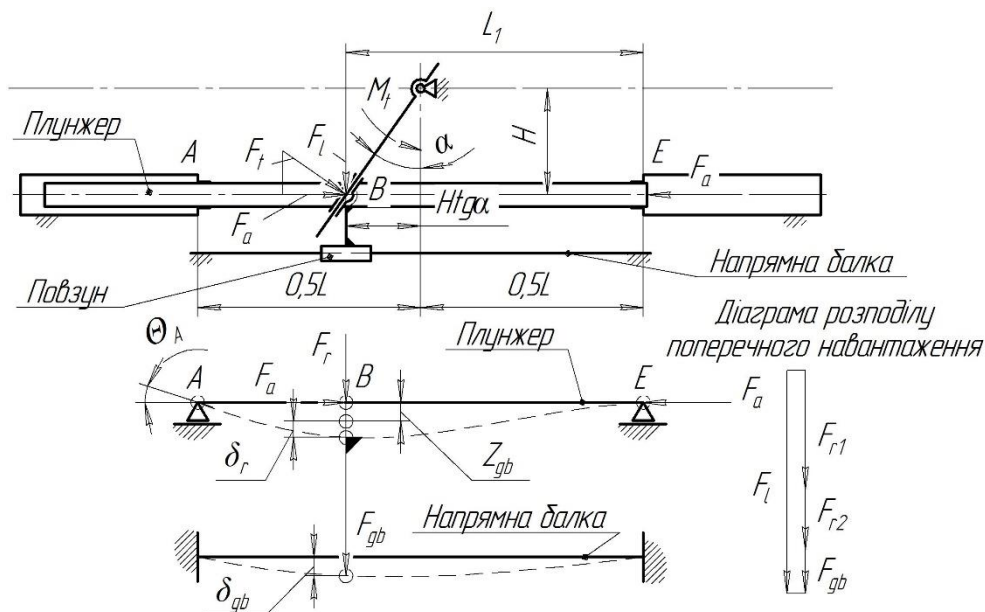


Рисунок 2 – Розрахункова схема механізму рульової машини Р-18

На першому етапі розглянемо розрахункову схему механізму такої машини, що показана на рис. 2. Бічне зусилля F_l , що діє на плунжер та напрямну балку з боку румпеля визначається відомим співвідношенням [1]:

$$F_l = F_t \sin \alpha = \frac{M_t}{2H} \sin \alpha \cos \alpha = \sum_{i=1}^n F_{ri} + F_{gb}, \quad (1)$$

де F_t – колове зусилля на румпелі;

α – кут перекладки стерна;

M_t – момент на румпелі (з урахуванням гідродинамічного опору повороту стерна та втрат в опорах балера);

H – відстань між осями балера та плунжера;

F_{ri} – частина бічного зусилля, що сприймається плунжером на i -й стадії його навантаження;

F_{gb} – частина бічного зусилля, що сприймається напрямною балкою.

Плунжер працює в умовах повздовжньо-поперечного згину, його прогин за умов відсутності защемлення в обох опорах становитиме [12]:

$$\delta_r = \frac{\delta_{r0}}{1 - \frac{F_a}{F_{Eu}}}, \quad (2)$$

де δ_{r0} – прогин плунжера як двохопорної балки при поперечному згині від дії тільки радіальної сили F_r ;

F_a – осьова сила, що стискає плунжер;

F_{Eu} – сила Ейлера для плунжера.

$$F_a = F_t \cos \alpha = \frac{M_t \cos^2 \alpha}{2H}; \quad (3)$$

$$F_{Eu} = \frac{\pi^2 EJ_r}{L_1^2}; \quad (4)$$

$$L_1 = 0,5L + Htg\alpha, \quad (5)$$

де J_r – момент інерції поперечного перерізу плунжера;

E – модуль пружності матеріалу плунжера;

L – відстань між гідроциліндрами.

Для машини Р-18 максимальний момент на румпелі складає $M_t = 1000$ кН·м, основні розміри машини наступні: $H = 600$ мм, $L = 1600$ мм. Направну та плунжер виготовлено зі сталі ($E = 2,1 \times 10^5$ МПа), останній має кільцевий переріз із зовнішнім і внутрішнім діаметрами $d_r = 240$ мм, $d_{r1} = 160$ мм та моментом інерції $J_r = 130690254$ мм⁴. За таких параметрів (для $\alpha = 35^\circ$, де максимальна довжина плунжера і величина осьового зусилля), урахування повздовжнього згину дає приріст прогину не більше 0,31% ($\delta_r = 1,0031\delta_{r0}$). З огляду на це враховуємо лише поперечний згин плунжера.

За наявності зазорів $2Z$ між плунжером та втулкою гідроциліндра, а також Z_{gb} у сполученні плунжера з напрямною балкою, сприйняття плунжером та напрямною балкою буде відбуватись у n етапів. Кількість цих етапів завчасно визначити неможливо, оскільки вони визначаються конкретним співвідношенням зазорів, жорсткістю плунжера і напрямної, а також положенням точки прикладення бічного зусилля.

У випадку відсутності чи вибиранні зазора Z_{gb} у сполученні плунжера з напрямною балкою матимемо останній, n -й етап сприйняття бічного навантаження, де утворюється елементарна двобалкова система ЕДБС (рис. 4, III), де плунжер є балкою з радіальною піддатливістю λ_{rn} , а напрямна балка – жорстко защемленою обома кінцями з радіальною піддатливістю λ_{gb} . Для такої системи справедливими є співвідношення (6) між зусиллями та деформаціями.

$$\begin{cases} F_m + F_{gb} = F_l - \sum_{i=1}^{n-1} F_{ri}; \\ \delta_m = \delta_{gb}; \\ \delta_m = F_m \lambda_m; \\ \delta_{gb} = F_{gb} \lambda_{gb}, \end{cases} \Rightarrow F_m = \left[F_l - \sum_{i=1}^{n-1} F_{ri} \right] \frac{\lambda_m}{\lambda_m + \lambda_{gb}}; F_{gb} = \left[F_l - \sum_{i=1}^{n-1} F_{ri} \right] \frac{\lambda_{gb}}{\lambda_m + \lambda_{gb}}. \quad (6)$$

де F_{ri} – поперечне зусилля, що навантажує плунжер на i -му етапі сприйняття навантаження.

Умови закріплення плунжера як двохопорної балки на i -му етапі можуть відрізнитись залежно від наступних чинників. За наявності зазора $2Z$ між плунжером та втулкою гідроциліндра (рис. 3) можливий поворот його кінця в опорі A на величину:

$$\theta_{max} = \frac{2Z}{l_s}, \quad (7)$$

де l_s – довжина плунжерної втулки.

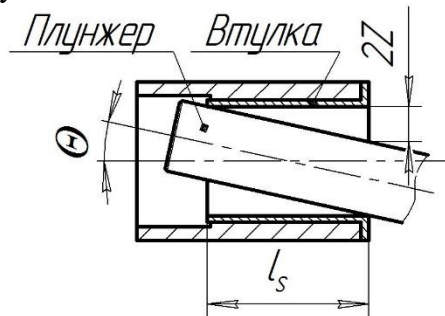


Рисунок 3 – Схема розташування плунжера у втулці

За наявності в опорі A достатнього кутowego зазора ($\theta_A \leq \theta_{max}$), плунжер матиме можливість деформуватись як балка на двох шарнірних опорах (рис. 4, I), а прогин у точці B прикладення поперечного зусилля та піддатливість для цього випадку обчислюватиметься як (8). Кут повороту в опорі A – за виразом (9) [13], а прогин і піддатливість напрямної – за виразом (10).

$$\delta_{r1} = F_{r1} \frac{L_1^2 (L - L_1)^2}{3EJ_r L} = F_{r1} \lambda_{r1}; \quad (8)$$

$$\theta_A = F_{r1} \frac{L^2 (L_1 / L - [L_1 / L]^3)}{6EJ_r}; \quad (9)$$

$$\delta_{gb} = F_{gb} \frac{L_1^3 (L - L_1)^3}{3EJ_g L^3} = F_{gb} \lambda_{gb}, \quad (10)$$

де $J_{gb} = 284981668 \text{ мм}^4$ – момент інерції поперечного перерізу напрямної балки;
 E – модуль пружності матеріалу плунжера та напрямної балки.

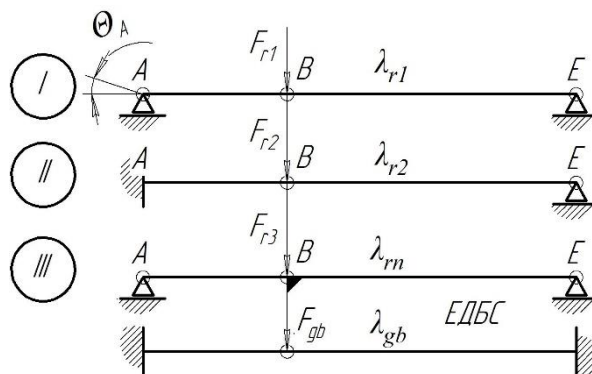


Рисунок 4 – Схема до визначення кількості стадій сприйняття навантаження

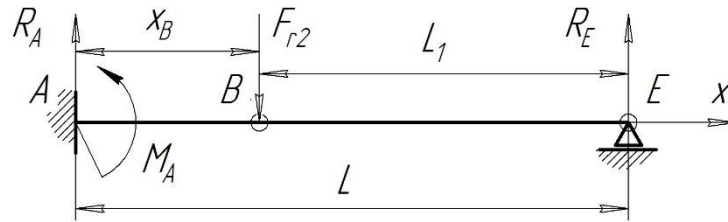


Рисунок 5 – Розрахункова схема плунжера із защемленим кінцем

У випадку відсутності куткового зазора в опорі плунжера A , її слід вважати жорстким защемленням (рис. 4, II), а вирази для прогину і піддатливості належить отримати далі.

Для цього записуємо рівняння для згинального моменту в поперечному перерізі плунжера від дії радіальної сили F_{r2} (вісь x збігається з віссю плунжера) (рис. 5):

$$M_x = M_A - R_A x. \quad (11)$$

Для знаходження реакції R_A записуємо вираз для прогину y_E в опорі E від сили F_{r2} та від сили R_E :

$$y_{EF_{r2}} = F_{r2} \frac{(L - L_1)^2 [2L + L_1]}{6EJ_r}; \quad (12)$$

$$y_{ER_E} = R_E \frac{L^3}{3EJ_r}; \quad (13)$$

Звідки, прирівнявши два останніх вирази, отримаємо співвідношення для реакцій R_E , R_A та M_A :

$$R_E = F_{r2} \frac{(L - L_1)^2 [2L + L_1]}{2L^3}; \quad (14)$$

$$R_A = F_{r2} - R_E = F_{r2} \left(1 - \frac{(L - L_1)^2 [2L + L_1]}{2L^3} \right); \quad (15)$$

$$M_A = R_E L - F_{r2} (L - L_1) = F_{r2} \left(\frac{(L - L_1)^2 [2L + L_1]}{2L^2} - (L - L_1) \right). \quad (16)$$

З урахуванням отриманих результатів, можна переписати вираз (11) для моменту в поперечному перерізі плунжера та скласти спрощене диференціальне рівняння (17) його пружної осі x :

$$M_x = F_{r2} \left\{ \left(\frac{(L - L_1)^2 [2L + L_1]}{2L^2} - (L - L_1) \right) - \left(1 - \frac{(L - L_1)^2 [2L + L_1]}{2L^3} \right) x \right\} = EJ_r \frac{d^2 y}{dx^2}; \quad (17)$$

Початкові умови для розв'язання останнього рівняння такі: при $x = 0$, $y = 0$ та $dy/dx = 0$. Розв'язання рівняння (17) дає можливість отримати вираз для прогину в т. B ($x_B = L - L_1$) прикладення бічної сили та радіальної піддатливості плунжера:

$$y_B = \delta_{r2} = F_{r2} \frac{L_1 (L - L_1)^3 [6L^2 + 3LL_1 - L_1^2]}{12EJ_r L^3} = F_{r2} \lambda_{r2}; \quad (18)$$

Поперечне зусилля на плунжері, яке необхідне для повного вибирання куткового зазора θ_{\max} в опорі A (рис. 3), обчислюватиметься за виразом (19), прогин плунжера, який відповідатиме цьому зазору – за виразом (20), а зусилля, необхідне для прогину плунжера (шарнірно закріпленого) на величину зазора між плунжером та напрямною Z_{gb} – за виразом (21).

$$F_{\theta} = \frac{6EJ_r \theta_{\max}}{L^2(L_1/L - [L_1/L]^3)}; \quad (19)$$

$$\delta_{\theta} = \frac{2\theta_{\max} (L - L_1)^2 L_1^2}{L^3(L_1/L - [L_1/L]^3)}; \quad (20)$$

$$F_z = \frac{Z_{gb}}{\lambda_{r1}}. \quad (21)$$

Співвідношення між зусиллями F_{θ} , F_z та F_l визначає кількість стадій сприйняття навантаження, його можливі варіанти (їх кількість $3! = 6$) наведено далі.

Випадки 1–2. При $F_l < F_{\theta} < F_z$ чи $F_l < F_z < F_{\theta}$ бічного зусилля F_l недостатньо, щоб вибрати кутовий зазор між плунжером та втулкою ($\Delta\theta_A = (\theta_{\max} - \theta_A) \geq 0$) та лінійний зазор між плунжером та напрямною Z_{gb} . Відповідно, все навантаження сприйматиме плунжер, як балка на двох шарнірних опорах. Кількість стадій сприйняття навантаження при цьому становитиме $n = 1$, а розрахункова схема матиме вигляд I за рис. 4. Навантаження і деформації плунжера та напрямної при цьому становитимуть:

$$\begin{aligned} F_r &= F_l; \\ F_{gb} &= 0; \\ \delta_r &= F_l \lambda_{r1}; \\ \delta_{gb} &= 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Випадок 3. При $F_{\theta} < F_l < F_z$ бічного зусилля F_l недостатньо, щоб вибрати лінійний зазор Z_{gb} між плунжером і напрямною балкою, але вистачає, щоб вибрати кутовий зазор між плунжером і втулкою ($\Delta\theta_A < 0$). Відповідно, сприйняття навантаження відбуватиметься за дві стадії ($n = 2$): деформування плунжера відбуватиметься спочатку як балки на обох шарнірних опорах, а потім – з одною защемленою, а другою шарнірною (рис. 5), а напрямна балка не працюватиме. Розрахункова схема матиме вигляд I + II за рис. 4. Навантаження і деформації плунжера та напрямної при цьому становитимуть:

$$\begin{aligned} F_r &= F_l = F_{r1} + F_{r2} = F_{\theta} + F_{r2}; \\ F_{gb} &= 0; \\ \delta_r &= \delta_{\theta} + F_{r2} \lambda_{r2} = \delta_{\theta} + (F_l - F_{\theta}) \lambda_{r2}; \\ \delta_{gb} &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Випадок 4. При $F_z < F_l < F_{\theta}$ бічного зусилля F_l недостатньо, щоб вибрати кутовий зазор між плунжером і втулкою ($\Delta\theta_A \geq 0$), але достатньо, щоб вибрати лінійний зазор Z_{gb} між плунжером і напрямною балкою. Відповідно, сприйняття навантаження відбуватиметься за дві стадії ($n = 2$): спочатку плунжер прогинатиметься на величину Z_{gb} , потім відбувається робота елементарної двобалкової системи описаної вище. Розрахункова схема матиме вигляд I + III за рис. 4. Навантаження і деформації плунжера та напрямної балки при цьому становитимуть:

$$\begin{aligned} F_r &= F_{r1} + F_{r2} = F_z + F_{r2}; \\ F_{r2} &= [F_l - F_z] \frac{\lambda_{r1}}{\lambda_{r1} + \lambda_{gb}}; \\ F_{gb} &= [F_l - F_z] \frac{\lambda_{gb}}{\lambda_{r1} + \lambda_{gb}}; \\ \delta_r &= Z_{gb} + F_{r2} \lambda_{r1}; \\ \delta_{gb} &= F_{gb} \lambda_{gb}. \end{aligned} \quad (24)$$

Випадки 5–6. Варіанти за яких $F_\theta < F_Z < F_l$ чи $F_Z < F_\theta < F_l$ є найскладнішими, вони справедливі для малих зазорів $2Z$ між плунжером і втулкою (рульова машина після ремонту). Вважаємо, що в межах малих зазорів $2Z$ між плунжером та втулкою одразу вибирається кутовий зазор між плунжером і втулкою ($\Delta\theta_A < 0$), і опора A плунжера стає защемленою (рис. 5), а лінійний зазор Z_{gb} ще залишається не вибраним ($\delta_\theta < Z_{gb}$). При цьому залишкове бічне зусилля та прогин плунжера як защемленої балки становитимуть:

$$\begin{aligned}\Delta F &= F_l - F_\theta; \\ \Delta\delta &= (F_l - F_\theta)\lambda_{r2}.\end{aligned}\quad (25)$$

Якщо $\Delta\delta > (Z_{gb} - \delta_\theta)$ тоді навантаження передаватиметься на напрямну, а зусилля, яке здатний додатково сприйняти плунжер при вибранні зазора Z_{gb} становитиме:

$$F_{r2} = \frac{Z_{gb} - \delta_\theta}{\lambda_{r2}}.\quad (26)$$

Після вибрання зазора Z_{gb} між плунжером і напрямною балкою, вони працюватимуть як елементарна двобалкова система (рис. 2). Таким чином, передавання навантаження відбуватиметься в три стадії ($n = 3$), розрахункова схема матиме вигляд I + II + III за рис. 4, а навантаження і деформації плунжера та напрямної при цьому становитимуть:

$$\begin{aligned}F_r &= F_{r1} + F_{r2} + F_{r3} = F_\theta + F_{r2} + F_{r3}; \\ F_{r3} &= [F_l - F_\theta - F_{r2}] \frac{\lambda_{r2}}{\lambda_{r2} + \lambda_{gb}}; \\ F_{gb} &= [F_l - F_\theta - F_{r2}] \frac{\lambda_{gb}}{\lambda_{r2} + \lambda_{gb}}; \\ \delta_r &= \delta_\theta + Z_{gb} + F_{r3}\lambda_{r2}; \\ \delta_{gb} &= F_{gb}\lambda_{gb}.\end{aligned}\quad (27)$$

Інакше, якщо $\Delta\delta < (Z_{gb} - \delta_\theta)$, то напрямна не вступатиме в роботу, а плунжер деформується в дві стадії ($n = 2$), відповідно до випадків I + II за рис. 4, а навантаження і деформації плунжера та напрямної при цьому обчислюватимуться згідно (22).

Для всіх випадків ефективність роботи напрямної балки оцінюватимемо коефіцієнтом її навантаження:

$$K_{gl} = \frac{F_{gb}}{F_l}.\quad (21)$$

Результати деяких розрахунків із використанням отриманих теоретичних результатів представлено далі у вигляді графіків. При виконанні обчислень виходили з того, що плунжер у втулці встановлюється із зазором. Застосована тут посадка $H9/f9$ [15] забезпечує мінімальний вірогідний зазор $2Z_{\min} = 0,084$ мм, максимальний вірогідний зазор $2Z_{\max} = 0,246$ мм. Допустимий в експлуатації (граничний знос) регламентується величиною $[2Z] = 0,600$ мм, а допустимий зазор між напрямною балкою та повзуном плунжера – величиною $[Z_{gb}] = 0,250$ мм. Для випадку наявності граничних зазорів далі виконувались розрахунки.

Результати та їх обговорення. Графіки зміни поперечних жорсткостей ($C = \lambda^{-1}$) плунжера – C_{r1} у випадку відсутності та C_{r2} за наявності защемлення одного з його кінців, а також C_{gb} напрямної балки, залежно від кута повороту румпеля, показано на рис. 6, а. Графік демонструє, що жорсткість напрямної балки в усьому діапазоні кутів повороту румпеля переважає жорсткість плунжера у 7...15 разів, що за цілком раціональним задумом конструкторів, в ідеалі має забезпечувати сприйняття напрямною балкою більшої частини бічного навантаження F_l (жорсткіші деталі несуть більше навантаження). На практиці цей

задум порушується наявністю зазора Z_{gb} між повзуном плунжера та напрямною балкою. Така система навантажується моментом на румпелі, графік зміни якого показано на рис. 6, б.

На рис. 7, а показано графіки зміни поперечного навантаження плунжера та напрямної балки за наявності зазорів $2Z = 0,600$ мм (що забезпечує роботу плунжера, як балки на двох шарнірних опорах) та $Z_{gb} = 0,250$ мм, що відповідає випадку 4 з описаних можливостей сприйняття навантаження деталями рульової машини. З цього графіку можемо бачити, що внаслідок наявності зазора Z_{gb} у діапазоні кутів повороту румпеля $\alpha = 0 \dots 10^\circ$, плунжер повністю сприймає бічне навантаження $F_l = F_{r1}$ без участі напрямної балки. Балка вступає в роботу починаючи з кутового положення румпеля $\alpha = 10^\circ$, де працює в парі з плунжером, утворюючи ЕДБС (рис. 4, I + III), сумарне поперечне навантаження плунжера починаючи з цього моменту становитиме $F_r = F_{r1} + F_{r2}$. До кута повороту румпеля $\alpha \approx 21^\circ$ (перетин ліній F_r та F_{gb} позначено точкою), плунжер несе поперечне навантаження більше ніж напрямна балка ($F_r > F_{gb}$). У діапазоні кутів повороту румпеля $\alpha = 21 \dots 35^\circ$ напрямна балка сприймає більшу частину бічного навантаження F_l .

Відповідним чином описані процеси впливають на коефіцієнт навантаження напрямної балки K_{gl} (рис. 7, б), який починає перевищувати нульове значення починаючи з $\alpha = 10^\circ$, і досягає свого максимуму $K_{gl} = 0,59$ при $\alpha \approx 27,5^\circ$. Подальші розрахунки демонструють, що більші значення K_{gl} досяжні лише при менших зазорах між плунжером та втулкою $2Z = 0,200 \dots 0,300$ мм, що підтримувати достатньо складно. Отже, про ефективну роботу напрямної балки у всьому діапазоні кутів α не йдеться. Відповідно, у діапазоні кутів повороту румпеля $\alpha = 0 \dots 15^\circ$, який є найбільшим за тривалістю при роботі рулевих машин магістральних суден, напрямна балка практично не працює, що збільшує інтенсивність зношування плунжерів, їхніх втулок, ущільнень, та витоки мастила [15]. Це обумовлює необхідність постійного контролю та регулювання зазорів між деталями машини, що ускладнює експлуатацію.

Виконані розрахунки підтверджують, що ефективність в експлуатації роботи напрямної з розвантаження плунжера від поперечного зусилля залежить від стану елементів кінематичних пар її механізму, зокрема величини зазорів $2Z$ та Z_{gb} , що підтверджує структурну недосконалість механізму ГРМ Р-18 через наявність надлишкових зв'язків. Підвищення технічного рівня рулевих машин плунжерного типу можливе внаслідок застосування нових типів механізмів для передачі навантаження від плунжерів на румпель з метою зниження поперечного навантаження плунжерів та зменшення кількості надлишкових зв'язків.

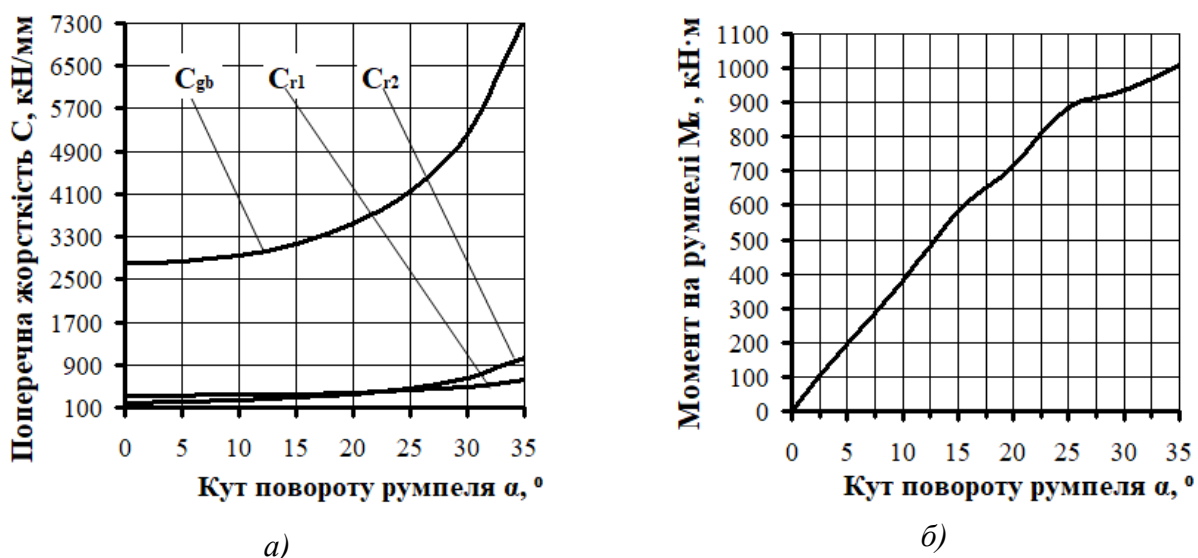


Рисунок 6 – Графік зміни поперечної жорсткості плунжера та напрямної балки (а), а також моменту на румпелі (б) від кута його повороту

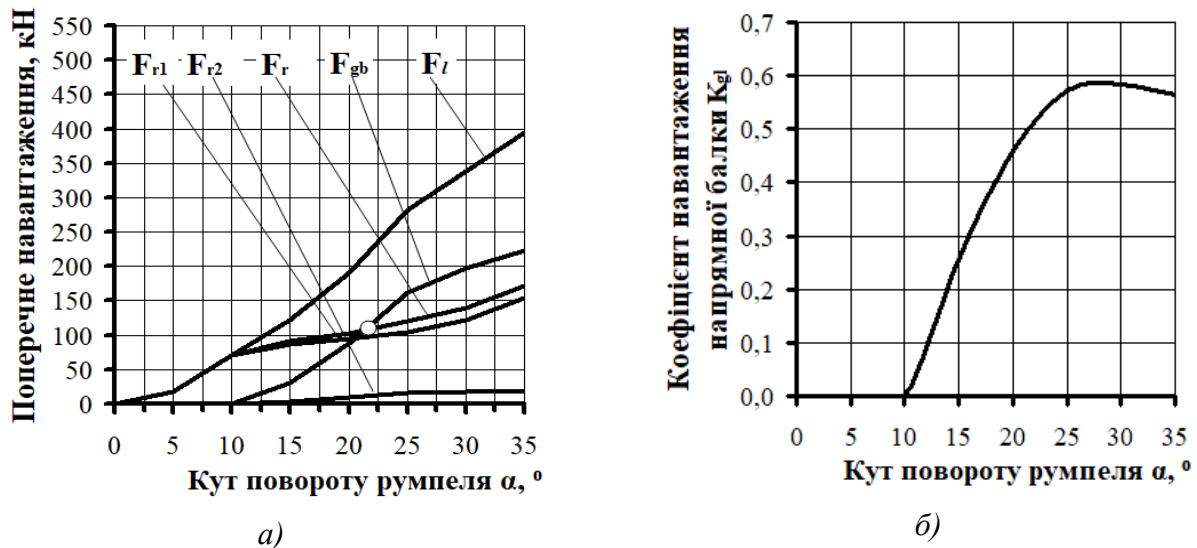


Рисунок 7 – Графік зміни поперечного навантаження плунжера та напрямної балки (а), а також коефіцієнту навантаження напрямної балки (б) від кута його повороту

Висновки.

1. Розкрито механізм сприйняття та передавання бічного навантаження деталями рульової машини плунжерного типу. Представлена математична модель враховує величину та співвідношення зазорів між плунжером та втулкою, а також плунжером і напрямною балкою. Показано, що залежно від співвідношення зусиль: бічного, достатнього для вибирання кутового зазора між плунжером та втулкою, та достатнього для вибирання лінійного зазора між повзуном плунжера та напрямною балкою, можливо шість варіантів сприйняття бічного навантаження плунжером та напрямною балкою, відтак відрізняється ефективність роботи останньої.

2. Результати розрахунків із використанням розробленої моделі на прикладі рульової машини Р-18 демонструють, що її напрямна балка працює неефективно. Показано, що за наявності найбільших гранично допустимих правилами експлуатації зазорів, у діапазоні найбільш поширених при роботі магістральних суден кутів повороту румпеля $\alpha = 0 \dots 10^\circ$, плунжер повністю сприймає бічне навантаження без участі напрямної балки, відповідно остання свою функцію не виконує. У діапазоні кутів повороту румпеля $\alpha = 10 \dots 21^\circ$, плунжер несе поперечне навантаження більше ніж напрямна балка, тобто остання свою функцію виконує недостатньо ефективно. Лише при кутах $\alpha = 21 \dots 35^\circ$ напрямна балка сприймає 50...59% бічного навантаження. Таким чином, про значне розвантаження плунжера внаслідок напрямної балки не йдеться за будь-яких кутів повороту румпеля.

3. Отримані результати демонструють, що наявність напрямної балки в дослідженій конструкції рульової машини збільшує кількість надлишкових зв'язків у її механізмі, збільшує трудомісткість обслуговування та ремонту. З огляду на низьку ефективність роботи та суттєве ускладнення конструкції машини напрямною балкою, а також високу навантаженість плунжерів поперечною силою, можна стверджувати, що резерв для підвищення технічного рівня рульових машин плунжерного типу лежить, зокрема, у площині застосування нових типів механізмів для передачі навантаження від плунжерів на румпель.

Напрямки подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати для використання розробленої моделі для вивчення впливу зазорів на ефективність роботи напрямної балки, розроблення експлуатаційних заходів щодо автоматизованого визначення величини зазорів, а також розроблення раціональних з погляду передавання та розподілу навантаження між елементами конструкцій рульових машин, що мають високу енергетичну ефективність.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Харін В. М. Суднові гідравлічні кермові машини / В. М. Харін. О.: Фенікс, 2005. 280 с.
2. Protsenko V., Malashchenko V., Nastasenko V., Babiy M., Voitovych O. Elevator drum-pad brake mechanisms: redundant constraints and reliability rise opportunity. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 2024, 125, 229–242. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.125.15>.
3. Погребняк Р. П. Пошук й усунення повторюваних зв'язків у схемі напрямного кривошипно-повзункового механізму захоплювального пристрою. *Наука та прогрес транспорту* / Р. П. Погребняк, М. Р. Погребняк // Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту. 2020. № 3 (87). С. 129–137. <https://doi.org/10.15802/stp2020/208233>.
4. Paul A. Analysis and implementation of redundant constraints in multibody systems. *Ecole polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain*, 2020. Prom.: Fiset, Paul. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:25383>.
5. Zalyubovskii M. G., Panasyuk I. V. On the Study of the Basic Design Parameters of a Seven-Link Spatial Mechanism of a Part Processing Machine. *Int. Appl. Mech.* 56: 2020. 54–64. <https://doi.org/10.1007/s10778-020-00996-x>.
6. Lu P. Study on Redundant Constraint in Mechanism Design. *Advanced Materials Research*, vol. 734–737, Trans Tech Publications, Ltd., 16 Aug. 2013, pp. 2788–2791. Crossref, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.734-737.2788>.
7. Гончаренко А. В. Експлуатація активних транспортних систем в умовах багатоальтернативності та невизначеності: дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. К.: Національний авіаційний університет, 2016. 328 с.
8. Protsenko V., Nastasenko V., Babiy M., Protasov R. Marine ram-type steering gears maintainability increasing. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnícky časopis*. 2022; Vol. 72, №2: 149–160. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0025>.
9. Проценко В. О. Підвищення структурної досконалості тангенсного механізму суднових рульових машин плунжерного типу / В. О. Проценко, Д. О. Маринченко // Підйомно-транспортна техніка. Науково-технічний та виробничий журнал. Одеса: ІНТЕРПРИНТ. 2022. №1. С. 88–96. <https://doi.org/10.15276/pidtt.1.67.2022.08>.
10. Проценко В. О. Особливості передавання навантаження деталями суднової рульової машини плунжерного типу / В. О. Проценко, В. О. Настасенко, М. В. Бабій, А. О. Білоконь // Судноводіння. Науково-технічний збірник. Одеса: НУ «ОМА». 2020. Вип. 30. С. 107–116. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.107-116>.
11. Проценко В. О. Перспективи вдосконалення важільного механізму рульових машин плунжерного типу / В. О. Проценко, В. О. Настасенко, М. В. Бабій, А. О. Білоконь // Розвиток транспорту. Одеса: Видавничий дім "Гельветіка", 2021. № 1(8). С. 78–90. <https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.08>.
12. Посацький С. Л. Опір матеріалів / С. Л. Посацький. Львів: Видавництво Львівського університету, 1963. 360 с.
13. Фесик С. П. Справочник по сопроотивленію материалов / С. П. Фесик. К.: Будівельник, 1982. 280 с.
14. Харін В. М. та ін. Суднові машини, установки, пристрої та системи. Одеса: Трансліт, 2010. 646 с.
15. Малащенко В. О. Торцеві ущільнення підвищеної герметичності : монографія / В. О. Малащенко, І. О. Похильчук, В. М. Стрілець. Рівне : НУВГП, 2014. 128 с.

REFERENCES

1. Kharin V. M. (2005). *Sudnovi hidravlichni kermovi mashyny*. Feniks, 280 s.
2. Protsenko, V., Malashchenko, V., Nastasenko, V., Babiy, M., Voitovych, O. (2024). Elevator drum-pad brake mechanisms: redundant constraints and reliability rise opportunity. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*. 125, 229–242. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.125.15>.
3. Pogrebnyak, R. P., & Pohrebniak, M. R. (2020). Search and elimination of repeated connections in the scheme of guiding slide-crank mechanism of the gripping device. *Science and Transport Progress*, (3(87)), 129–137. <https://doi.org/10.15802/stp2020/208261>.
4. Paul, A. (2020). Analysis and implementation of redundant constraints in multibody systems. Ecole polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain, 2020. Prom. : Fiset, Paul. <http://hdl.handle.net/2078.1/thesis:25383>.
5. Zalyubovskii, M. G., Panasyuk, I. V. (2020). On the Study of the Basic Design Parameters of a Seven-Link Spatial Mechanism of a Part Processing Machine. *Int. Appl. Mech.* 56: 54–64. <https://doi.org/10.1007/s10778-020-00996-x>.
6. Lu, P. (2013). Study on Redundant Constraint in Mechanism Design. In *Advanced Materials Research (Vols. 734–737, pp. 2788–2791)*. Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.734-737.2788>.
7. Honcharenko, A. V. (2016). *Ekspluatatsiia aktyvnykh transportnykh system v umovakh bahatoalternatyvnosti ta nevyznachenosti: dys. ... d-ra tekhn. nauk: spets. 05.22.20 – ekspluatatsiia ta remont zasobiv transportu*. – K.: Natsionalnyi aviatsiynyi universytet.
8. Protsenko, V., Nastasenko, V., Babiy, M., Protasov, R. (2022). Marine ram-type steering gears maintainability increasing. *Journal of Mechanical Engineering – Strojnický časopis.*; Vol. 72, №2: 149–160. <https://doi.org/10.2478/scjme-2022-0025>.
9. Protsenko, V. O. Pidvyshchennia strukturnoi doskonalosti tanhensnogo mekhanizmu sudnovykh rulovykh mashyn plunzhernoho typu / V. O. Protsenko, D. O. Marynchenko // *Pidiomno-transportna tekhnika. Naukovo-tekhnichnyi ta vyrobnychi zhurnal*. – Odesa: INTERPRINT. – 2022. – №1 – S. 88–96. <https://doi.org/10.15276/pidtt.1.67.2022.08>.
10. Protsenko, V. O., Nastasenko, V. O., Babiy, M. V., & Bilokon, A. O. (2020). Marine ram-type steering gear details load transfer features. *Shipping & Navigation*, 30(1), 107–116. <https://doi.org/10.31653/2306-5761.30.2020.107-116>.
11. Protsenko, V. O., Nastasenko, V. O., Babii, M. V., & Bilokon, A. O. (2021). Perspektyvy vdoskonalennia vazhilnogo mekhanizmu rulovykh mashyn plunzhernoho typu. *Transport development*, (1(8)), 78–90. <https://doi.org/10.33082/td.2021.1-8.08>.
12. Posatskyi, S. L. (1963). *Opir materialiv*. Vydavnytstvo Lvivskoho universytetu.
13. Fesyk, S. P. (1982). *Spravochnyk po soprotivleniyu materyalov*. Budivelnyk.
14. Kharin V. M. ta in. (2010). *Sudnovi mashyny, ustanovky, prystroi ta systemy*. Translit, 646 s.
15. Malashchenko, V. O. (2014). *Torcevi ushchilnennya pidvishchenoi hermetychnosti*. NUVGP.

Protsenko V. O., Nastasenko V. O., Babii M. V. DEVELOPMENT OF LOAD TRANSFER BY THE PARTS OF A RAM-TYPE STEERING GEAR MODEL

The article deals with the load capacity of ram-type steering machines. A new mathematical model of load between gear parts is developed. The presented discrete mathematical model takes into account the size and the ratio of the gaps ZZ between the ram and the sleeve, as well as the gap Z_{rb} between the ram and the guide beam slipper. Depending on the ratio of forces: lateral, sufficient to select the angular gap between the ram and the sleeve, and sufficient to select the linear gap between the ram slider and the guide beam, the perception of the lateral load by the ram and the guide beam can occur in six possible variants. The ratios between the mentioned forces are recorded, determining the number and boundaries of lateral load transitions between the described variants of load perception. The calculations were performed using the developed mathematical model on the example of the R-18 steering gear. It is shown that in the presence of the largest

maximum permissible by the operating rules gaps between the ram and the sleeve, ram and the guide beam slipper, the guide beam can perceive 50...59% of the lateral load only at the rudder angle spectrum $\alpha = 21...35^\circ$, and in the range of the most common in operation rudder angle amplitude $\alpha = 0...10^\circ$ in the operation of main vessels, the guide beam does not perform its function at all, overloading the rams, bushings and seals. Performed in the article calculations confirm that the efficiency of the operation of the guide for unloading the ram from the transverse force depends on the state of the elements of the kinematic pairs of its mechanism, particularly the values of the gaps, which confirms the structural imperfection of the R-18 timing mechanism due to the presence of redundant constraints. It is shown that the reserve for increasing the technical level of ram-type steering machines lies in the application of new types of mechanisms for transferring the load from the rams to the tiller.

Key words: steering gear; ram; torque; load; deflection.

© Проценко В. О., Настасенко В. О., Бабій М. В.

Статтю прийнято до редакції 03.12.2024

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ
TRANSPORT TECHNOLOGIES

SUBSTANTIVE MODEL OF SHIP TURN WITH ACCOUNT OF THE LATEST ACHIEVEMENTS IN THEORY AND PRACTICE

Tovstokory O. M., Ph.D., Deep Sea Captain, Head of the Department of Ship Handling, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028.

Today, in the scientific and technical literature on the pivot point, the 2-point scheme of ship turn "Center of Gravity – Pivot Point" is used. According to this scheme, the position of the Pivot Point is calculated from the Center of Gravity, which is not entirely correct, since in fact the ship rotates not around the Center of Gravity, but around the Center of Rotation. The Center of Rotation, in turn, can shift relative to the Center of Gravity, in the presence of longitudinal motion. Failure to take these things into account leads to errors in calculating the position of the Pivot Point and the trajectory of the ship's movement around the Pivot Point. For a long time, the concepts of the Center of Rotation and the Pivot Point were confused. Some researchers believed that the Pivot Point shifts in the direction of the ship's movement, others believed that the Pivot Point is located on the opposite side of the midship, relative to the point of application of the lateral force. The 2-point rotation scheme could not combine these two views. In previous works, the authors of this article proposed to use a 3-point rotation scheme, where the third point is the Center of Rotation. The use of a 3-point turn scheme made it possible to explain the dependence of the position of the Pivot Point on both the longitudinal speed and the point of application of the lateral force. The article develops a new substantive model of the ship's turn and a "Memo for the Ship Handlers". The new substantive model and "Memo..." will reduce control errors and increase maneuvering safety, which is especially important in compressed waters. The results obtained are explained by the fact that, unlike known approaches: the new substantive model is built on the basis of a 3-point turn scheme, which takes into account an additional point - the Center of Rotation; the position of Pivot Point is determined relative to the Center of Rotation, and not relative to the Center of Gravity; the position of the Pivot Point is determined on the plane, through the abscissa and ordinate of the Pivot Point.

Key words: navigation safety; 3-point ship's turn scheme; Pivot Point; Center of Rotation; maneuvering in restricted waters.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163

Introduction. If an observer is on board a vessel that is making a turn, it seems to him that the vessel is rotating around some point, which is called the pole of rotation (PP). In fact, the vessel is currently making two movements: lateral and rotational around the center of rotation (CO). It is the sum of these two real movements that gives the false impression of rotation around another point – the Pivot Point. At the same time, an alternative vision of the rotation process has led to the emergence and development of the concept of the Pivot Point, which makes it possible to optimize the processes of vessel rotation, which is especially important in compressed waters. Where is the Pivot Point, what does its position depend on, how to change it are very important questions for the ship handler?

Today, in the scientific and technical literature on the Pivot Point, a 2-point scheme of vessel rotation "Center of Gravity – Pivot Point" is used. According to this scheme, the position of the Pivot Point is calculated from the Center of Gravity (CG), which is not entirely correct, since in fact the vessel rotates not around the Center of Gravity, but around the Center of Rotation. The Center of Rotation, in turn, can shift relative to the Center of Gravity, in the presence of longitudinal motion. Failure to take these things into account leads to errors in calculating the position of the PP and the trajectory of the vessel's movement around the PP. For a long time, the concepts of the Center of Rotation and the Pivot Point were confused. Some researchers believed that the Pivot Point shifts in the direction of the vessel's movement, others believed that the Pivot Point is located on the opposite side of the middle, relative to the point of application of the lateral force. The 2-point rotation scheme could not combine these two views. In work [1], the authors of the article proposed to use a 3-point rotation scheme, where the third point is the Center of Rotation. The use of a 3-point rotation scheme made it possible to explain the dependence of the PP position on both the longitudinal speed and the point of application of the lateral force. In the general case, in the presence of longitudinal speed and applied lateral force, the Pivot Point is located in the plane of the

vessel's movement and is determined in the vessel-related coordinate system by the abscissa and ordinate of the pole of rotation [7] and coincides with the Center of Turning Circle (CTC). In this work, based on the 3-point scheme of rotation, taking into account the expanded idea of the position of the PP in the plane of the vessel's movement, the main variants of the vessel's movement speeds and applied controls are considered, the corresponding positions of the Center of Rotation, abscissas and ordinates of the PP are determined. This information is necessary for ship handlers to make correct management decisions.

Problem statement. To develop a meaningful model of ship's rotation and «Memo for the Ship Handlers» based on the 3-point scheme of ship's rotation.

Analysis of recent research and publications. The study of the behavior of the Center of Rotation and the Pivot Point has previously been considered by many authors.

Thus, in work [2] the author studies the behavior of the Center of Rotation of a vessel (the author calls it the Pivot Point) using the example of two tugboats that push the vessel sideward. When longitudinal speed appears, the vessel begins to rotate. The author explains this effect by changing the force arms of the tugboats due to the displacement of the Center of Rotation in the direction of the vessel's movement. Also?

In the book [3], for a simplified vessel model, the authors obtained analytical dependences of the position of the Pivot Point, as an apparent point of rotation of the vessel, on the shoulder of application of the lateral force and constructed graphs. In the obtained results, the shoulder of application of the lateral force and the corresponding position of the Pivot Point were counted from the midship of the frame, and not from the Center of Rotation

Experiments with the Center of Rotation (the author also calls it the pole of rotation) were also carried out in the port of Revel [4]. According to the authors of the Porto-Revel Shiphandling Course manual – when the ship is stopped in the water, PP coincides with the Centre of Gravity of the ship, – when the ship is gaining speed, PP moves along ships in the same direction as the movement.

In [5], the author showed how the movement of the Pivot Point can be used to improve the maneuverability of a large sailing vessel.

The properties of the Pivot Point, as apparent point, were considered in work [6]. The author proposed a formula for determining the position of the Pivot Point through the lateral velocity of the Center of Gravity and the angular velocity of rotation of the vessel around the Center of Gravity. The author also linearized the mathematical model of the channels of lateral and angular motions and obtained the values of lateral and angular velocity for the steady motion of the vessel.

In work [7], using the example of a vessel departing from the berth on sternway, the author showed that the use of existing recommendations for vessel control at that time leads to the vessel hitting the berth. It was believed that the vessel rotates around the Center of Rotation, which when moving in reverse is shifted back. In fact, the vessel rotated around the Pivot Point, which, on the contrary, was shifted forward, which led to the vessel hitting the berth. The author also gave considerations regarding the Center of Rotation, which should be located between the Center of Gravity and the Center of lateral hydrodynamic resistance (COLR), which is shifted in the direction of vessel movement. The maximum COLR displacement, according to the author, is up to 10% of the ship's length. The author also emphasized that the Center of Rotation and the Pivot Point are two different centers.

In work [8], for the first time, the condition for determining the position of the pole of rotation is written not in the scalar form $V_y + \omega_z R = 0$, which was used by predecessors, but in the vector form $\mathbf{V} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R} = \mathbf{0}$. The use of the vector equation showed that the scalar form is a special case of the vector form, which determines only one of the three components of the vector \mathbf{R} – the abscissa of the Pivot Point R_x . The use of the vector form also allows us to determine the ordinate R_y and applicate R_z of the Pivot Point, that is, in the general case, the Pivot Point is located in the three-dimensional space of the coupled coordinate system (CCS), and not only on its longitudinal

axis OX_1 . For practical maneuvering, only the abscissa and ordinate of the Pivot Point are used, which together determine the position of the center of circulation.

Capt. P. Butusina in his work [9] considered the process of turning the vessel and its interaction with the hydrodynamic forces that arise during this process.

In his works [10], [11], [12], the author identifies three special centers of rotation: the Center of Turning Circle (the center of planetary rotation E fixed on the Earth's surface), the Center of Rotation of the vessel S and the Pivot Point (the apparent center of rotation P). The author also draws attention to the new view of the Pivot Point (in the author's words, the new concept of the Pivot Point), which differs from the traditional one in that the Pivot Point is a apparent center of rotation, its position does not depend on the longitudinal speed of the vessel and it is not the Center of Rotation of the vessel. The work also provides examples of using the new concept of the Pivot Point for practical maneuvering. In addition, in article [10] the author calls for teaching future shiphandlers and retraining all working shiphandlers in the correct methods of ship control according to the concept of the Pivot Point.

In paper [13], the author reflects on the process of ship turning and generally supports the provisions proposed by Dr. Seong-Gi Seo in his works. In paper [14], he summarizes the views of authors who study ship turning problems and comes to the conclusion that shiphandlers' training should be carried out based on the new theory.

Fundamental research on ship control is given in the book [15], in particular, in section 7.2.4. Pivot Point shows the current state of ideas about the pivot point and its use for ship control.

In the article [16], a refined scheme for calculating the position of the Center of Rotation and the Pivot Point was developed, a control scheme with a bow and stern thruster was investigated, control lines were found on which the specified ship movement is implemented (around the Pivot Point, without lateral speed, without angular speed), and the steering distribution coefficient was investigated.

In study [17], a refined method is presented for a single-screw vessel, providing formulas and graphs to locate the pivot point relative to a fixed reference point (center of gravity or middle frame) based on the enhanced scheme. These results enable practical application for both automated and manual vessel control systems.

The study [18] focuses on processes for automatically controlling vessel rotation around the pivot point with zero drift. Two linearized control models are examined: one for a single-screw conventional vessel without a bow thruster, and another for the same vessel equipped with a bow thruster. For each control scheme under steady-state conditions, control strategies were derived to enable circulation around the pivot point without a drift angle. These strategies enhance safety and efficiency by narrowing traffic lanes, reducing hydrodynamic resistance and fuel consumption, and facilitating technological operations like mooring. The effectiveness of these methods was validated through mathematical modeling of the automatic mooring process of the MSC Container Ship without drift angle. This simulation was conducted on a custom-developed imitation modeling stand based on the Navi Trainer 5000 navigation simulator.

In [19], the behavior of the rotation center and the Pivot Point was investigated, and the following results were obtained: it has been demonstrated that the vessel's rotation center, pivot point, and gravity center are distinct points that generally do not coincide; the rotation center represents the point around which the vessel experiences the greatest angular acceleration from an applied torque. This point shifts gradually along a hyperbolic trajectory relative to the gravity center, depending on the vessel's speed; the existence of a pivot point is both necessary and sufficient when the linear lateral velocity and angular velocity relative to the rotation center are present; the Pivot Point is highly dynamic and can shift rapidly when the angular velocity fluctuates near zero; control lines are defined that provide straight-line motion, drift-free motion, and motion around the Pivot Point; optimal control strategies for vessel motion around the pivot point were developed; the accuracy of the proposed methods and algorithms was validated through mathematical modeling using the Navi Trainer 5000 navigation simulator.

In the videos [20–23], the author Dr. Knud Benedikt shows and explains his version of the Pivot Point. He shows how the use of various sources of lateral forces (rudder blade, stern and bow thrusters, wind) affects the position of the Pivot Point and concludes that the position of the Pivot Point depends on the ratio of angular and lateral velocities. He also shows that the position of the Pivot Point can be determined from the tangential velocities of the bow and stern. In addition, he shows how the position of the Pivot Point changes when performing a Turning Circle, in shallow water and how the position of the Pivot Point changes relative through the water and relative to the ground during maneuvering.

In the article [24], it is shown how to use the position of the Pivot Point when mooring with two tugs.

The video [25] shows a complex approach of a vessel and mooring in a narrow place using knowledge of the vessel's Pivot Point, the action of rudder forces, and other lateral forces.

The author of the article [26] believes that the closer the Pivot Point is to the middle, the greater the turning radius of the vessel. In terms of hull shape, a fuller-shaped vessel, such as a bulk carrier or tanker, has a Pivot Point closer to the bow than vessels with cruising contours.

Purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to reduce ship control errors in compressed waters and increase the safety of navigation in general.

The goal is achieved by using a new meaningful model and “Sailor’s Notes”, developed on the basis of a 3-point turn scheme, taking into account the latest views on the theory of ship turning.

The objectives of the study are to develop a new, meaningful model of ship turning and «Memo for the Ship Handlers».

The main part. To consider the issue of turning a ship, we will first take a single-screw conventional ship without additional devices. That is, the ship has an engine connected to a propeller shaft that passes through the deadwood and ends with a propeller. Behind the propeller is a rudder. This is the basic model from which we will begin to consider the issue of turning a ship.

As noted above in the introduction, the existing 2-point ship turning scheme cannot explain the dependence of the position of the Pivot Point on the speed of the ship and simultaneously on the point of application of the steering force. The authors of the article believe that the reason for this contradiction is the absence of an additional point between the Center of Gravity and the Pivot Point. Such a point is the Center of Rotation. The theoretical justification for the need to take into account the Center of Rotation in the ship turning scheme is provided in the article [1]. The Center of Rotation moves in the direction of the vessel's movement, and the Pivot Point is counted from the Center of Rotation, which explains the dependence of the position of the PP on the longitudinal speed of the vessel. At the same time, the position of the PP also depends on the point of application of the lateral force relative to the Center of Rotation. If the lateral force is applied in the stern of the vessel, then the PP will be in the bow and vice versa. The use of a 3-point rotation scheme solves the problem of inconsistency of the 2-point scheme, namely, it allows explaining the dependence of the position of the PP on both the longitudinal speed and the point of application of the lateral force.

Fig. 1 shows a 3-point scheme of the vessel's rotation, which is the basis of the new substantive model. The diagram shows:

– the first base point – Center of Gravity (CoG). The position of the Center of Gravity can always be taken from the current ship load plan at the moment;

– the second base point – Center of Rotation (CoR). The Center of Rotation is located at the point relative to which an arbitrary torque has the greatest efficiency (creates the greatest angular acceleration). It can also be said that the position of the Center of Rotation is determined by a compromise between increasing the moment of inertia of rotation and decreasing the moment of hydrodynamic resistance (the Center of Rotation is located between the Center of Gravity and the Center of Lateral Resistance (CLR). The Center of Rotation can also be called the true center of rotation. In the absence of longitudinal speed, the position of the Center of Rotation coincides with the Center of Gravity. With the appearance of longitudinal speed, the Center of Rotation begins to shift. The displacement of the Center of Rotation relative to the Center of Gravity occurs slowly, within the hull of the vessel, depends on the longitudinal speed of the vessel.

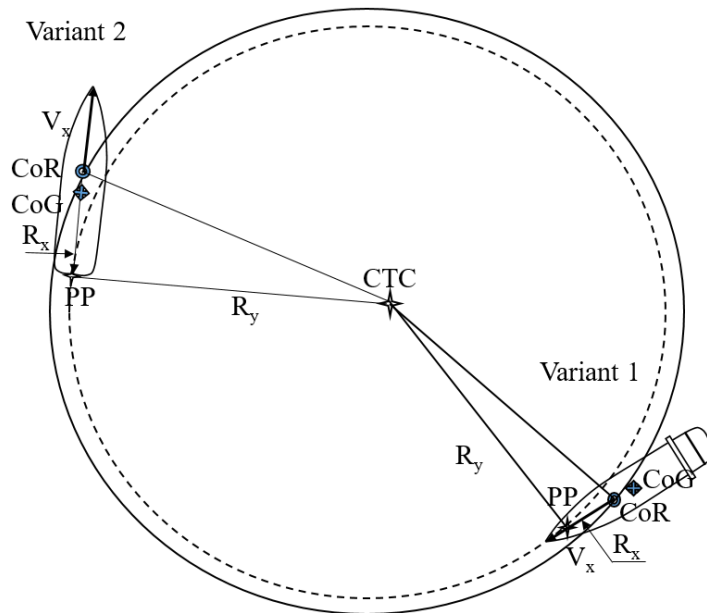


Figure 1 – 3-point ship turning diagram

The Center of Rotation shifts towards the oncoming flow, and is determined by the formula:

$$\Delta x = \frac{L}{2} \left(1 - \frac{V_{\max}}{\eta V_x + V_{\max}} \right), \quad (1)$$

where L is the length of the vessel, V_{\max} is the maximum speed of the vessel, V_x is the longitudinal speed of the vessel, η is the coefficient determined by the maximum displacement of the center of rotation. The estimate of the maximum displacement of the center of rotation (up to 10% of the vessel length) is given in [7]. In the experimental studies of the authors [16], conducted on the Navi Trainer 5000 simulator, it was established that the magnitude of the displacement of the center of rotation lies within (10–20 %) of the vessel length. The shoulders and moments of all lateral forces acting on the vessel are calculated relative to the center of rotation.

– the third base point is the Pivot Point. The PP is the point around which the vessel turns. The position of the Pivot Point relative to the center of rotation is determined by the abscissa R_x and ordinate R_y of the Pivot Point

$$\begin{cases} R_x = -\frac{V_y}{\omega_z} \\ R_y = \frac{V_x}{\omega_z} \end{cases}, \quad (2)$$

where V_y is the lateral velocity of the center of rotation, ω_z is the angular velocity of rotation in the yaw channel, V_x is the longitudinal velocity of the vessel.

From system (2) it is clear that the PP can move very quickly from to, if the angular velocity fluctuates around zero.

$$R_x = -\frac{V_y}{-0} = +\infty, R_x = -\frac{V_y}{+0} = -\infty, R_y = \frac{V_x}{-0} = -\infty, R_y = \frac{V_x}{+0} = +\infty$$

The graph of the dependence of the PP abscissa on the shoulder of application of the lateral force is a hyperbola [2], Fig. 2.

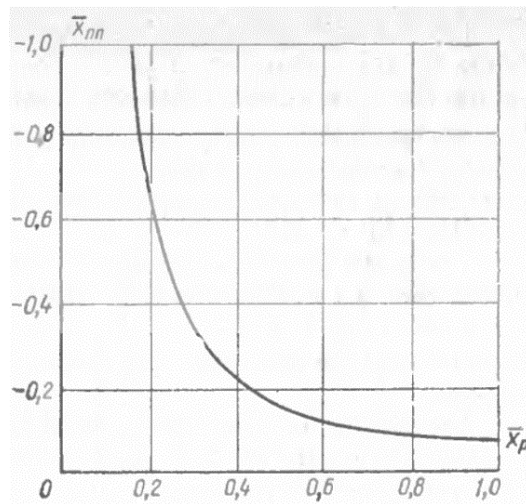


Figure 2 – Graph of the dependence of the abscissa of the PP on the arm of the lateral force x_p

From the above graph it can be seen that when a lateral force (control or external influence) is applied to the vessel, which has a shoulder x_p to the CoR, the PP moves to a point x_{nn} , which is located on the other side of the CoR, as evidenced by the different signs of the shoulders. The further the point of application of the lateral force x_p from the CoR (the greater the shoulder of the lateral force x_p), the closer the PP is to the CoR and vice versa. When the point of application of the lateral force approaches the Center of Rotation (the shoulder decreases), the PP tends to infinity.

From formula (2) the following conclusions follow:

– if $V_y = 0, \omega_z \neq 0, R_x = \frac{0}{\omega_z} = 0$, the vessel circulates without drift of the CoR point, the PP

is in the CoR;

– if $V_y \neq 0, \omega_z \neq 0, R_x = -\frac{V_y}{\omega_z}$, the vessel circulates without drift angle of the CoR point,

the greater the drift angle, the further the PP from the CoR;

– if $V_y \neq 0, \omega_z = 0, R_x = -\frac{V_y}{0} = \pm\infty$, the ship moves in a straight line with the drift angle of

the point CoR, PP is at infinity;

– if $V_y = 0, \omega_z = 0, R_x = -\frac{0}{0}$, the ship moves in a straight line without drift. The formula

shows uncertainty, but it is physically clear that in this case PP must also be at infinity.

PP can also be called the apparent Center of Rotation.

The abscissa and ordinate of the Pivot Point determine the position of the vessel in Turning Circle, Fig. 1. If the abscissa of the PP $R_x > 0$, the position of the vessel in Turning Circle is with the bow inward, option 1. This position is typical for vessels with insufficient control, for which the number of independent controls is less than 3 [1]. Such vessels include conventional single-screw vessels that have two independent controls (telegraph deviation and rudder deviation). If the abscissa of the Pivot Point $R_x < 0$, the position of the vessel in Turning Circle is with the bow outward, option 2. This position can be achieved on vessels with excessive control, for which the number of independent controls is greater than or equal to three. Such vessels include vessels equipped with an additional bow and/or stern thruster, vessels with a dynamic positioning system. If the abscissa of the Pivot Point $R_x = 0$, the diametrical plane of the vessel is tangent to the Turning

Circle and the vessel moves without drift. This position can also be achieved on vessels with redundant controls;

– the fourth base point is the Center of Turning Circle (CTC). CTC is the center of the trajectory along which the vessel moves. The position of the Center of Turning Circle in the coordinate system associated with the vessel is determined by the radius of Turning Circle drawn from the CTC to the CoR of the vessel. The radius of Turning is determined through the abscissa and ordinate of Pivot Point according to the following formula:

$$R_c = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \tag{3}$$

Memo for the Ship Handlers on the position of the Center of Rotation and Pivot Point

Below are 6 basic maneuvering options, for which the position of the Center of Rotation and Pivot Point are determined according to the new meaningful model of turn. For all the options given, the Center of Gravity is assumed to be located amidships (the vessel is on a straight keel, has no trim).

Option 1. The vessel has no longitudinal, lateral and angular velocities. There is also no lateral force, $V_x = 0; V_y = 0; \omega_z = 0; F_y = 0$. In this case, the Center of Rotation is located amidships ($\Delta x = 0$, according to formula (1), the position of the abscissa and ordinate of the

pole of rotation, according to formula (3), is not determined ($R_x = -\frac{0}{0}, R_y = \frac{0}{0}$).

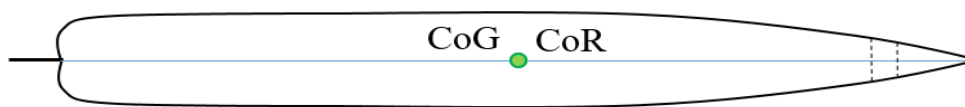


Figure 3 – The ship lies motionless in the drift

Option 2. The ship has no longitudinal motion. The bow thruster (BST) creates a lateral force. 2 motions are formed: rotational around the center of gravity and translational, in the direction of application of the lateral force, $V_x = 0, V_y = 0, \omega_z \neq 0, F_y \neq 0$. Fig. 4 shows the velocity vectors of lateral and rotational motion along the length of the ship, and Fig. 5 shows the vectors of total velocities. In this case, the center of rotation is located at the midship (according to formula (1)

$\Delta x = 0$), and the Pivot Point is behind the midship ($R_x = -\frac{V_y > 0}{\omega_z > 0} < 0, R_y = \frac{V_x = 0}{\omega_z \neq 0} = 0$).

Fig. 4 shows the velocity vectors of lateral and rotational motion along the length of the vessel, the positions of the Center of Gravity and Center of Rotation. Fig. 8 shows the vectors of total velocities, the positions of the Center of Gravity, Center of Rotation, Pivot Point and Center of Turning Circle from the action of the lateral force of the rudder at the bow.

Due to the mismatch between the position of the pole of rotation and the center of gravity, the vessel also receives a slight longitudinal velocity from the action of centrifugal force.

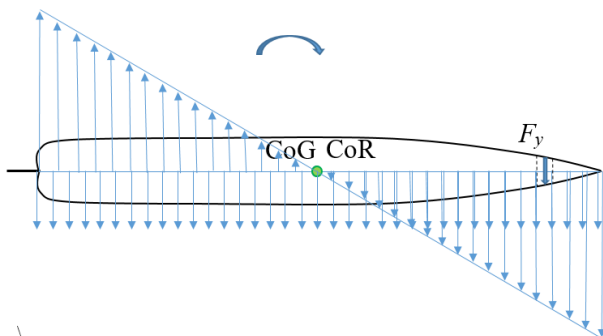


Figure 4 – Velocity vectors of lateral and rotational motion along the length of the vessel

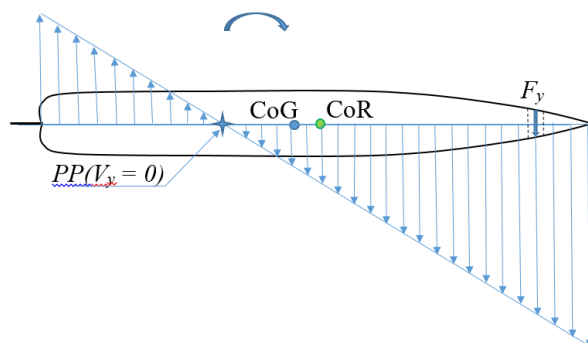


Figure 5 – Vectors of total speeds along the length of the vessel

Option 3. The vessel has a longitudinal velocity, lateral velocity and yaw angular velocity are absent, lateral force is absent, $V_x \neq 0, V_y = 0, \omega_z = 0, F_y = 0$. In this case, the center of rotation of the vessel is shifted forward (according to formula (1) $\Delta x > 0$), and the position of the Pivot Point is not determined (abscissa of the Pivot Point is $R_x = -\frac{V_y = 0}{\omega_z = 0}$, ordinate of the Pivot Point is

$$R_y = \frac{V_x \neq 0}{\omega_z = 0} = \pm\infty).$$

Fig. 6 shows the displacement of the Center of Rotation relative to the Center of Gravity in the direction of vessel movement.

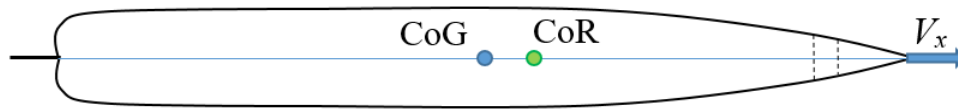


Figure 6 – Displacement of the Center of Rotation relative to the Center of Gravity in the direction of the vessel’s movement

Option 4. The vessel has longitudinal motion, lateral motion and rotational motion due to the shifted rudder, $V_x \neq 0, V_y \neq 0, \omega_z \neq 0, F_y \neq 0$. In this case, the center of rotation of the vessel is shifted forward (according to formula (1) $\Delta x > 0$), and the position of the Pivot Point is in the plane of the vessel’s movement (the Pivot Point is in front of the Center of Rotation, $R_x = -\frac{V_y \neq 0}{\omega_z \neq 0} > 0$, the ordinate of Pivot Point is positive or negative, depending on the sign of ω_z , $R_y = \frac{V_x \neq 0}{\omega_z \neq 0}$). Fig.

7 shows the velocity vectors of lateral and rotational motion along the length of the vessel, the positions of the Center of Gravity and Center of Rotation. Fig. 8 shows the vectors of total velocities, the positions of the Center of Gravity, Center of Rotation, Pivot Point and Center of Turning Circle from the action of the lateral force of the rudder.

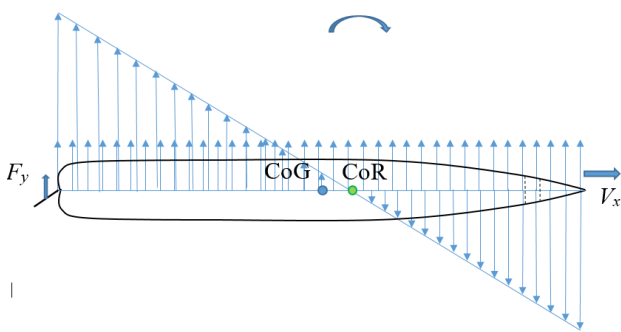


Figure 7 – Velocity vectors of lateral and rotational motion along the length of the vessel from the action of the lateral force of the rudder

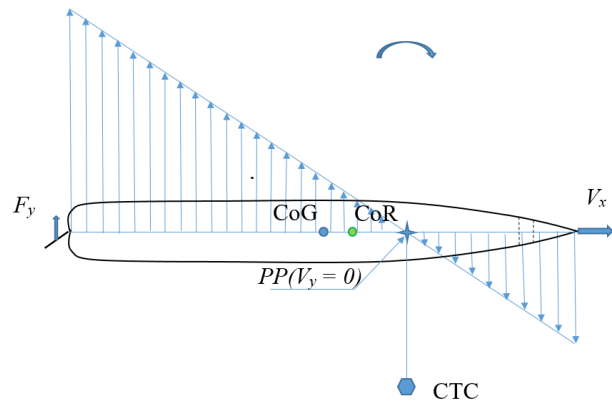


Figure 8 – Vectors of total velocities along the length of the vessel from the action of the lateral force of the rudder

Under the action of the lateral force of the rudder (in the stern), the Pivot Point is formed in the bow and due to this the stern has a much greater displacement to the side than the bow, which must be taken into account when moving along curved sections of the path. Due to the mismatch between the position of the Pivot Point and the Center of Gravity, the vessel gains a small reverse speed from the action of centrifugal force.

Option 5. The vessel has a longitudinal velocity, as well as lateral velocity and angular velocity, created by the lateral force of the tug in the bow of the vessel $V_x \neq 0, V_y \neq 0, \omega_z \neq 0, F_y \neq 0$.

In this case, the Center of Rotation of the vessel is shifted forward (according to formula (1) $\Delta x > 0$), and the position of the Pivot Point is in the plane of movement of the vessel (the abscissa of the

Pivot Point is behind the Center of Rotation, $R_x = -\frac{V_y \neq 0}{\omega_z \neq 0} < 0$, the ordinate of the Pivot Point is

positive or negative, depending on the sign ω_z (determined by the direction of the applied force),

$$R_y = \frac{V_x \neq 0}{\omega_z \neq 0}.$$

Fig. 9 shows the vectors of the lateral and rotational motion speeds along the length of the vessel, the positions of the Center of Gravity and Center of Rotation, and Fig. 10 shows the vectors of total velocities, positions of the Center of Gravity and Center of Rotation, Pivot Point position and Center of Turning Circle from the action of the lateral force of the tug at the bow. Due to the mismatch between the position of the pole of rotation and the center of gravity, the vessel gains a small forward speed from the action of centrifugal force.

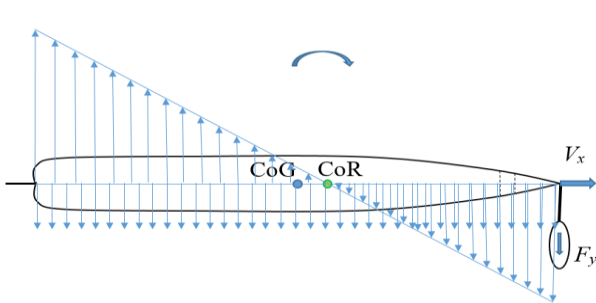


Figure 9 – Velocity vectors of lateral and rotational motion along the length of the vessel due to the action of the lateral force of the tug at the bow

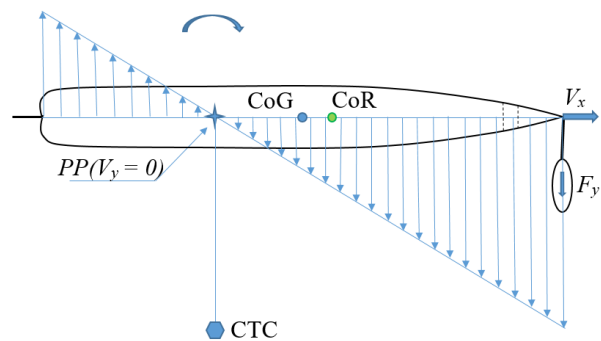


Figure 10 – Vectors of total velocities along the length of the vessel due to the action of the lateral force of the tug at the bow

Option 6. The vessel has a longitudinal velocity, as well as lateral velocity and angular velocity, created by the lateral force of the tug in the stern of the vessel, $V_x \neq 0, V_y \neq 0, \omega_z \neq 0, F_y \neq 0$. In this case, the center of rotation of the vessel is shifted forward (according to formula (1) $\Delta x > 0$), and the position of the Pivot Point is in the plane of the vessel's

movement (the abscissa of the Pivot Point is in front of the Center of Rotation, $R_x = -\frac{V_y \neq 0}{\omega_z \neq 0} > 0$,

the ordinate of the Pivot Point is positive or negative, depending on the sign ω_z (determined by the

direction of the applied force), $R_y = \frac{V_x \neq 0}{\omega_z \neq 0}$). Fig. 11 shows the velocity vectors of lateral and

rotational motion along the length of the vessel, the positions of the Center of Gravity and Center of Rotation. Fig. 12 shows the vectors of total velocities, positions of the Center of Gravity and Center of Rotation, Pivot Point and Center of Turning Circle from the action of the lateral force of the tug at the stern. Due to the mismatch between the position of the Pivot Point and the Center of Gravity, the vessel gains a small reverse speed from the action of centrifugal force.

When the vessel moves backward, the Center of Rotation also shifts backward. The position of the Pivot Point is counted from the Center of Rotation. The abscissa and ordinate of the Pivot Point are determined relative to the Center of Rotation similarly to the options for applying lateral force considered above.

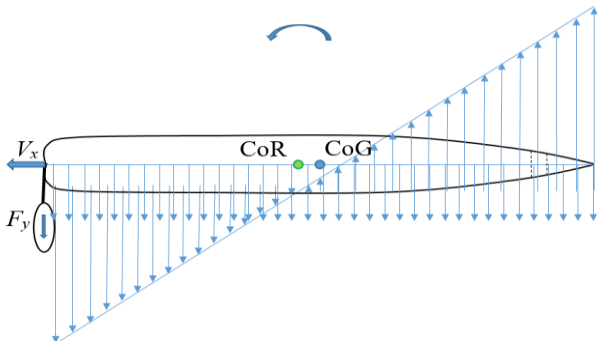


Figure 11 – Velocity vectors of lateral and rotational motion along the length of the vessel due to the action of the lateral force of the tug at the stern

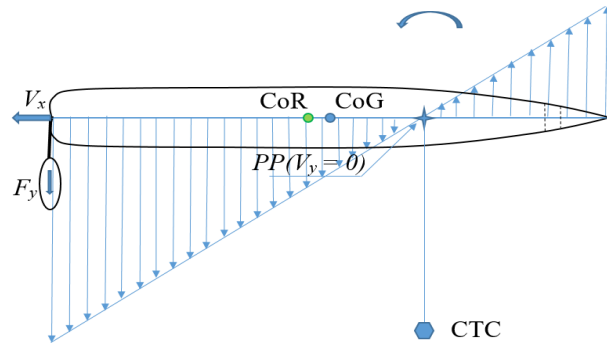


Figure 12 – Vectors of total velocities along the length of the vessel due to the action of the lateral force of the tug at the stern

Discussion. The issues of maneuvering a vessel in compressed waters are considered. A search and analysis of literary sources in which these issues were considered were carried out. A new substantive model of vessel turning has been developed, and a “Memo for the Shiphandlers” has been formulated. The use of the new substantive model and “Memo...” will allow reducing errors in vessel control, which is especially important in compressed waters. The results obtained are explained by the fact that, unlike known approaches: the new substantive model uses a 3-point turning scheme, which takes into account an additional point - the Center of Rotation; the position of the Pivot Point is determined relative to the Center of Rotation, and not relative to the Center of Gravity; the position of the Pivot Point is determined on the plane, through the abscissa and ordinate of the Pivot Point. The results obtained can be used for manual control of the vessel. Also, the results obtained can and should be included in the process of training shiphandlers in maritime educational institutions, since the use of the old substantive model based on the 2-point turn scheme, due to the inconsistency of ideas and the real behavior of the vessel in compressed waters, can lead to accidents.

Further research may be related to the development of algorithms for the navigator's actions when controlling a vessel in compressed waters, using the theory of fuzzy logic.

Conclusions. A new substantive model of ship turning and a "Memo for the Shiphandlers" have been developed. The new substantive model and "Memo..." will reduce control errors and increase maneuvering safety, especially in compressed waters. The results obtained are explained by the fact that, unlike known approaches: the new substantive model is built on the basis of a 3-point turn scheme, which takes into account an additional point – the Center of Rotation; the position of the Pivot Point is determined relative to the Center of Rotation, and not relative to the Center of Gravity; the position of the Pivot Point is determined on the plane, through the abscissa and ordinate of the Pivot Point.

The theoretical value of the obtained results consists in: developing a meaningful model of the vessel's rotation based on a 3-point scheme, taking into account the displacement of the Center of Rotation relative to the Center of Gravity; determining the position of the Pivot Point relative to the Center of Rotation, and not relative to the Center of Gravity; determining the position of the Pivot Point on the plane, through the abscissa and ordinate of the Pivot Point.

The practical value of the obtained results consists in developing a "Memo for the Shiphandlers" based on a new meaningful model, which will reduce errors in vessel movement control and increase navigation safety in general.

REFERENCES

1. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., Kyrychenko, K. (2022). Pivot point position determination and its use for manoeuvring a vessel, *Ships and offshore structures*, Vol.18, Issue 3, 358-364. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480>.
2. Hooyer, H. H. (1991). *Behavior and Handling of Ships*, Cornell Maritime Press.
3. Domin, S. I. et al. (1991). *Keruvannia sudnom*, M.: Transport, 359 с.
4. Port Revel Shiphandling. Course manual 2006.pdf <https://pdfcoffee.com/qdownload/manual-2006-ship-handling-pdf-free.html>.
5. Chase, G. A. (1999). *Sailing Vessel Handling and Seamanship – The Moving Pivot Point*, *The Northern Mariner/Le Marin Du Nord*, Vol. 9. Issue 3, 53–59. <https://doi.org/10.25071/2561-5467.629>.
6. Tzeng, C. Y. (1998). Analysis of The Pivot Point for a Turning Ship, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 6, Issue 1, 34–44. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2518>.
7. Cauvier, H. (2008), *The Pivot Point, The PILOT*. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association, Vol. 295. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.
8. Artyszuk, J. (2010), *Pivot point in ship manoeuvring*, *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*, Vol. 20, Issue 92, 13–24.
9. Butusina, P. (2011). *The Pivot Point Revisited*, *United Kingdom Maritime Pilots' Association "The Pilot"*, Autumn 2011, № 306. <https://ukmpa.org/wp-content/uploads/2016/06/Pilot-306-web.pdf>.
10. Seo, S. G. (2011). *The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring*, *Proceedings of IMLA*, Vol. 1, Issue 29, 271–280. https://www.academia.edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_Manoeuvring.
11. Seo, S. G., Earl, K. (2015). *A Paradigm Shift in Shiphandling (The Pivot Point)*, *Warsash Maritime Academy*, Southampton Solent University.
12. 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>.
13. 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>.
14. Cummins, T. (2020). *Where is the centre of a ship's rotation?, A review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation*, *Harbour Pilot, Portsmouth International Port*. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
15. Fossen, T. I. (2021). *Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control: second edition*, Norwegian university of science and technology, Wiley.
16. Tovstokoryi, O. M., Zinchenko, S. M., Nahrybelnyi, Ya. A., Tymofeiev, K. V. (2023), *Rozrakhunok velychyny zmishchennia tsentru obertannia sudna*, *Naukovyi visnyk KhSMA*, № 26–27, 44–55. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.044-055>.
17. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi O., Kyrychenko, K., Nosov, P., Popovych, I. (2023). *Control of the Pivot Point Position of a Conventional Single-Screw Vessel*, *CEUR-WS.org*, Vol. 3513, p.130–140, ICST-2023. <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper11.pdf>.
18. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Sapronov, O., Petrovskiy, A., Ivanov, A., Tymofeiev, K. (2022). *Development of automatic control methods of vessel rotation around the pivot point without drift*, *Technology Audit and Production Reserves*, Vol. 6(2(68), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.

19. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O. (2020). What is the Pivot Point and how to use it to control the vessel, Materials of the XII International Scientific and Practical Conference "Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT – 2020), May 27–29, 2020, Kherson.
20. Dr. Knud Benedict. (2020). Pivot Point Demo. Hochschule Wismar, Institute ISSIMS, Department of Marine Studies. <https://www.youtube.com/watch?v=zc9C5EWIFOE>.
21. Dr. Knud Benedict. (2020). Pivot Point Position at Stopped ship: only thusters, no propulsion, Hochschule Wismar, Institute ISSIMS, Department of Marine Studies. <https://www.youtube.com/watch?v=EYTF9INUEt8>.
22. Dr. Knud Benedict. (2020). Pivot Point position for ship moving ahead or astern, Hochschule Wismar, Institute ISSIMS, Department of Marine Studies. <https://www.youtube.com/watch?v=v1I8c6aaFgo&t=16s>.
23. Dr. Knud Benedict. (2020). Pivot Point on specific aspects, Hochschule Wismar, Institute ISSIMS, Department of Marine Studies. https://www.youtube.com/watch?v=Dqf5sr_nNxM&t=9s.
24. Gripoli, M. (2022). Ships & Tugs: Pivot Point. <https://www.standbyengine.it/lessons/ships-tugs-pivot-point>.
25. Brittain, S. (2023). Skillful captain docking a big ship in a narrow place: Pivot point, rudder force, transverse effect. <https://www.youtube.com/watch?v=jP5mdg5pm7s>.
26. 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.

Товстокорій О. М. ЗМІСТОВНА МОДЕЛЬ ПОВОРОТУ СУДНА ІЗ ВРАХУВАННЯМ ОСТАННІХ ДОСЯГНЕНЬ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ

Сьогодні у науково – технічній літературі по полюсу повороту використовується 2-х точкова схема повороту судна «Центр ваги – Полюс повороту». Згідно з цією схемою, положення полюса повороту відраховується від центру ваги, що не зовсім вірно, оскільки фактично судно обертається не навколо центру ваги, а навколо центру обертання. Центр обертання, у свою чергу, може зміщуватися відносно центру ваги, за наявності поздовжнього руху. Не врахування цих речей призводить до похибок розрахунку положення полюса повороту і траєкторії руху судна навколо полюса повороту. Тривалий час поняття центр обертання і полюс повороту плутали. Одні дослідники вважали, що полюс повороту зміщується в сторону руху судна, інші вважали, що полюс повороту розміщується з протилежного боку від міделю, відносно точки прикладання бокової сили. 2-х точкова схема повороту не могла сумістити ці два погляди. У попередніх роботах авторами даної статті запропоновано використовувати 3-х точкову схему повороту, де третьою точкою є центр обертання. Використання 3-х точкової схеми повороту дозволило пояснити залежність положення полюса повороту як від поздовжньої швидкості, так і від точки прикладання бокової сили. У статті розроблено нову змістовну модель повороту судна та «Пам'ятку судноводію». Нова змістовна модель та «Пам'ятка...» дозволять зменшити похибки керування та підвищити безпеку маневрування, що особливо важливо у стиснених водах. Отримані результати пояснюються тим що, на відміну від відомих підходів: нова змістовна модель побудована на основі 3-х точкової схеми повороту, яка враховує додаткову точку – центр обертання; положення полюса повороту визначається відносно центру обертання, а не відносно центру ваги; положення полюса повороту визначається на площині, через абсцису й ординату полюса повороту.

Ключові слова: *навігаційна безпека; 3-х точкова схема повороту судна; полюс повороту; центр обертання; маневрування в стиснених водах.*

© Tovstokoryi O. M.

Статтю прийнято до редакції 04.12.2024

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ЗА ДОПОМОГОЮ ДУБЛЮВАННЯ ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

Абрамов Г. С., к.ф.-м.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: gennadabra@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0333-8819;

Плотніков В. І., аспірант Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: vladplotnikov895@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1836-5462.

Метою статті є дослідження та математичне моделювання того, як можна підвищити надійність навігаційного комплексу шляхом дублювання елементів у складі системи. У представленій статті розглядаються деякі питання визначення стійкості технічних систем насамперед з точки зору їх надійності (ймовірності безвідмовної роботи). Розглянуто низку актуальних задач стосовно підвищення надійності систем за рахунок дублювання їх елементів. Проведена оцінка різних схем дублювання елементів систем і здійснено їх математичне моделювання. Для систем, що складаються з нерівнонадійних елементів досліджено правомірність заміни їх надійностей деяким середнім значенням. Показано, що така заміна дає децю завищені значення надійності системи, і має сенс тільки при невеликій дисперсії значень надійностей (ймовірностей безвідмовної роботи) елементів системи. При високих значеннях дисперсії різко зростає відносна помилка розрахунку надійності системи (>10%). Представлено також приклад більш-менш глибокого дублювання найменш надійних елементів системи, що значно (більше ніж удвічі) підвищує надійність системи в цілому. Визначено напрями подальших досліджень, такі як використання поняття повної ймовірності та Байєсових (апостеріорних) ймовірностей відповідних гіпотез.

Ключові слова: дублювання; надійність; ймовірність безвідмовної роботи; навігаційний комплекс; моделювання.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.164-177

Вступ. Сучасні торговельні судна зараз оснащуються вдосконаленими та складними навігаційними системами, які мають відповідати стандартам продуктивності та бути затвердженими після проходження стандартних випробувань. Їхній обов'язок полягає в забезпеченні безперервної подорожі в умовах жвавого руху по всьому світу, а також безпечного та пунктуального транспортування вантажів до місця призначення. Торговельні судна, які здійснюють глобальні рейси, повинні дотримуватися мінімальних стандартів безпеки для конструкції та обладнання, встановлених Міжнародною конвенцією SOLAS для встановлення єдиних вимог. Конвенція SOLAS встановлює мінімальні вимоги до перевезення, забезпечуючи незмінні навігаційні можливості в межах конкретного класу судна.

Правило 19 глави V Конвенції SOLAS містить необхідні специфікації для навігаційних систем і обладнання на судах. Судна класифікуються на основі їх валового тоннажу або дати побудови верфі з окремими правилами, що застосовуються до кожного класу. Додатковим фактором є основні експлуатаційні особливості суден (наприклад, тип вантажу, що перевозиться на борту). При обговоренні стійкості важливою стає наявність резервних навігаційних систем на борту. Відповідно до Регламенту 19, згаданого вище, навігаційне обладнання повинно мати чітке рекомендоване резервне рішення для конкретних елементів [1, 2].

– ECDIS (Система відображення електронних карт та інформації): або актуальні паперові карти, або вторинний незалежний пристрій ECDIS можна використовувати для його підтримки, усуваючи потребу в паперових картах на борту;

– допоміжний магнітний компас: його можна замінити основним магнітним компасом і він працює без потреби в живленні, показуючи магнітний курс на головному місці керування;

– другий радар, як правило, радар s-діапазону;

– другий автоматичний засіб відстеження: додаткова програма, яка може автоматично відображати відстань і напрямок інших цілей для оцінки потенційної небезпеки зіткнення, що працює окремо від основної автоматичної радіолокаційної допомоги (ARPA).

Необхідно підкреслити, що правила не забороняють додавати додаткове резервування до навігаційного обладнання. Суднобудівники, виробники та постачальники систем мають право пропонувати морякам додаткові копії важливих для безпеки частин системи для підвищення надійності. Правило 19 розділу V Конвенції SOLAS описує необхідні елементи навігаційного обладнання, яке буде встановлено на суднах, тоді як резолюції та стандарти виконання ІМО детально описують технічні характеристики зазначеного обладнання. Юридично обов'язкові стандарти для інтегрованих навігаційних систем (INS) встановлюються функціональними вимогами до навігаційних завдань, вимагаючи резервування та відмовостійкості. Отже, INS в цілому структуровано таким чином, щоб відповідати деяким або всім мінімальним вимогам до навігаційного обладнання.

У даний час технологічний аспект суднової навігаційної системи складається з мережі, що складається з компонентів, підсистем, вузлів і інтерфейсів людина-машина. Команда містка використовує це обладнання для виконання морських завдань, таких як моніторинг, прогнозування та прийняття рішень під час обробки судна, забезпечуючи безпечне судноплавство протягом усього рейсу. Датчики, радіо- та комунікаційне обладнання, джерела даних, засоби обробки даних і інструменти візуалізації є частиною компонентів і підсистем. Їх продуктивність залежить від конфігурації та контролю людини.

Таким чином, використовувані суднові навігаційні системи можна класифікувати або як технологічні системи (без участі людини), або як соціально-технічні системи (з участю людини). Конкретна перспектива навігаційної системи зрештою визначає, які критерії слід використовувати для оцінки наявності стійкості. Якщо безпечна та ефективна навігація судна є пріоритетом, технологічна система та екіпаж повинні розглядатися як єдине ціле, що працює разом із мінливим середовищем, враховуючи як технологію, так і можливості екіпажу.

Виключно технологічна перспектива оцінює технічну стійкість (надійність) шляхом вимірювання того, наскільки добре технічні системи можуть надавати важливу навігаційну інформацію з необхідною ефективністю. Розглядаючи соціально-технічні фактори, важливо визнати роль людей, оскільки вони налаштовують, спілкуються, контролюють і приймають рішення для навігаційної системи. Вони також служать органом, який ініціює та здійснює коригування у відповідь на загрози, що виникають. У цьому контексті стійкість визначається як успішне керування судном під час подорожі з мінімальними ризиками для безпеки [3].

Широко визнано, що люди-оператори відіграють вирішальну роль у забезпеченні безпеки навігації, компенсуючи збої або недоліки технічної системи, такі як неправильні або запізнілі сигнали тривоги про зіткнення. З іншого боку, поточні технічні системи ще недостатньо стійкі, щоб компенсувати низьку продуктивність людини-оператора. Сідання на міліну «Costa Concordia» відбулося через кілька сприятливих факторів [4], але жодна з технічних систем не змогла адаптуватися достатньо швидко, щоб протидіяти відсутності поінформованості про ситуацію та неправильному прийняттю рішень людьми-операторами з команди містка.

Концепція застосування принципів стійкості для підвищення безпеки навігації та підвищення судноплавства існує вже деякий час [5–14] і використовується в різних сферах, таких як покращення служб руху суден, перевірка судових інцидентів, впровадження підходу до безпеки II [15] для морської галузі та підвищення обізнаності умов руху для безпечної навігації. Усі документи підкреслюють, що зосередження лише на окремих факторах недостатньо для досягнення стійкості. Крім того, незалежно від того, чи робиться наголос на методології, чи людському факторі, важливо зобразити навігацію судна як серію процесів, беручи до уваги залежності та взаємодії. Прикладом є модель морської перспективи в [3], яка пропонує узагальнену модель процесу для прийняття навігаційних рішень. Основна складність полягає в збалансуванні знань і досвіду початкових параметрів

(профілювання судна) і поточної ситуації (оцінка ситуації) для прийняття навігаційних рішень у невизначених ситуаціях та їх розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Принципи стійкості, як зазначено в [16–18], визначають абстрактні потенційні джерела стійкості в інженерних системах. Успіх потенційного джерела стійкості залежить від того, як воно інтегроване в систему, беручи до уваги використаний підхід і його вплив на інші заходи, реалізовані для підвищення стійкості системи.

Джексон [16, 17] зазначив, що за останні кілька десятиліть для інженерних систем було розроблено понад 40 принципів стійкості. Він запропонував розділити весь масив принципів на 14 основних принципів, а також включити такі підмножини принципів (підпринципи), як маржа, автоматизована функція або підпринципи перегрупування. Реалізація конкретного принципу стійкості допомагає створити або розширити певну здатність системи щодо бажаного атрибута системи [16, 18]. Джексон представив чотири характеристики як цілі стійкості: здатність протистояти загрозі (спроможність), здатність пристосуватися до загрози (гнучкість), збереження функціональності за наявності загрози (толерантність) і залишатися єдиними, коли стикаються з загрозою (згуртованість).

Вудс [19] класифікував низку принципів стійкості на основі чотирьох різних концепцій стійкості, націлених на різні цілі. Початкова ідея (надійність як стійкість) передбачає здатність системи ефективно працювати за типових і дещо погіршених обставин. Друга ідея наголошує на ефективному та дієвому відновленні після травматичних і деструктивних подій (стійке відновлення). Третя ідея розглядає стійкість у ситуаціях, коли система працює поблизу меж або перевищує межі своєї потужності, або стикається з несподіваними та новими загрозами (стійкість на відміну від крихкості). «Стойка адаптивність» стосується управління функціональністю та продуктивністю в мінливому та взаємопов'язаному світі, який включає припущення, вимоги користувачів, рамкові умови, такі як економічні, екологічні та правові аспекти, а також різноманітність їх взаємозв'язків і взаємодій.

Стербенц і його колеги [20–22] розробили ряд рекомендацій для створення потужних інформаційних мереж і систем зв'язку. У цих публікаціях принципи відмовостійкості називаються факторами, що сприяють, і включають як загальні підходи (такі як надмірність і різноманітність), так і підходи до конкретних програм (наприклад, усвідомлення контексту та прозорість).

Незалежно від того, як структуровані та використовуються принципи стійкості, важливі два ключові чинники: стійкість системи або системи систем є метою проектування, яка має бути чітко визначена як якісно, так і кількісно. Це означає, що бажаний рівень надійності повинен визначатися функціональними вимогами та параметрами продуктивності, отриманими з припущень щодо умов експлуатації та сценаріїв загроз. Це також передбачає наявність достатньо запланованих ресурсів, щоб бути готовими до відновлення. Однак забезпечення стійкості є щоденною відповідальністю, якою повинна ефективно керувати як система, так і відповідні органи контролю та управління. Встановлення обізнаності про ситуацію має вирішальне значення з цієї причини, і воно повинно охоплювати як поточну ситуацію (статус, стан), так і будь-які відповідні зміни, пов'язані зі стійкістю (наприклад, нові загрози) [1].

Мета та задачі дослідження. Метою даної роботи є визначення методу підвищення надійності систем навігаційного комплексу за допомогою різних схем дублювання його елементів (агрегатів, блоків, модулів). Основні задачі: 1) оцінка і моделювання надійності різних схем дублювання елементів системи; 2) оцінка надійності системи з рівнонадійними складовими елементами; 3) оцінка надійності системи з нерівнонадійними складовими елементами.

Виклад основного матеріалу. Для визначення рівня надійності навігаційного обладнання методом експертного оцінювання було проведено анкетування 22-ох капітанів та старших помічників капітана з досвідом роботи від 5-ти до 8-ми років. На основі отриманих

відповідей були сформовані діаграми, на яких показано, як часто кожний компонент навігаційного обладнання морського судна виходить із ладу (рис. 1) та чи доцільно було б дублювання того, чи іншого компонента (рис. 2).



Рисунок 1 – Як часто кожний компонент виходить із ладу

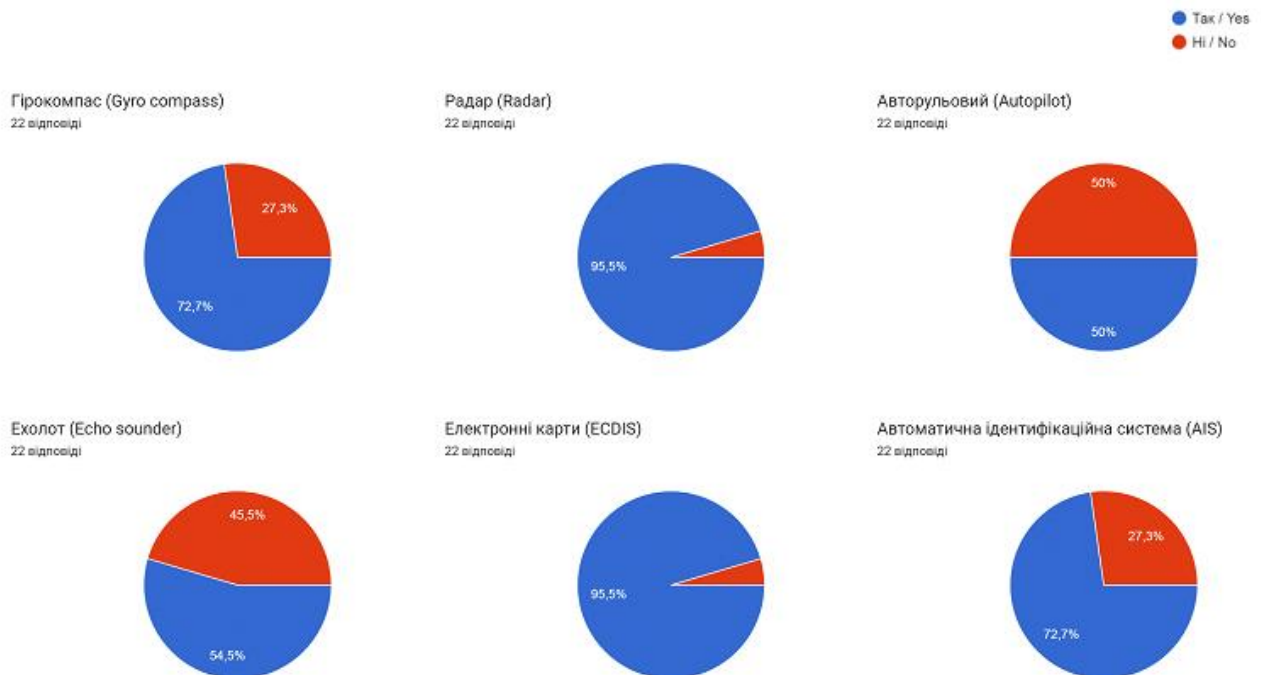


Рисунок 2 – Чи доцільно було б дублювання того, чи іншого компонента

Як можна побачити вище, деякі компоненти навігаційного обладнання мають недостатню надійність і тому потребують підвищення надійності.

Одним із найпоширеніших прийомів підвищення надійності обладнання є більш-менш глибоке дублювання його елементів. Особливо процес дублювання являється актуальним в разі недостатньої первинної надійності елементів комплексу обладнання.

Якщо відсутні принципові технологічні можливості підвищення якості й, тим самим, надійності елементної бази обладнання, то прийоми дублювання є чи не єдиними засобами підвищення експлуатаційної надійності комплексу обладнання в цілому.

Методи теорії ймовірностей [23, 24] дозволяють теоретично обчислити надійність дубльованих систем і оцінити ефективність різних схем дублювання їх елементів.

Розглянемо низку актуальних, на наш погляд, задач стосовно надійності обладнання навігаційного комплексу з точки зору дублювання його складових елементів.

1. Оцінка і моделювання надійності різних схем дублювання елементів системи.

Нехай комплекс (система) деякого навігаційного обладнання містить деяку кількість n елементів, ймовірність безвідмовної роботи яких становить p . Для ефективної роботи обладнання необхідна безвідмовна робота усіх його складових елементів.

З метою підвищення надійності обладнання здійснюється дублювання системи, для чого виділяється ще n елементів.

Розглянемо дві можливі в такій постановці схеми дублювання:

а) дублювання кожного елемента

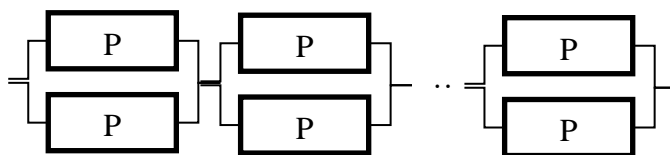


Рисунок 3 – Схема дублювання кожного елемента

б) дублювання всієї системи

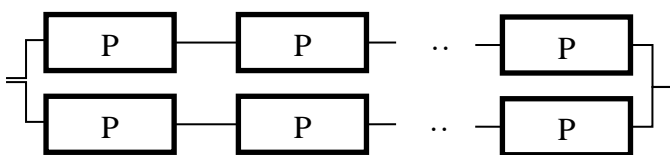


Рисунок 4 – Схема дублювання всієї системи

Здійснимо відповідні розрахунки і чисельне моделювання, щоб виявити, яка схема дублювання дає більш високу експлуатаційну надійність.

Надійність P_a (як ймовірність безвідмовної роботи), яку забезпечує дублювання за схемою «а»), має наступний вигляд:

$$P_a = [1 - (1 - p)^2]^n \tag{1}$$

Відповідний вираз P_b для схеми «б») має вигляд:

$$P_b = 1 - (1 - p^n)^2 \tag{2}$$

Здійснюючи порівняння (1) і (2), покажемо, що $P_a > P_b$.

Переформулюємо вирази (1) і (2):

$$P_a = [1 - (1 - p)^2]^n = p^n(2 - p)^n \tag{3}$$

$$P_b = 1 - (1 - p^n)^2 = p^n(2 - p^n) \tag{4}$$

Доведемо нерівність:

$$(2 - p)^n > 2 - p^n \quad (5)$$

Зважаючи, що $q = 1 - p$, нерівність (5) буде мати наступний вигляд:

$$(2 - 1 + q)^n > 2 - (1 - q)^n, \text{ або} \quad (6)$$

$$(1 + q)^n + (1 - q)^n > 2 \quad (7)$$

Застосовуючи формулу бінома, отримаємо:

$$\begin{aligned} (1 + q)^n + (1 - q)^n &= 1 + nq + \frac{n(n-1)}{2!}q^2 + \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}q^3 + \dots \\ \dots + 1 - nq + \frac{n(n-1)}{2!}q^2 - \frac{n(n-1)(n-2)}{3!}q^3 + \dots &= \\ &= 2 + n(n-1)q^2 + 0 \left(\frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{12}q^4 \right) > 2 \end{aligned} \quad (8)$$

Таким чином, $(2 - p)^n > 2 - p^n$, і це означає, що схема «а» краща, більш надійна, ніж схема «б», тобто дублювання кожного елемента системи забезпечує більш високу надійність, ніж дублювання системи в цілому.

Аналіз нерівності (8) показує, що переваги схеми «а» будуть більш очевидними при недостатній первинній надійності елементів, тобто коли значення ймовірності p достатньо віддалені від одиниці.

Навпроти, коли p наближається до одиниці, різниця між схемами «а» і «б» нівелюється і надійність (ймовірність безвідмовної роботи) обох схем асимптотично наближається до одиниці.

Продемонструємо отримані результати, здійснивши чисельне моделювання по рівняннях (3) і (4) для різних значень n і в широкому діапазоні варіації значень p (від 0,7 до 0,99).

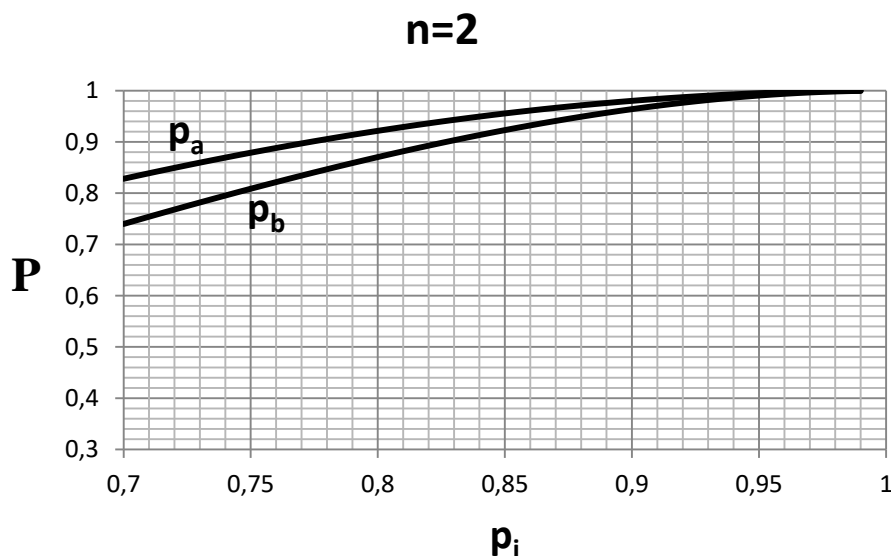


Рисунок 5 – Результати моделювання при $n=2$

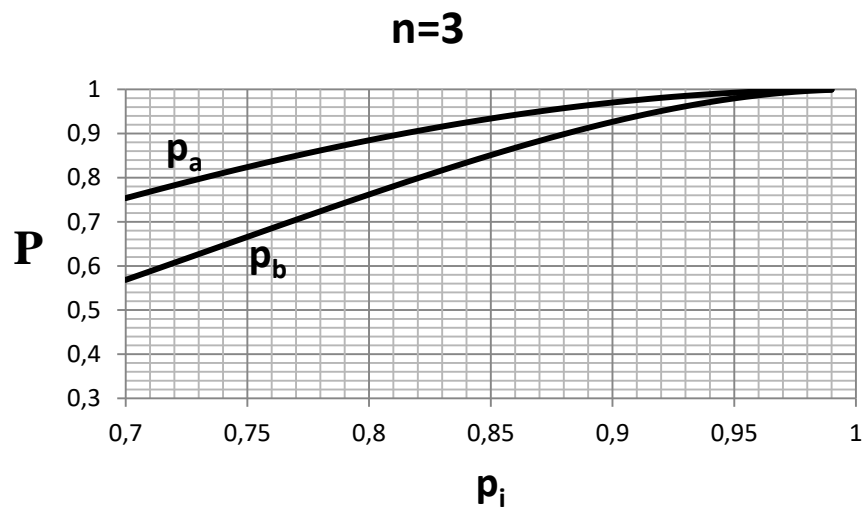


Рисунок 6 – Результати моделювання при n=3

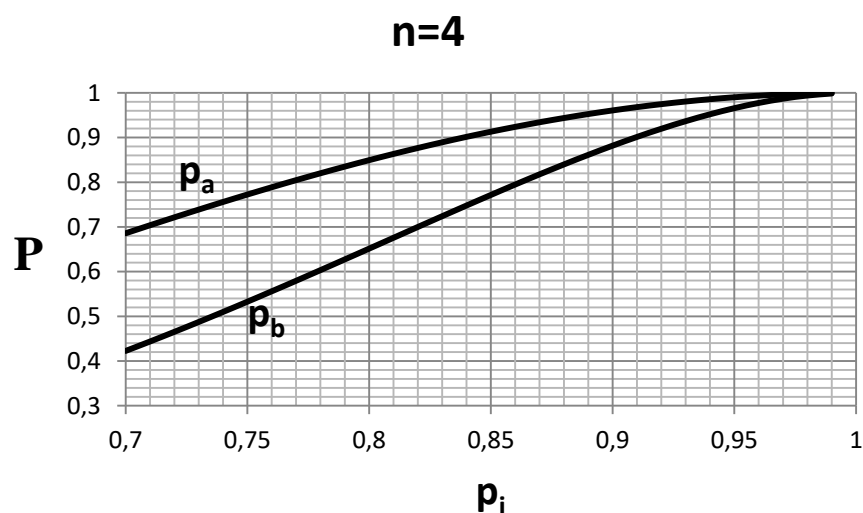


Рисунок 7 – Результати моделювання при n=4

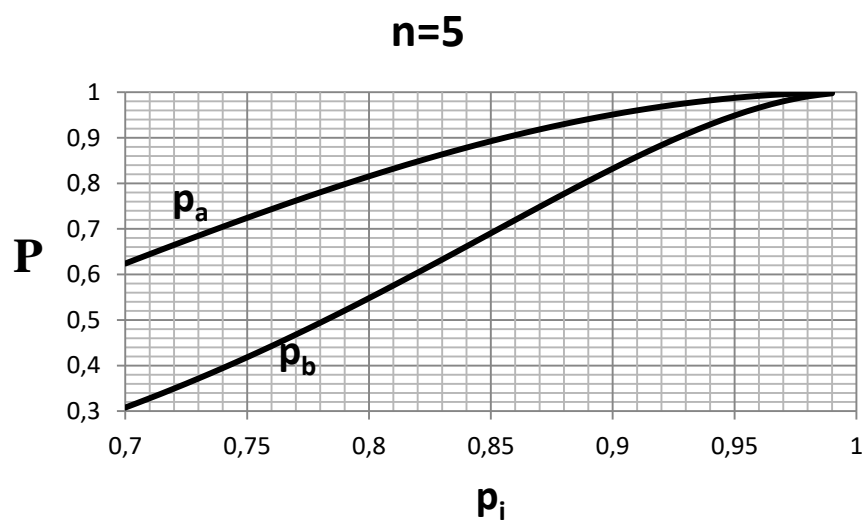


Рисунок 8 – Результати моделювання при n=5

На рис. 5–8 представлені результати моделювання, які підтверджують висновки, що витікають із аналізу нерівності (8), але неочевидним і неочікуваним результатом є та обставина, що при зростанні n схема «б» дає значно нижчу надійність ніж первинна надійність елементів p , якщо остання не перевищує значень 0,85–0,9. Тобто, якщо значення p недостатньо високі, то дублювання за схемою «б» не тільки не підвищить надійність системи, а навпаки, погіршить її.

Вид кривих надійності за схемою «б» на рис. 5–8 наводить на думку про існування точок перегину. Як відомо, для їх визначення необхідно знайти другу похідну виразу (4) і дорівняти її нулю.

$$P'_6 = 2np^{n-1}(1 - p^n) \quad (9)$$

$$P''_6 = 2n[(n - 1)p^{n-2}(1 - p^n) - np^{2(n-1)}] \quad (10)$$

Дорівнюючи останній вираз нулю, маємо:

$$p^{2n}(2n - 1) - (n - 1)p^n = 0 \quad (11)$$

Таким чином:

$$p^n(2n - 1) = n - 1 \quad (12)$$

Тобто вираз для точки перегину має вигляд:

$$P = \left(\frac{n - 1}{2n - 1} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (13)$$

Таким чином: $n = 2$; $p = \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 0,577$; $n = 3$; $p = \left(\frac{2}{5}\right)^{\frac{1}{3}} \approx 0,737$; $n = 4$; $p = \left(\frac{3}{7}\right)^{\frac{1}{4}} \approx 0,809$;
 $n = 5$; $p = \left(\frac{4}{9}\right)^{\frac{1}{5}} \approx 0,850$

Порівняння отриманих координат точок перегину з кривими для P_6 на рис. 5–8 показує, що проведений вище розрахунок є вірним. Знання координати точки перегину для схеми «б» може слугувати певним критерієм, починаючи з якого надійність цієї схеми буде асимптотично наближатися до одиниці.

Видається необхідним розглянути дві задачі про надійність технічної системи з n елементів за умови рівно надійності складових її елементів і за відсутності такої.

2. Оцінка надійності системи з рівнонадійними складовими елементами.

Схема технічної системи з рівно надійних елементів, робота кожного з яких необхідна для успішної роботи системи в цілому, представлена на рис. 9:



Рисунок 9 – Система з рівнонадійних складових елементів

Якщо технічна система складається з n рівнонадійних елементів, вихід з ладу кожного з яких означає вихід з ладу системи в цілому, то загальна надійність системи (імовірність безвідмовної роботи) P :

$$P = p^n, \quad (14)$$

звідки, надійність p кожного елемента для забезпечення загальної надійності P повинна дорівнювати:

$$p = \sqrt[n]{P} \quad (15)$$

Можна знайти й обмеження для числа елементів n з надійністю p для забезпечення заданої надійності системи P :

$$n = \text{int}\left[\frac{\ln P}{\ln p}\right] \quad (16)$$

де $\text{int}[x]$ – ціла частина x .

Проілюструємо наведену залежність:

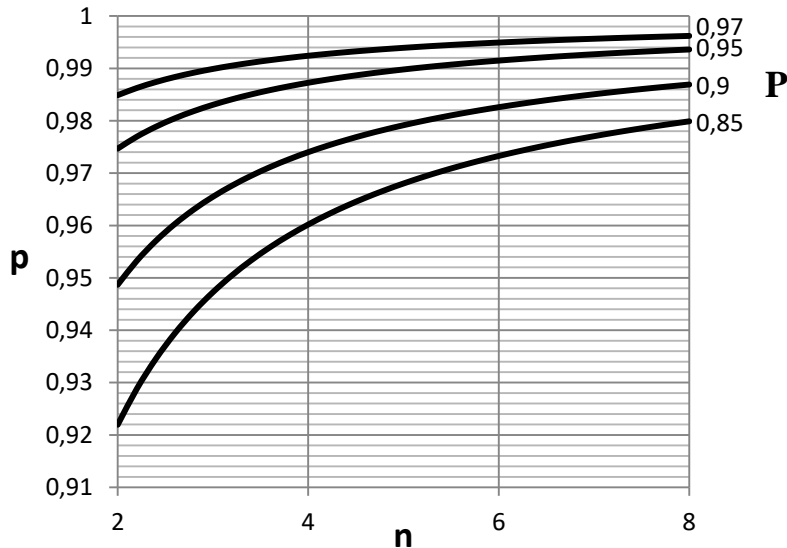


Рисунок 10 – Залежність (15) необхідної надійності елементів p від загальної (заданої) надійності системи P і числа елементів у ній n

Видно, що зі збільшенням заданої надійності системи P та числа елементів n у ній, потрібна все більш висока надійність складових елементів системи p .

3. Оцінка надійності системи з нерівнонадійними складовими елементами.

Якщо система складена з нерівнонадійних елементів (що ймовірно найчастіше і трапляється на практиці), то оцінити ймовірність безвідмовної роботи окремо кожного елемента досить важко, і тоді часто їх замінюють приблизно деяким середнім значенням:

$$\bar{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (17)$$

Оцінимо, наскільки правомочною є така заміна і як відрізнятимуться ймовірності безвідмовної роботи системи, які обчислені за істинними значеннями p_i та за їх середнім значенням.

Якби були відомі ймовірності p_i безвідмовної роботи кожного елемента, то за умови незалежності відмови кожного елемента, точне значення ймовірності безвідмовної роботи системи в цілому $P = \prod_{i=1}^n p_i$.

Наближене значення \bar{P} , обчислене за середньою ймовірністю \bar{p} , матиме вигляд:

$$\bar{P} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i\right)^n \quad (18)$$

Таким чином, потрібно порівняти величини $\prod_{i=1}^n p_i$ та $\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i\right)^n$.

Відомо, що середнє геометричне позитивних (не рівних між собою) величин менше, ніж їх середнє арифметичне:

$$\sqrt[n]{\prod_{i=1}^n p_i} < \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \quad (19)$$

звідки випливає, що:

$$\prod_{i=1}^n p_i < \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i \right]^n \quad (20)$$

тобто $P < \bar{P}$, а це означає, що оцінка ймовірності безвідмовної роботи системи \bar{P} – за середніми значеннями для p_i завжди буде дещо завищеною в порівнянні з істинною.

З апріорних міркувань видається, що ця різниця має залежати від дисперсії масиву значень p_i .

Виконаємо чисельні експерименти на прикладі наступного масиву:

p_i : 0,55; 0,6; 0,65; 0,7; **0,75**; 0,8; 0,85; 0,9; 0,95.

Будемо послідовно досліджувати набори з 3-х, 5-ти, 7-и та 9-ти елементів із середнім значенням $\bar{p} = \mathbf{0,75}$.

Дисперсії обчислимо за відомими формулами:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \bar{x}^2 \quad (21)$$

Відповідно середньоквадратичне відхилення (стандартна помилка):

$$s = \sqrt{s^2} \quad (22)$$

Обчислимо також коефіцієнт варіації $\gamma = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\%$, як відносне значення помилки та відносну помилку δ між значеннями \bar{P} та P :

$$\delta = \frac{\bar{P} - P}{P} \cdot 100\% \quad (23)$$

Отримані результати наведено у таблиці 1.

Наведемо приклад обчислення першого рядка таблиці $n = 3$: 0,7; 0,75; 0,8.

$$P = 0,7 \cdot 0,75 \cdot 0,8 = 0,42; \bar{P} = 0,75^3 = 0,422$$

$$s^2 = \frac{1}{3} (0,49 + 0,5625 + 0,64) - 0,5625 = 0,00167$$

$$s = 0,041; \gamma = \frac{0,041}{0,75} \cdot 100\% = 5,47\%$$

$$\delta = \frac{0,422 - 0,42}{0,42} \cdot 100\% = 0,48\%$$

Таблиця 1 – Значення P , \bar{P} та помилок s , γ і δ для наборів з 3-х, 5-ти, 7-и та 9-ти елементів

n	P	\bar{P}	s	$\gamma, \%$	$\delta, \%$
3	0,42	0,422	0,041	5,47	0,48
5	0,232	0,237	0,071	9,47	2,16
7	0,1253	0,1335	0,1	13,3	6,54
9	0,0655	0,0751	0,1292	17,23	14,7

Видно, що при зростанні дисперсії значень p_i різко зростає відносна помилка δ , її значення перевищують 10%, що ставить під сумнів правомірність заміни масиву p_i їх середнім значенням.

4. Приклад схеми дублювання системи нерівнонадійних елементів.

Якщо система складається з нерівнонадійних елементів, необхідно розглядати задачу дублювання елементів, надійність яких недостатньо висока, оскільки вони лімітують надійність системи загалом. Ефективність дублювання найменш надійних елементів системи можна показати на наступному прикладі.

Нехай технічна система складається із п'яти елементів, надійність яких (імовірність безвідмовної роботи) дорівнює: $p_1 = 0,85$; $p_2 = 0,75$; $p_3 = p_4 = 0,95$; $p_5 = 0,75$. Видно, що 1-й, 2-й та 5-й елементи потребують дублювання як недостатньо надійні, причому 2-й та 5-й елементи повинні мати, мабуть, триразове дублювання (рис. 11).

Без дублювання надійність системи складає:

$$\bar{P} = [1 - (1 - p_1)] \cdot [1 - (1 - p_2)] \cdot [1 - (1 - p_3)] \cdot [1 - (1 - p_4)] \cdot [1 - (1 - p_5)] \\ = 0,85 \cdot 0,75 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,75 = 0,418$$

До речі, якщо визначити надійність за середнім значенням $\bar{p} = 0,85$, то вона буде, як і слід очікувати, трохи вище:

$$\bar{P} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i\right)^n = 0,85^5 = 0,444$$

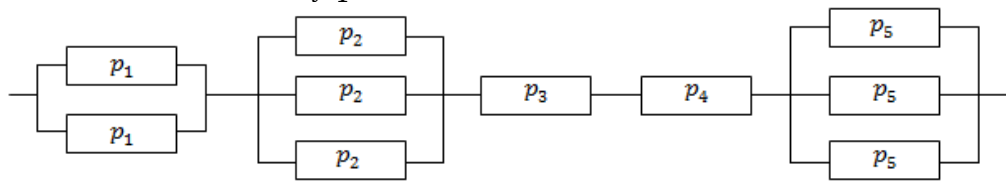


Рисунок 11 – Схема дубльованої системи

Надійність дубльованої системи (рис. 11) складає:

$$P = [1 - (1 - p_1)^2] \cdot [1 - (1 - p_2)^3] \cdot p_3 \cdot p_4 \cdot [1 - (1 - p_5)^3] \\ = 0,9775 \cdot 0,984 \cdot 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,984 = 0,854$$

Як бачимо, надійність системи, елементи якої продубльовані відповідним чином, збільшується більш ніж удвічі і перевищує 85%.

Висновки. У даній роботі була проведена оцінка ефективності різних схем дублювання елементів систем навігаційного комплексу і їх математичне моделювання. Отримані результати дозволили зробити низку висновків щодо ймовірності безвідмовної роботи системи при використанні тієї чи іншої схеми дублювання.

Якщо система складається з рівнонадійних елементів, то дублювання кожного елемента є більш ефективним методом підвищення надійності, ніж дублювання всієї системи. Більше того, якщо значення первинної надійності елементів дорівнює 0,85 або нижче, то дублювання всієї системи з кожним зростанням кількості дублюючих елементів значно знизить надійність системи. Тоді як підвищення надійності системи шляхом дублювання кожного елемента при недостатній первинній надійності елементів буде більш істотно при значеннях надійності елементів нижче 0,85.

Якщо система складається з нерівнонадійних елементів, то при неможливості оцінки ймовірності безвідмовної роботи окремо кожного елемента заміна їх значень деяким середнім значенням виявляється сумнівною (при істотній дисперсії їх значень), оскільки при високій дисперсії значень ймовірності безвідмовної роботи елементів системи різко зростає значення відносної помилки, яка може перевищувати 10%.

Дублювання найменш надійних елементів системи, що складається з нерівнонадійних елементів, може збільшити надійність системи більш ніж удвічі, за умови якщо воно виконане з урахуванням значення ймовірності безвідмовної роботи кожного елемента.

Перспективи подальших досліджень. Застосування поняття повної ймовірності та Байєсівських (апостеріорних) ймовірностей відповідних гіпотез для розрахунків ймовірності відмов або ймовірності безвідмовної роботи як окремих елементів, так і навігаційного комплексу в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Engler E., Baldauf M., Banyś P., Heymann F., Gucma M., Torres, F. S. Situation Assessment – An Essential Functionality for Resilient Navigation Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2019. Vol. 8(1):17. <https://doi.org/10.3390/jmse8010017>.
2. International Maritime Organization (IMO). International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). 1974.
3. Wahlström M., Forster D., Karvonen A., Puustinen R., Saariluoma P. Perspective-Taking in Anticipatory Maritime Navigation – Implications for Developing Autonomous Ships. In *Proceedings of the 18th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, Tullamore, Ireland, 25–27 March 2019. P. 191–200.
4. Wreathall J. Monitoring – A critical ability in Resilience Engineering. In *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*; Hollnagel E., Paries J., Woods D. D., Wreathall J., Eds.; Ashgate Pub Co.: Surrey, UK. 2011.
5. Praetorius G., Hollnagel E. Control and Resilience Within the Maritime Traffic Management Domain. *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.* 2014. Vol. 8, P. 303–317.
6. Praetorius G. Vessel Traffic Service (VTS): A Maritime Information Service or Traffic Control System? Understanding Everyday Performance and Resilience in a Socio-Technical System under Change. *Ph.D. Thesis*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. 2014.
7. Schröder-Hinrichs J.-U., Praetorius G., Graziano A., Kataria A., Baldauf M. Introducing the Concept of Resilience into Maritime Safety. In *Proceedings of the 6th Resilience Engineering Association Symposium*, Lisboa, Portugal, 22–25 June 2015.
8. Smith D., Veitch B., Khan F., Taylor R. Using the FRAM to Understand Arctic Ship Navigation: Assessing Work Processes During the Exxon Valdez Grounding. *TransNav Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.* 2013. Vol. 12, P. 447–457.
9. Wahlström M. Resilience on the seven seas: perspective-taking in anticipatory ship navigation. In *Proceedings of the 8th REA Symposium Embracing Resilience: Scaling Up and Speeding Up*, Kalmar, Sweden, 24–27 June 2019.
10. Van Westrenen F., Praetorius G. Maritime traffic management: a need for central coordination? *Cognition, Technology & Work*. 2014. Vol. 16(1), P. 59–70.
11. Aven T., Andersen H. B., Cox T., Droguett E. L., Greenberg M., Guikema S., Kröger W., Renn O., Zio E. Risk Analysis Foundations. *Soc. Risk Anal.* 2015.
12. Ayyub B. M. Practical Resilience Metrics for Planning, Design, and Decision Making. *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part Civ. Eng.* 2015. Vol. 1. <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000826>.
13. Ayyub B. M. Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making. *Risk Anal. Off. Publ. Soc. Risk Anal.* 2014. Vol. 34, P. 340–355. <https://doi.org/10.1111/risa.12093>.
14. Smith D., Veitch B., Khan F., Taylor R. An Accident Model for Arctic Shipping, in: *Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Presented at the OMAE 2015, St. John's, NL, Canada.
15. Hollnagel E. RAG – The resilience analysis grid. In *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*; Hollnagel E., Paries J., Woods D. D., Wreathall J., Eds.; Ashgate Pub Co.: Surrey, UK. 2011.
16. Jackson S., Ferris T. L. J. Resilience Principles for Engineered Systems. *Syst. Eng.* 2013. Vol. 16, P. 152–164.
17. Jackson S., Ferris T. L. J. Designing Resilient Systems. In *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Resilience-Based Approaches to Critical Infrastructures Safeguarding*, Azores, Portugal, 26–29 June 2016. P. 121–144.
18. Madni A. M., Jackson S. Towards a Conceptual Framework for Resilience Engineering. *IEEE Syst. J.* 2009. Vol. 3, P. 181–191.
19. Woods D. D. Four concepts for resilience and the implication for the future resilience. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2015. Vol. 141, P. 5–9.

20. Sterbenz J. P. G., Hutchison D., Cetinkaya E. K., Jabbar A., Rohrer J., Schöller M., Smith P. Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Comput. Netw.* 2010. Vol. 54, P. 1245–1265.
21. Sterbenz J. P. G., Hutchison D., Cetinkaya E. K., Jabbar A., Rohrer J., Schöller M., Smith P. Redundancy, diversity, and connectivity to achieve multilevel network resilience, survivability, and disruption tolerance. *Telecommun. Syst.* 2014. Vol. 56, P. 17–31.
22. Cheng Y., Todd Gardner M., Li J., May R., Medhi D., Sterbenz J. P. G. Optimised heuristics for a geodiverse routing protocol. In *The 10th IEEE/IFIP international conference on Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, 2014, Ghent, Belgium.
23. Феллер В. Введення в теорію ймовірностей та її застосування. У 2-х томах. М.: Світ, 1984. Т.1: 528 с., Т.2: 738 с.
24. Гече Ф. Е. Теорія ймовірностей і математична статистика: навч. посібн. Ужгород: ПП «АУТДОР-ШАРК», 2019. 235 с.

REFERENCES

1. Engler, E., Baldauf, M., Banyś, P., Heymann, F., Gucma, M., Torres, F. S. (2019). Situation Assessment – An Essential Functionality for Resilient Navigation Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1):17; <https://doi.org/10.3390/jmse8010017>.
2. International Maritime Organization (IMO). International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974.
3. Wahlström, M., Forster, D., Karvonen, A., Puustinen, R., Saariluoma, P. (2019). Perspective-Taking in Anticipatory Maritime Navigation – Implications for Developing Autonomous Ships. In *Proceedings of the 18th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*, Tullamore, Ireland, 25–27 March 2019; 191–200.
4. Wreathall, J. (2011). Monitoring – A critical ability in Resilience Engineering. In *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*; Hollnagel, E., Paries, J., Woods, D. D., Wreathall, J., Eds.; Ashgate Pub Co.: Surrey, UK.
5. Praetorius, G., Hollnagel, E. (2014). Control and Resilience Within the Maritime Traffic Management Domain. *J. Cogn. Eng. Decis. Mak.*, 8, 303–317.
6. Praetorius, G. (2014). Vessel Traffic Service (VTS): A Maritime Information Service or Traffic Control System? Understanding Everyday Performance and Resilience in a Socio-Technical System under Change. *Ph.D. Thesis*, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
7. Schröder-Hinrichs, J.-U., Praetorius, G., Graziano, A., Kataria, A., Baldauf, M. (2015). Introducing the Concept of Resilience into Maritime Safety. In *Proceedings of the 6th Resilience Engineering Association Symposium*, Lisboa, Portugal, 22–25 June 2015.
8. Smith, D., Veitch, B., Khan, F., Taylor, R. (2013). Using the FRAM to Understand Arctic Ship Navigation: Assessing Work Processes During the Exxon Valdez Grounding. *TransNav Int. J. Mar. Navig. Saf. Sea Transp.*, 12, 447–457.
9. Wahlström, M. (2019). Resilience on the seven seas: perspective-taking in anticipatory ship navigation. In *Proceedings of the 8th REA Symposium Embracing Resilience: Scaling Up and Speeding Up*, Kalmar, Sweden, 24–27.
10. Van Westrenen, F., Praetorius, G. (2014). Maritime traffic management: a need for central coordination? *Cognition, Technology & Work*, 16(1), 59–70.
11. Aven, T., Andersen, H. B., Cox, T., Droguett, E. L., Greenberg, M., Guikema, S., Kröger, W., Renn, O., Zio, E. (2015). Risk Analysis Foundations. *Soc. Risk Anal.*
12. Ayyub, B. M. (2015). Practical Resilience Metrics for Planning, Design, and Decision Making. *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part Civ. Eng. I.* <https://doi.org/10.1061/AJRUA6.0000826>.
13. Ayyub, B. M. (2014). Systems resilience for multihazard environments: definition, metrics, and valuation for decision making. *Risk Anal. Off. Publ. Soc. Risk Anal.* 34, 340–355. <https://doi.org/10.1111/risa.12093>.

14. Smith, D., Veitch, B., Khan, F., Taylor, R. (2015). An Accident Model for Arctic Shipping, in: *Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Presented at the OMAE 2015, St. John's, NL, Canada.
15. Hollnagel, E. (2011). RAG – The resilience analysis grid. In *Resilience Engineering in Practice: A Guidebook*; Hollnagel, E., Paries, J., Woods, D. D., Wreathall, J., Eds.; Ashgate Pub Co.: Surrey, UK.
16. Jackson, S., Ferris, T. L. J. (2013). Resilience Principles for Engineered Systems. *Syst. Eng.*, 16, 152–164.
17. Jackson, S., Ferris, T. L. J. (2016). Designing Resilient Systems. In *Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop on Resilience-Based Approaches to Critical Infrastructures Safeguarding*, Azores, Portugal, 26–29 June 2016; 121–144.
18. Madni, A. M., Jackson, S. (2009). Towards a Conceptual Framework for Resilience Engineering. *IEEE Syst. J.*, 3, 181–191.
19. Woods, D.D. (2015). Four concepts for resilience and the implication for the future resilience. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 141, 5–9.
20. Sterbenz, J. P. G., Hutchison, D., Cetinkaya, E. K., Jabbar, A., Rohrer, J., Schöller, M., Smith, P. (2010). Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Comput. Netw.*, 54, 1245–1265.
21. Sterbenz, J. P. G., Hutchison, D., Cetinkaya, E. K., Jabbar, A., Rohrer, J., Schöller, M., Smith, P. (2014). Redundancy, diversity, and connectivity to achieve multilevel network resilience, survivability, and disruption tolerance. *Telecommun. Syst.*, 56, 17–31.
22. Cheng, Y., Todd Gardner, M., Li, J., May, R., Medhi, D., Sterbenz, J. P. G. (2014). Optimised heuristics for a geodiverse routing protocol. In *The 10th IEEE/IFIP international conference on Design of Reliable Communication Networks (DRCN)*, Ghent, Belgium.
23. Feller, V. (1984). *Vvedennia v teoriyu ymovirnostei ta yii zastosuvannia*. (Vols. 1–2). M.: Svit.
24. Heche, F. E. (2019). *Teoriia ymovirnostei i matematychna statystyka*. Uzhhorod: PP «AUTDOR-ShARK».

Abramov G. S., Plotnikov V. I. SIMULATION OF THE PROCESSES OF INCREASING THE RELIABILITY OF THE NAVIGATION COMPLEX WITH THE HELP OF DUPLICATION OF ITS ELEMENTS

The article discusses challenges in evaluating the stability of technical systems, primarily focusing on their reliability in terms of trouble-free operation. The aim of this study is to investigate and mathematically model the enhancement of reliability through different duplication schemes in navigation system components.

Various pressing issues related to enhancing the dependability of systems through duplicating their components were discussed. Different methods for duplicating system components were assessed and their mathematical representation was developed. Research has been conducted on the feasibility of substituting the reliabilities of elements in systems with varying levels of reliability with an average value.

It was found that duplicating each element in a system of equally reliable elements is a more effective way to improve reliability than duplicating the entire system. Additionally, if the primary reliability value of the elements is 0.85 or less, duplicating the entire system with each addition of duplicate elements will greatly decrease the system's reliability. Enhancing the system's reliability through duplicating elements with low primary reliability becomes more important when element reliability is below 0.85. Also, it has been demonstrated that this substitution results in slightly higher system reliability estimates, and is only logical when there is minimal variation in the reliability values of system elements. For high dispersion values, the system reliability calculation's relative error sharply increases by more than 10%.

An instance of substantially duplicating the least dependable components of the system is shown, resulting in a more than double increase in the overall reliability of the system. Future research should focus on utilizing the concept of full probability and Bayesian probabilities for related hypotheses.

Key words: duplication; reliability; probability of failure-free operation; navigation complex; modeling.

© Абрамов Г. С., Плотніков В. І.

Статтю прийнято до редакції 21.09.2024

МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ВИБОРУ СПОСОБУ ПЕРЕСУВАННЯ ЗА КРИТЕРІЄМ ДОСТУПНОСТІ

Войтович О. А., к.т.н., доцент, декан факультету інженерії та транспорту Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: olgavoitovich@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0510-4362;

Луб'яний П. В., к.т.н., доцент, завідувач кафедри транспортних систем та технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: lubravel@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2668-5063;

Мосьпан В. М., к.т.н., доцент кафедри транспортних систем та технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: Valerii.Mospan@dornier-group.com, ORCID: 0009-0004-7880-1884;

Кузьменко І. О., аспірант кафедри економіки, підприємництва та економічної безпеки Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: igor.kuizmenko@gmail.com, ORCID: 0009-0004-6878-7310.

У статті досліджується питання вибору населенням раціонального способу пересування у містах на підставі таких параметрів як доступність, час пересування та коефіцієнт психологічної оцінки витрат. У сучасних умовах розвитку міст мобільність населення має визначальний вплив на рівень їх соціально-економічного та просторового розвитку. Таким чином, можна стверджувати, що розвиток міст і мобільності є взаємопов'язаними процесами. Для задоволення своїх потреб у мобільності населенням у містах може бути використано три основні способи пересування: піший рух, громадський та особистий транспорт. Кожен із наведених способів пересування має свої переваги та недоліки. Здійснення пішого руху не передбачає потреб у витратах, пов'язаних із пересуванням, проте вимагає наявності необхідної якісної інфраструктури. Громадський транспорт є основним способом пересування населення у містах. Проте використання даного способу пересування, окрім наявності інфраструктури, передбачає здійснення населенням часових та грошових витрат, а саме: підходу до зупиночного пункту, очікування прибуття транспортного засобу для здійснення посадки, рух до пункту прибуття, оплата транспортного тарифу. Використання особистого легкового автомобіля також передбачає необхідність здійснення ряду часових та грошових витрат. У даному випадку також існує необхідність у здійсненні пішого підходу до автомобіля та руху до місця призначення. Проте, на відміну від двох попередніх способів пересування, використання особистого легкового автомобіля передбачає здійснення значно більших витрат, які пов'язані із придбанням та утриманням транспортного засобу. Беручи до уваги вищевказане можливо констатувати, що використання запропонованого підходу до вибору населенням раціонального способу пересування із урахуванням наведених особливостей видів мобільності дозволить підвищити точність оцінки транспортної поведінки за рахунок комплексного врахування таких параметрів як доступність, час пересування та коефіцієнт психологічної оцінки витрат.

Ключові слова: піший рух; громадський транспорт; особистий легковий автомобіль; відстань пересування; витрати часу; групи витрат.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.178-186

Вступ. Протягом останніх десятиліть вимоги основних учасників перевізного процесу (муніципалітет, перевізники та населення) до мобільності підвищилися. Одним із ключових драйверів даного процесу є активна імплементація сучасних концепцій транспортного планування як на державному, так і місцевому рівнях. Дані концепції відображені у Національній транспортній стратегії України на період до 2030 року, Національній стратегії зі створення безбар'єрного простору в Україні до 2030 р., Планах сталої міської мобільності (ПСММ) тощо.

Наразі головною ціллю населення є задоволення власних потреб у мобільності із урахуванням високого рівня якості транспортних послуг та доступності тарифів. У той же час оператори громадського транспорту зацікавлені в отриманні максимального прибутку від здійснення перевізної діяльності при мінімальних витратах. Основною ціллю муніципалітету є збільшення кількості пересувань населення сталими видами мобільності, що значною

мірою сприяє досягненню завдань, визначених національними і місцевими стратегічними документами.

У даному випадку слід звернути особливу увагу на той факт, що цілі всіх вищевказаних учасників перевізного процесу можуть бути досягнені лише за умови високого рівня якості транспортних послуг [1, 2, 3].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Задачі, що стосуються дослідження пересувань населення у містах вирішуються багатьма вітчизняними та закордонними науковцями. Суттєвий вклад у дослідження даного питання здійснено П. Горбачовим, Є. Нагорним, В. Вдовиченко, О. Россоловим, С. Свечинським, Є. Любим, Б. Скоробогатовим, А. Редзюком, Й. Буткявічусом, Д. Копитковим, Н. Leonard, S. Stouffer, A. Fotheringham, A. Voorhees, T. Fratar, P. Newman, J. Korte, J. Pucher, F. Lehner та ін.

Результати проведеного аналізу підходів щодо вибору населенням способу пересування у містах свідчать про можливість їх удосконалення за рахунок комплексного врахування таких параметрів як доступність, час пересування та коефіцієнт психологічної оцінки витрат.

Постановка проблеми у загальному вигляді. У сучасних умовах розвитку міст, мобільність має значний вплив на функціонування як муніципального господарства, так і підприємств усіх форм власності. Цей факт пояснюється тим, що транспортна система є сукупністю транспортних засобів та шляхів сполучення, які щоденно використовуються десятками тисяч користувачів для забезпечення високої ефективності функціонування міст. Наразі такі параметри як доступність, час пересування та коефіцієнт психологічної оцінки витрат не враховуються комплексно при дослідженні вибору способу пересування населення. Комплексне врахування вищевказаних параметрів дозволить підвищити точність оцінки вибору способу пересування населення у містах і створити підґрунтя для подальшого використання отриманих результатів при дослідженні потенційної транспортної поведінки [4].

Мета дослідження. Метою дослідження є формалізація залежностей, використання яких дозволить підвищити точність оцінки вибору способу пересування населення у містах за рахунок комплексного врахування таких параметрів як доступність, час пересування та коефіцієнт психологічної оцінки витрат.

Методи дослідження. Для досягнення мети дослідження використовувалися методи системного аналізу, абстрагування та формалізації.

Виклад основного матеріалу. Сучасний рівень розвитку транспортних систем міст створює можливості для використання населенням різних альтернативних видів транспорту з метою здійснення пересувань. Кількість альтернативних видів транспорту залежить від двох основних факторів, а саме: рівень розвитку відповідної інфраструктури та економічної доступності. Графічну інтерпретацію основних видів транспорту, які можуть використовуватися населенням для здійснення пересувань у містах представлено на рисунку 1 [5].

Відповідно до інформації, представленої на рисунку нижче, для здійснення пересувань населенням у містах можуть використовуватися наступні основні види транспорту [6]:

- піший рух;
- громадський транспорт;
- особистий транспорт.

Як правило, при виборі способу пересування населення намагається мінімізувати власні часові та грошові витрати. Величина вищевказаних витрат залежить від ряду факторів, що характеризуються технічними, технологічними та економічними показниками. Чим меншим є значення часових та грошових витрат, тим вища ймовірність вибору відповідного способу здійснення пересування населенням [7].

У даному випадку критерій вибору населенням способу пересування у містах (K_{ij}) можна формалізувати наступним чином:

$$K_{ij} = A_1^i + A_2^i \cdot L + \frac{A_3^i \cdot L + A_4^i}{D} \quad (1)$$

де A_1^i – витрати часу, які залежать від відстані пересування, год;
 A_2^i – витрати часу на одиницю довжини пересування, год/км;
 A_3^i – вартість одиниці довжини пересування, грн/км;
 A_4^i – витрати, незалежні від довжини пересування, грн;
 L – відстань пересування, км;
 D – дохід суб'єкта пересування, грн/год.

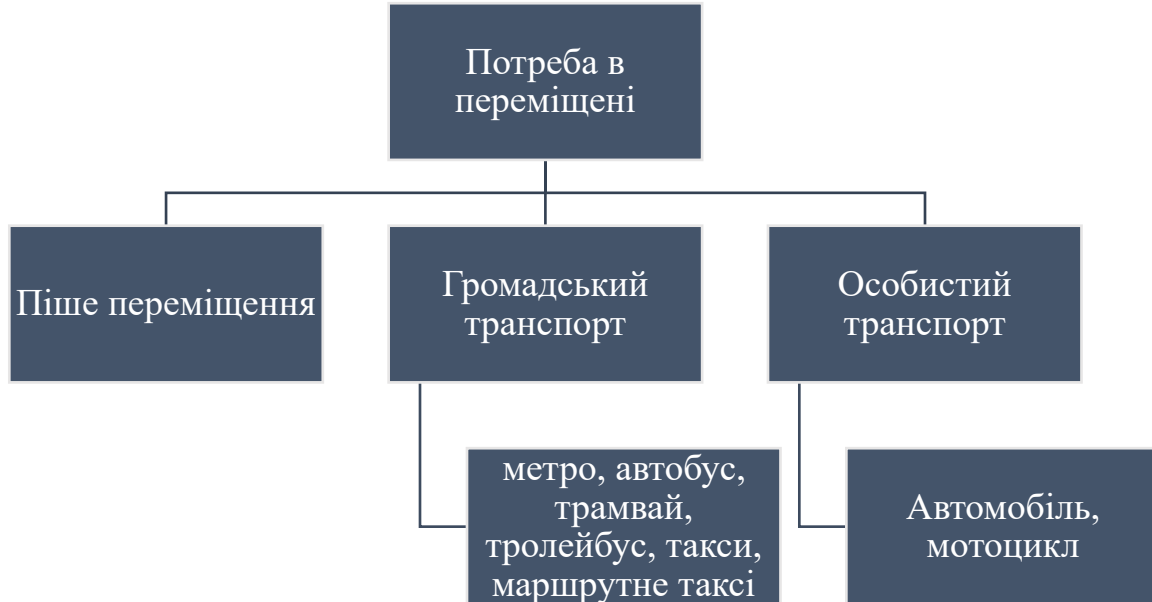


Рисунок 1 – Основні види транспорту, які можуть використовуватися населенням при здійсненні пересування у містах

Пропонований підхід до визначення значень коефіцієнтів ($A_1^i - A_4^i$) для кожного із способів пересування, що представлено на рисунку 1, наведено нижче.

Піший рух. Використання даного способу пересування не передбачає потреб у здійсненні грошових витрат та часу на підхід/відхід до/від місця посадки в транспортний засіб. Таким чином, у даному випадку, значення коефіцієнтів (A_1), (A_3), та (A_4) дорівнюють нулю. У той же час значення коефіцієнта (A_2) є обернено пропорційним величині швидкості пішого руху і прямо пропорційне психологічній оцінці витрат часу при використанні даного способу пересування:

$$A_2 = \frac{P_{\text{піш}}}{V_{\text{піш}}} \quad (2)$$

де $V_{\text{піш}}$ – швидкість пішого руху, км/год;
 $P_{\text{піш}}$ – коефіцієнт психологічної оцінки витрат часу при пішому русі.

Громадський транспорт. Використання даного способу пересування передбачає потребу в здійсненні додаткових часових витрат, пов'язаних із пішим підходом/відходом до/від місця посадки в транспортний засіб. Вказані часові витрати є зворотними до щільності маршрутної мережі, та також коригуються шляхом використання коефіцієнта ($P_{\text{піш}}$). Таким чином, час пішого підходу/відходу до/від місця посадки в транспортний засіб ($T_{\text{піш}}$) може бути формалізовано наступним чином:

$$T_{\text{піш}} = \frac{P_{\text{піш}}}{3P_M \cdot V_{\text{піш}}} \quad (3)$$

де P_M – щільність маршрутної мережі, км/км².

При дослідженні вибору даного способу пересування також є необхідним врахування часу очікування пасажиром транспортного засобу на зупиночному пункті. Як правило, величина цього показника визначається як $1/2$ інтервалу руху транспортних засобів на маршруті [7]. Із урахуванням коефіцієнта ($P_{оч}$), час очікування транспортного засобу на зупиночному пункті маршруту громадського транспорту ($T_{оч}$) може бути визначено наступним чином:

$$T_{оч} = \frac{P_{оч} \cdot I_{рух}}{2} = \frac{P_{оч} \cdot L_{мар}}{2 \cdot A_e \cdot V_e} \quad (4)$$

де $P_{оч}$ – коефіцієнт психологічної оцінки часу очікування транспортного засобу;
 $I_{рух}$ – інтервал руху транспортних засобів на маршруті, год;
 $L_{мар}$ – сумарна довжина маршруту, км;
 A_e – кількість одиниць рухомого складу, що експлуатуються на маршруті од.;

V_e – експлуатаційна швидкість руху транспортних засобів, км/год.

На основі вищевказаного можливо визначити значення коефіцієнта (A_1) наступним чином:

$$A_1 = \frac{P_{піш}}{3P_m \cdot V_{піш}} + \frac{P_{оч} \cdot L_{мар}}{2 \cdot A_e \cdot V_e} \quad (5)$$

Слід зазначити, що у даному випадку, значення коефіцієнта (A_2) є зворотним до значення швидкості сполучення на маршруті. Таким чином, значення коефіцієнта (A_2) для громадського транспорту становить:

$$A_2 = \frac{1}{V_c} \quad (6)$$

де V_c – швидкість сполучення на маршруті, км/год.

Значення коефіцієнта (A_3) для міського громадського транспорту дорівнює нулю. Це пояснюється тим фактом, що у переважній більшості випадків для пасажирів діє тариф, що передбачає здійснення оплати за поїздку. Беручи до уваги формулу (1), можливо констатувати, що величина тарифу для населення за користування послугами міського громадського транспорту буде еквівалентною значенню коефіцієнта (A_4) [8, 9].

Особистий легковий автомобіль [10]. У разі використання даного виду транспорту, витрати часу, які не пов'язані з відстанню пересування (A_1), будуть дорівнювати часу пішого руху до місця паркування транспортного засобу та від нього до пункту призначення. Таким чином, значення коефіцієнта (A_1) може бути формалізовано наступним чином:

$$A_1 = \frac{L_{парк} \cdot P_{піш}}{V_{піш}} \quad (7)$$

де $L_{парк}$ – середня відстань підходу/відходу до/від особистого легкового автомобіля, км.

Перелік та склад основних витрат, які пов'язані з експлуатацією особистого легкового автомобіля [11] представлено у таблиці нижче.

При використанні особистого легкового автомобіля, витрати часу на одиницю довжини пересування (A_2) є оберненим до швидкості руху транспортного потоку, коригуються на значення коефіцієнта психологічної оцінки часу руху і визначаються наступним чином:

$$A_2 = \frac{P_{ос}}{V_{ос}} \quad (8)$$

де $P_{ос}$ – коефіцієнт психологічної оцінки часу руху в особистому легковому автомобілі;
 $V_{ос}$ – швидкість руху транспортного потоку, км/год.

Таблиця 1 – Перелік основних витрат, які пов’язані з експлуатацією особистого легкового авто

<i>Група витрат</i>	<i>Категорія витрат</i>	<i>Стаття витрат</i>
А	Витрати, що залежать від відстані, але не здійснюються під час пересування	– паливно-мастильні матеріали; – гума; – запасні частини та розхідні матеріали; – оплата послуг станцій технічного обслуговування та ремонту.
Б	Витрати, які не залежать від відстані та здійснюються під час пересування	– платне паркування; – проїзд платною ділянкою дороги; – платні в’їзди.
В	Витрати, що не залежать від кількості пересувань (постійні витрати)	– придбання автомобіля; – податки і страховка; – інші державні збори.

Витрати, що представлені у таблиці 1 (група А) збільшуються пропорційно довжині пересування. У даному випадку, грошова вартість одиниці довжини пересування дорівнює значенню змінних витрат на 1 км пробігу особистого легкового автомобіля з урахуванням коефіцієнта психологічної оцінки цих витрат. Відповідно, значення коефіцієнта (A_3) може бути розраховано наступним чином:

$$A_3 = P_{на} \cdot S_{1км} \quad (9)$$

де $P_{на}$ – коефіцієнт психологічної оцінки витрат, що залежать від відстані, але не здійснюються під час пересування.

$S_{1км}$ – змінні витрати за 1 км пробігу, грн/км.

Витрати, що наведено у групі Б не залежать від відстані пересування, але пов’язані з ним. Ці витрати також впливають на прийняття рішення щодо вибору способу пересування і тому мають бути інтегрованими до відповідного критерію без будь-яких коригувань [12, 13, 14].

Витрати, які включено до групи В не пов’язані з експлуатацією особистого легкового автомобіля, проте для даного способу пересування вони є обов’язковими. Їх величина залежить від платоспроможності власника транспортного засобу та ставок зборів і податків, встановлених на державному рівні [15].

Беручи до уваги вищевказане, можливо визначити значення коефіцієнта (A_4) за групами витрат наступним чином:

$$A_4 = \frac{\left(\frac{C_{авт}}{T_{сл}} + V_{год}\right) \cdot P_{вм}}{N_{рік}} + C_{пост} \quad (10)$$

де $C_{авт}$ – середня вартість особистого легкового автомобіля, грн;

$T_{сл}$ – середня тривалість життєвого циклу особистого легкового автомобіля, рік;

$V_{год}$ – річні постійні витрати на експлуатацію особистого легкового автомобіля, грн;

$N_{рік}$ – середня кількість пересувань на рік, од.;

$P_{вм}$ – коефіцієнт психологічної оцінки здійснених витрат;

$C_{пост}$ – величина постійних витрат під час пересування, грн.

Середня річна кількість пересувань особистим легковим автомобілем протягом року може бути визначена наступним чином:

$$N_{рік} = \frac{L_{рік}}{L_{ср}} \quad (11)$$

де $L_{рік}$ – середньорічний пробіг особистого легкового автомобіля, км;

L_{cp} – середня відстань одного пересування, км.

Формули для розрахунку коефіцієнтів ($A_1 - A_4$) для трьох альтернативних варіантів пересування наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Формули для розрахунку коефіцієнтів ($A_1 - A_4$) для трьох альтернативних варіантів пересування [12]

Коефіцієнт критерію	Піший рух	Громадський транспорт	Особистий легковий автомобіль
A_1	0	$\frac{P_{\text{піш}}}{3P_M \cdot V_{\text{піш}}} + \frac{P_{\text{оч}} \cdot L_{\text{мар}}}{2 \cdot A_e \cdot V_e}$	$\frac{L_{\text{парк}} \cdot P_{\text{піш}}}{V_{\text{піш}}}$
A_2	$\frac{P_{\text{піш}}}{V_{\text{піш}}}$	$\frac{1}{V_c}$	$\frac{P_{\text{ос}}}{V_{\text{ос}}}$
A_3	0	0	$P_{\text{на}} \cdot S_{1\text{км}}$
A_4	0	тариф за проїзд	$\frac{\left(\frac{C_{\text{авт}}}{T_{\text{сл}}} + B_{\text{год}}\right) \cdot P_{\text{вм}}}{N_{\text{рік}}} + C_{\text{пост}}$

Висновки.

1. Використання запропонованих залежностей дозволяє здійснювати комплексний аналіз процесу вибору населенням способу пересування у міському сполученні серед таких видів мобільності як піший рух, громадський транспорт та особистий легковий автомобіль.

2. Запропоновані критерії враховують ряд економічних та технічних параметрів, які дозволяють здійснити ґрунтовний аналіз перспективних варіантів розвитку мобільності в містах з урахуванням поточного та перспективного станів транспортної системи та економіки.

3. Отримані результати дослідження процесу вибору населенням способу пересування у міському сполученні з урахуванням запропонованих параметрів можуть також використовуватися для розробки заходів щодо розвитку сталих видів пересувань, оскільки описують ключові складові транспортного процесу.

4. Подальша практична апробація наведених результатів дослідження може створити підґрунтя для здійснення розрахунку частки пересувань населення у містах шляхом проведення короткого соціологічного опитування респондентів замість використання класичних «щоденників минулих поїздок».

Перспективи подальших досліджень. З метою перевірки запропонованої концепції розрахунку значень критеріїв вибору раціонального способу пересування населення у містах є доцільним проведення соціологічного опитування. Це дасть можливість встановити функціональні залежності між визначеними коефіцієнтами та, за потреби, уточнити запроповану концепцію. Таким чином, першочерговим завданням для подальшого дослідження є розробка концепції проведення соціологічного опитування населення стосовно транспортної поведінки з урахуванням демографічної та економічної ситуації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Понкратов Д. П. Формалізація взаємозв'язку між показниками рівня заповнення міських пасажирських транспортних засобів. *Комунальне господарство міст*. 2020. Вип. 152. С. 196–203.
2. Bruun E. C. Better public transit systems. Analyzing investments and performance. London : Routledge, 2013. 400 P.

3. Луб'яний П. В., Войтович О. А., Кузьменко І. О. Доступність пасажирського транспорту для населення з огляду формування тарифу. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2023. Вип. 1–2 (26–27). С. 107–120.
4. Daraio C., Diana M., Di Costa F., Leporelli C., Matteucci G., Nastasi A. Efficiency and effectiveness in the urban public transport sector: A critical review with directions for future research. *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 248. P. 1–20.
5. Lubyanyi P. V., Voytovic O. A., Lubyanyaya N. P. A mathematical model for determining the rational version of a passenger route network// *Methods and tools for analyzing and forecasting the market situation to ensure the sustainability of business entities: monography / with gen. ed. by Shandova N. V. – Kherson: OLDI-PLUS, 2021. – P. 160–178.*
6. Banister D. Transport planning. *Handbook of transport systems*. London : SPON PRESS, 2001. P. 9–19.
7. Звіт про науково-дослідну роботу «Обстеження пасажиропотоків на міських автобусних та тролейбусних маршрутах загального користування в м. Херсон»; ХНТУ договір від 23.07.2021 р. № 148. 2021. 51 с.
8. Луб'яний П. В., Антоняк П. О. Формування раціональної схеми оплати за надання послуг по перевезенню пасажирів в містах. *Синергія науки і бізнесу у повоєнному відновленні Херсонщини*. 2023. Вип. 1. С. 302–306.
9. Макаренко В. Д., Луб'яний П. В., Войтович О. А. Якість пасажирських транспортних послуг на основі нефінансових показників. *ВІСНИК ХНТУ*. 2023. Вип. 1(84). С. 48–55.
10. Black A. *Urban mass transportation planning*. McGraw–Hill College, 1995. 448 P.
11. Ponkratov D., Gyulyev N., Voronko V., Ostashevskiy S., Psol S., Bugayov I. Development of models for assessing a driver's failure free operation in a transportation system under conditions of traffic congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3. P. 24–38. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85081979671&doi=10.15587%2f1729-4061.2020.194449&partnerID=40&md5=ea68bf4fa8fcbeca31192ace21825a82> (дата звернення: 01.08.2024).
12. Morfoulaki M., Tyrinopoulos Y., Aifadopoulou G. Estimation of satisfied customers in public transport systems: a new methodological approach. *Journal of the Transportation Research*. 2010. Vol. 46. P. 63–72.
13. Ponkratov D., Davidich Y., Kopytkov D., Samchuk G., Kush Y. Public Transit Crowding Estimation Indicators: Comparative Analysis, Conditions of Application, Interaction. *International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 536. P. 764–774. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85144237140&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Public+transit+crowding+estimation+indicators%3a+comparative+analysis%2c+conditions+of+application%2c+interaction&sid=b551781d5d7484e385b7c420598edf04&sot=b&sdt=b&sl=122&s=TITLE-ABS-KEY%28Public+transit+crowding+estimation+indicators%3a+comparative+analysis%2c+conditions+of+application%2c+interaction%29&relpos=0&citeCnt=0&searchTerm> (дата звернення: 03.08.2024).
14. Horbachov P., Makarichev O., Svichynskiy S., Ivanov I. Framework for designing sample travel surveys for transport demand modelling in cities. *Transportation*. 2022. Vol. 49(1). P. 115–136. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-021-10168-6> (дата звернення: 03.08.2024).
15. Олійник Н. М., Макаренко С. М. Особливості використання методів бізнес-аналізу щодо забезпечення економічної стійкості та сталого розвитку підприємства// *Методи та інструменти аналізу і прогнозування ринкової ситуації в забезпеченні стійкості суб'єктів господарювання: монографія / за заг. ред. Н. В. Шандової. – Херсон: ОЛДІ-ПЛЮС, 2021. – С. 134–147.*

REFERENCES

1. Ponkratov, D. P. (2020). Formalizatsiia vzaiemozviazku mizh pokaznykamy rivnia zapovnennia miskykh pasazhyrskykh transportnykh zasobiv. *Komunalne hospodarstvo mist*. Vyp. 152. S. 196–203.
2. Bruun, E. C. (2013). *Better public transit systems. Analyzing investments and performance*. London : Routledge. 400 P.
3. Lubyanyi, P. V., Voytovic, O. A., Kuzmenko, I. O. (2023). Dostupnist pasazhyrskoho transportu dlia naselennia z ohliadu formuvannia taryfu. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. Vyp. 1–2 (26–27). S. 107–120.
4. Daraio, C., Diana, M., Di Costa, F., Leporelli, C., Matteucci, G., Nastasi, A. (2016). Efficiency and effectiveness in the urban public transport sector: A critical review with directions for future research. *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 248. P. 1–20.
5. Lubyanyi, P. V., Voytovic, O. A., Lubyanyaya, N. P. (2021). A mathematical model for determining the rational version of a passenger route network// *Methods and tools for analyzing and forecasting the market situation to ensure the sustainability of business entities: monography / with gen. ed. by Shandova N. V. – Kherson: OLDI-PLUS, 2021. – P. 160–178.*
6. Banister, D. (2001). *Transport planning. Handbook of transport systems*. London : SPON PRESS. P. 9–19.
7. Zvit pro naukovo-doslidnu robotu (2021). «Obstezhennia pasazhyropotokiv na miskykh avtobusnykh ta troleibusnykh marshrutakh zahalnoho korystuvannia v m. Kherson»; KhNTU dohovir vid 23.07.2021 p. № 148–51 S.
8. Lubyanyi, P. V., Antonyak, P. O. (2023). Formuvannia ratsionalnoi skhemy oplaty za nadannia posluh po perevezenni pasazhyriv v mistakh. *Synerhiia nauky i biznesu u povoiennomu vidnovlenni Khersonshchyny*. Vyp. 1. S. 302–306.
9. Makarenko, V. D., Lubyanyi, P. V., Voytovic, O. A. (2023). Yakist pasazhyrskykh transportnykh posluh na osnovi nefinansovykh pokaznykiv. *VISNYK KhNTU*. Vyp. 1(84). S. 48–55.
10. Black, A. (1995). *Urban mass transportation planning*. McGraw–Hill College. 448 P.
11. Ponkratov, D., Gyulyev, N., Voronko, V., Ostashevskiy, S., Psol., Bugayov, I. (2020). Development of models for assessing a driver's failure free operation in a transportation system under conditions of traffic congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 3. P. 24–38. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85081979671&doi=10.15587%2f1729-4061.2020.194449&partnerID=40&md5=ea68bf4fa8fcbeca31192ace21825a82> (data zvernennia: 01.08.2024).
12. Morfoulaki, M., Tyrinopoulos, Y., Aifadopoulou, G. (2010). Estimation of satisfied customers in public transport systems: a new methodological approach. *Journal of the Transportation Research*. Vol. 46. P. 63–72.
13. Ponkratov, D., Davidich, Y., Kopytkov, D., Samchuk, G., Kush, Y. (2023). Public Transit Crowding Estimation Indicators: Comparative Analysis, Conditions of Application, Interaction. *International Conference on Smart Technologies in Urban Engineering. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2023. Vol. 536. P. 764–774. URL: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85144237140&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=Public+transit+crowding+estimation+indicators%3a+comparative+analysis%2c+conditions+of+application%2c+interaction&sid=b551781d5d7484e385b7c420598edf04&sot=b&sdt=b&sl=122&s=TITLE-ABS-KEY%28Public+transit+crowding+estimation+indicators%3a+comparative+analysis%2c+conditions+of+application%2c+interaction%29&relpos=0&citeCnt=0&searchTerm> (data zvernennia: 03.08.2024).
14. Horbachov, P., Makarichev, O., Svichynskiy, S., Ivanov, I. (2022). Framework for designing sample travel surveys for transport demand modelling in cities. *Transportation*. Vol. 49(1). P. 115–136. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11116-021-10168-6> (data zvernennia: 03.08.2024).

15. Oliinyk, N. M., Makarenko, S. M. (2021). Osoblyvosti vykorystannia metodiv biznes-analizu shchodo zabezpechennia ekonomichnoi stiikosti ta staloho rozvytku pidpriemstva// Metody ta instrumenty analizu i prohnozuvannia rynkovoї sytuatsii v zabezpechenni stiikosti subiektiv hospodariuvannia: monohrafiia / za zah. red. N. V. Shandovoi. – Kherson: OLDI-PLIUS. – S. 134–147.

Voytovych O. A., Lubyanyi P. V., Mospan V. M., Kuzmenko I. O. THE MODEL FOR CALCULATING TRANSPORTATION MODE CHOICES BASED ON AFFORDABILITY CRITERIA

Abstract. The article investigates the issue of the population's choice of a rational mode of transportation in cities based on parameters such as affordability, travel time and the psychological assessment of expenses. In modern urban development, population mobility significantly impacts socio-economic and spatial development levels. Thus, it can be stated that urban development and mobility are interrelated processes. To meet their mobility needs, urban population can use three main modes of transportation: walking, public transport and personal vehicle. Each this mode of transportation has several advantages and disadvantages. Walking incurs no transportation expenses but requires well-developed and high-quality infrastructure. Public transport is the primary mode of transportation for the population in cities. However, using public transport requires both time and monetary expenses. In addition to having access to infrastructure, the population must travel to the stop, wait for the vehicle to arrive for boarding, commute to their destination and pay the fare. Using a personal vehicle also involves various time and monetary expenses. In this case, there is also a need to walk to the vehicle and commute to the destination. However, unlike the two previous modes of transportation, using a personal vehicle involves significantly higher costs related to its purchase and maintenance. Considering the above-mentioned, it can be stated that employing the proposed approach to assessing the population choice of a rational mode of transportation by accounting for the features of each mobility type will enhance the accuracy of evaluating transport behaviour. This is achieved through a comprehensive consideration of parameters such as affordability, travel time, and the psychological assessment of expenses.

Key words: walking; public transport; personal vehicle; travel distance; time expenditures; groups of expenses.

© Войтович О. А., Луб'яний П. В., Мосьпан В. М., Кузьменко І. О.

Статтю прийнято до редакції 10.08.2024

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 друківаними 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 самоцитування (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 APA-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 анотованій 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 journalnvsma@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=> [select standard: Passport (CMU 2010)]).

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) 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

- Ропомарьова V., Nosov P.** 6
DEVELOPMENT OF A NAVIGATOR QUALIFICATION MODEL FOR
AUTOMATED SHIP HANDLING CONTROL TASKS
- Zinchenko S., Kalinichenko E., Kozachok Yu., Mateichuk V.** 24
INFLUENCE OF HULL AND CARGO CONTOURS ON LATERAL FORCE
AND YAW TORQUE IN REAL-TIME VESSEL CONTROL SYSTEMS
- Бурунін А. П.** 35
ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ БЕЗЕКІПАЖНОГО
НАДВОДНО-ПІДВОДНОГО КАТЕРА ТРАНСПОРТНОГО ТИПУ
- Войтасик А. М., Костенко Д. В., Сірівчук А. С.** 49
СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
БЕЗЕКІПАЖНОГО КАТЕРА ЯК СКЛАДОВА ЙОГО СИСТЕМИ
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ
- Збруцький О. В., Сірівчук А. С., Трибулькевич С. Л.** 58
АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНОГО МОРСЬКОГО
ТЕХНОЛОГІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ЗАДАЧ ГУМАНІТАРНОГО
РОЗМІНУВАННЯ ВОДНИХ ТРАНСПОРТНИХ ШЛЯХІВ УКРАЇНИ

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

- Литвиненко В. В., Шаляпін С. М.** 70
ОСОБЛИВОСТІ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ
БАЛАСТНИХ ВОД УЛЬТРАФІОЛЕТОВИМ ВИПРОМІНЮВАННЯМ

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- Пашинський В. В., Пашинська О. Г., Бойко І. А.** 84
ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ МЕХАНІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ З УРАХУВАННЯМ
РЕКОМЕНДАЦІЙ СТАНДАРТУ ДСТУ EN 1563:2019

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

- Бень А. П.** 99
МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З УПРАВЛІННЯ РУХОМ СУДЕН
В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ НАВІГАЦІЙНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ
- Козачок Ю. А., Зінченко С. М.** 111
ІНТЕГРАЦІЯ СНАТГРТ ДЛЯ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
АВТОНОМНИХ СУДЕН В РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ
- Носов П. С., Сокол І. В., Подобєда В. В.** 122
РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАВІГАЦІЙНИХ
РОЗРАХУНКІВ НА БОРТУ СУДНА В КРИТИЧНИХ СИТУАЦІЯХ

Проценко В. О., Настасенко В. О., Бабій М. В. **139**
РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛІ ПЕРЕДАВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ДЕТАЛЯМИ
РУЛЬОВОЇ МАШИНИ ПЛУНЖЕРНОГО ТИПУ

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Tovstokory O. M. **152**
SUBSTANTIVE MODEL OF SHIP TURN WITH ACCOUNT OF THE LATEST
ACHIEVEMENTS IN THEORY AND PRACTICE

Абрамов Г. С., Плотніков В. І. **164**
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО
КОМПЛЕКСУ ЗА ДОПОМОГОЮ ДУБЛЮВАННЯ
ЙОГО ЕЛЕМЕНТІВ

Войтович О. А., Луб'яний П. В., Мосьпан В. М., Кузьменко І. О. **178**
МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ ВИБОРУ СПОСОБУ ПЕРЕСУВАННЯ
ЗА КРИТЕРІЄМ ДОСТУПНОСТІ

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ **187**

CONTENTS

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Ponomaryova V., Nosov P. 6
DEVELOPMENT OF A NAVIGATOR QUALIFICATION MODEL FOR
AUTOMATED SHIP HANDLING CONTROL TASKS

Zinchenko S., Kalinichenko E., Kozachok Yu., Mateichuk V. 24
INFLUENCE OF HULL AND CARGO CONTOURS ON LATERAL FORCE
AND YAW TORQUE IN REAL-TIME VESSEL CONTROL SYSTEMS

Burunin A. P. 35
FEATURES OF AUTOMATION OF UNMANNED SURFACE-UNDERWATER
BOAT OF TRANSPORT TYPE

Voitasyk A. M., Sirivchuk A. S., Kostenko D. V. 49
SYSTEM FOR MEASURING DYNAMIC CHARACTERISTICS
OF AN UNMANNED VESSEL AS A COMPONENT OF ITS AUTOMATIC
CONTROL SYSTEM

Zbrutsky O. V., Sirivchuk A. S., Trybulkevich S. L. 58
AUTOMATION OF CONTROL OF UNMANNED MARINE TECHNOLOGICAL
COMPLEX FOR THE TASK OF INSPECTION OF WATERWAYS OF UKRAINE

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

Lytvynenko V. V., Shaliapin S. M. 70
FEATURES TO OPTIMIZE BALLAST WATER TREATMENT TECHNOLOGY
USING ULTRAVIOLET RADIATION

MATERIALS SCIENCE

Pashynskyi V. V., Pashynska O. G., Boyko S. O. 84
RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE HIGH-STRENGTH
CAST IRON MECHANICAL PROPERTIES TAKING INTO ACCOUNT THE
RECOMMENDATIONS OF THE DSTU EN 1563:2019 STANDARD

NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING

Ben A. P. 99
DECISION-MAKING METHODS FOR SHIP TRAFFIC CONTROL IN
INTELLIGENT NAVIGATION INFORMATION SYSTEMS

Kozachok Y. A., Zinchenko S. M. 111
INTEGRATION OF CHATGPT FOR DECISION-MAKING SUPPORT
OF AUTONOMOUS VESSELS IN REAL-TIME MODE

Nosov P., Sokol I., Podobieda V. 122
DEVELOPMENT OF METHODS AND MEANS FOR AUTOMATING
ONBOARD NAVIGATION CALCULATIONS IN CRITICAL SITUATIONS

Protsenko V. O., Nastasenko V. O., Babii M. V. 139
DEVELOPMENT OF LOAD TRANSFER BY THE PARTS OF A RAM-TYPE
STEERING GEAR MODEL

TRANSPORT TECHNOLOGIES

Tovstokory O. M. 152
SUBSTANTIVE MODEL OF SHIP TURN WITH ACCOUNT OF THE LATEST
ACHIEVEMENTS IN THEORY AND PRACTICE

Abramov G. S., Plotnikov V. I. 164
SIMULATION OF THE PROCESSES OF INCREASING THE RELIABILITY
OF THE NAVIGATION COMPLEX WITH THE HELP OF DUPLICATION
OF ITS ELEMENTS

Voytovych O. A., Lubyanyi P. V., Mospan V. M., Kuzmenko I. O. 178
THE MODEL FOR CALCULATING TRANSPORTATION MODE CHOICES
BASED ON AFFORDABILITY CRITERIA

DESIGN REQUIREMENTS FOR SCIENTIFIC WORKS 190

ДЛЯ НОТАТОК

Наукове видання

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 2 (29)

Видається з 2009 року

Відповідальний за випуск *Р. С. Врублевський*
Технічний редактор *Г. А. Врублевська*
Коректура англійської мови *А. С. Волкова*

Формат 60x84/16. Папір офсетний.

Ум. др. арк. 12,38.

Підписано до друку 24.01.2025.

Тираж 100 прим.

Видавець і виготовлювач
Херсонська державна морська академія,
просп. Незалежності, 20, м. Херсон, 73000
Ел. адреса: rvv@ksma.ks.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої
справи до Державного реєстру
ДК № 4319 від 10.05.2012