

ISSN-print 2313-4763

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

**НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ**

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (28)

Видається з 2009 року

Херсон
2024

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2024. № 1 (28). – 216 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

*Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії
(протокол № 13 від 28.06.2024 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;

Наговський Д. А., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

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

Сіманенков А. Л., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

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

Хлопенко М. Я., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

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

Тематична спрямованість – Матеріалознавство:

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

Акімов О. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;

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

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

Сметанкін С. О., Ph.D., Херсонська державна морська академія, Україна, член 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;

Dulebová Ludmila, Ph.D., Technical University of Kosice, Словаччина, членкиня редколегії.

Тематична спрямованість – Транспортні технології:

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

Аргун Ш. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, членкиня 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;

Кулініч 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;

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

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

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

Варбанець Р. А., д.т.н., Одеський національний морський університет, 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. Індифікатор 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

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

SCIENTIFIC BULLETIN

KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

Science journal

Published twice a year

№ 1 (28)

Issued from 2009

Kherson
2024

Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy : science journal. – Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2024. № 1 (28). – 216 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 № 13 from 28.06.2024)*

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;

Dmytro Nahovskyi, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

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

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

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

Mikola Khlopenko, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, 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 Saponov, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;

Oleksandr Akimov, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;

Viktor Husev, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, 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;

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

Petro Stukhlyak, Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluji 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., assoc. Prof., 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;

Shchasiana Arhun, Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway 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;

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

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

Pavlo Nosov, Candidate of Engineering Science, Kherson State 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;

Roman Varbanets, Doctor of Engineering Science, Odesa National Maritime University, 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: journalnvksma@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**.

ISSN-print 2313-4763

© Scientific bulletin Kherson State
Maritime Academy, 2024

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

METHOD OF AUTOMATED IDENTIFICATION OF HAZARDOUS FATIGUE FACTORS IN NAVIGATORS BASED ON SLEEP INDICATORS

Koretsky O., Graduate student, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: alekseykoretsky@gmail.com, ORCID: 0009-0006-3436-5405;

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

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

Pohorletskyi D., Ph.D., Associate Professor, Department of Ship Power Plants Operation, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: pohorletskyi.dmytro@ksma.ks.ua, ORCID: 0000-0002-1256-8053.

The issue of fatigue among navigators during the performance of their duties poses a significant risk to maritime safety, with human factors being the primary cause of marine accidents. The aim of this study is to develop and test an automated method for identifying hazardous fatigue factors in navigators based on sleep indicators. This study addresses the challenge of accurately diagnosing fatigue, which is often underestimated or misinterpreted by the navigators themselves. The research involved long-term monitoring of the psychophysiological state of navigators during their duties and rest periods on the vessels "Alexander" IMO 9433353, "Brigitte M" IMO 9155913, and "LONGWOOD" IMO 9504138. Various statistical and dynamic analysis methods were used in the study, including regression analysis, time series analysis, and Student's t-test.

The experiments demonstrated a significant correlation between the duration of deep sleep and the reduction in wakefulness periods, indicating that longer periods of deep sleep mitigate the effects of fatigue. It was established that an increase in deep sleep time by 1% leads to a decrease in wakefulness time by an average of 0.736% to 0.98%. The correlation coefficient between deep sleep duration and stress level ranged from 0.73 to 0.98, confirming a high degree of correlation. The approximation error values ranged from 0.34% to 12.44%, indicating satisfactory model quality.

The developed automated system for fatigue detection showed promising results in enhancing navigational safety by providing real-time analysis and adaptive watch scheduling based on crew condition. The system is capable of automatically adjusting watch schedules and rest periods, ensuring an optimal balance between workload and rest. The practical significance of the system lies in its potential to reduce the impact of the human factor on maritime safety by 18-28% and optimize voyage time, contributing to fuel and energy savings. The system can also automatically intervene in cases of critical decreases in navigator performance, for example, by automatically switching to auxiliary control systems (autopilot) or sending alarm signals to other crew members or the control center.

The theoretical significance of the obtained results lies in the experimental proof of the effectiveness of using sleep indicators for real-time monitoring and analysis of navigator fatigue. The practical significance of the results lies in the development of a system that ensures timely detection of hazardous navigator states, reduces the risk of accidents, and enhances overall navigational safety.

Key words: automation of fatigue detection; sleep indicators; maritime safety; psychophysiological monitoring; automated control system; method.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.006-021

Introduction. According to the latest EMSA Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023, the trend of marine accidents has not decreased from 2014 to 2022. The total number of accidents during this period amounted to 23,814 cases, with an average of 2,646 accidents per year. In 2022 only were 2,510 cases. 59% of accidents were caused due to influence of the Humans factors. The second most common cause was system failures, accounting for 25.3%, which is more than twice lower than human factor's impact, once again proving that while humans are the key link in ensuring the safe operation of a vessel, they are also the least reliable [1].

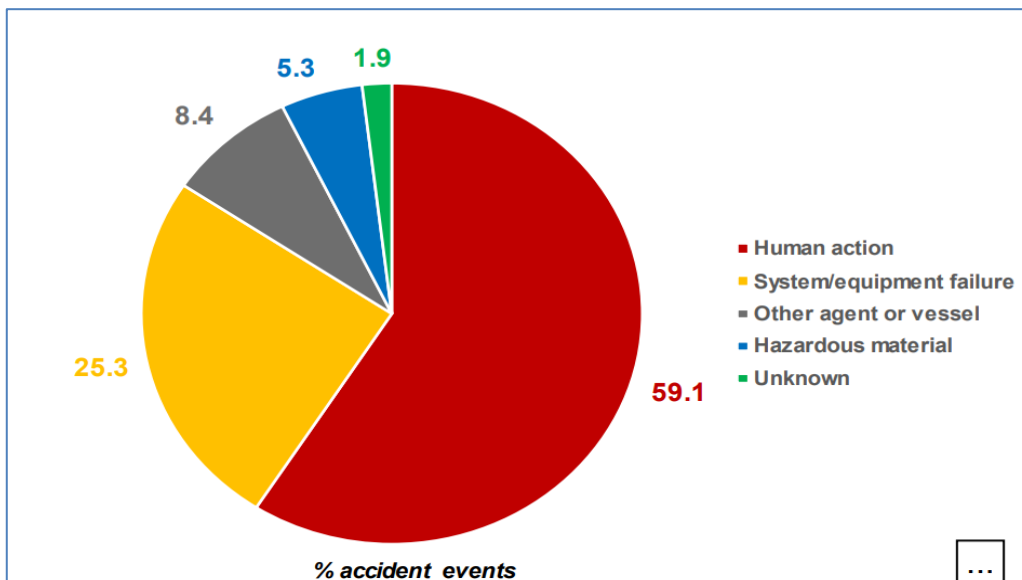


Figure 1 – EMSA Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023 – Percentage distribution of incidents by type from 2014 to 2022

Currently, there are several intelligent tools aimed at improving maritime navigation safety that consider the human factor [2–4]. The human factor of a navigator is a complex phenomenon that requires a multifaceted approach to analysis [5]. An important aspect in this context is using the various testing methods to assess an individual's psychological state. For example, using the Minnesota Multiphasic Personality Inventory (MMPI) allows for obtaining a specific psychological profile of an individual [6]. It is also important to perform tests that check reaction, attention, and movement skills, using, for example, Task Attention Control software (TAC) to assess the psychophysiological characteristics of a person.

Fatigue and stress manifestations significantly impact navigators during their duties, especially during watchkeeping, which is critical for ensuring navigational safety. Global practices in the application of intelligent systems are predominantly focused on navigation safety and do not focus on ship operators [7]. Fatigue is defined as a temporary decrease in performance caused by prolonged or intense physical or intellectual activity, manifested as a decrease in qualitative and quantitative work indicators, as well as a deterioration in the navigator's working functions. The initial stages of fatigue can have symptoms similar to stress (distress); however, recovery from stress occurs almost immediately after the stressor is removed, while fatigue requires a time for recovery [8].

Despite the significant contributions of researchers worldwide in analyzing the physiological indicators of fatigue on the navigator's actions and decision-making accuracy and timeliness, there is a need for automation of these processes. The creation of an automated system for studying navigator fatigue in real-time will significantly increase the process of identifying dangerous trends in the navigator's actions. Considering that the ship's crew does not include psychologists, there is a need to create an artificial automated system that can replace a specialist in this field.

Problem Statement. To build a specialized automated system that identifies fatigue of navigators during watchkeeping, it is necessary to thoroughly investigate the relevant physiological manifestations, especially those that cannot be determined through visual observations. One of the physiological indicators of fatigue is a decrease in blood oxygen levels, which is a characteristic sign for a healthy person. Drowsiness is also a typical symptom of fatigue. In cases of severe fatigue, there may be a decrease in heart rate and body temperature, which can indicate the approach to sleep [9].

In the current context of cargo transportation, which never ceases, crews often work overtime, enduring significant physical and psychological stress. This includes nighttime maneuvers in ports, handling cargo, and keeping the vessel in working condition [10]. Over the past 30 years, numerous studies have been conducted on the impact of fatigue and stress on navigational

safety. These studies have led to the development of optimal watch schedules, necessary rest hours, and the creation of codes, instructions, company policies, and fatigue management plans. Additionally, compliance with these measures is monitored by port authorities and the flag state control. Despite this, the effectiveness of these measures often remains insufficient.

A significant compensatory factor in counteracting the negative effects of stress and fatigue is adequate quantity and quality of sleep. According to the "IMO guidelines on fatigue," the normal sleep duration should be 7–8 hours per day, with the presence of deep sleep phase being crucial for effective recovery. Breaking sleep into several shorter periods does not have the same restorative effect as continuous sleep. According to the MLC Code, the minimum rest time per day should be at least 10 hours, and in a seven-day period – at least 77 hours, with daily rest divided into no more than two periods, one of which should be at least 6 hours of continuous sleep [11].

Studies have shown that the human body's recirculation time is around 16 hours, after which the brain begins to lose its efficiency. It is important to note that the brain often cannot adequately assess its own level of fatigue, especially under stress. Experiments with students who slept 4 to 6 hours a day for a month showed that they assessed their condition as normal. However, they experienced a 400% increase in periods of micro-sleep (spontaneous falling asleep) compared to those who slept 8 hours [12].

Sleep has a complex structure that includes different phases – the deep sleep phase and the rapid eye movement (REM) sleep phase. It is often believed that the deep sleep phase is the most restorative, but this is an oversimplification. In reality, both phases are important. They are closely linked to external stimuli, but circadian rhythms have an endogenous nature and function as an "internal biological clock."

In the context of work on water transport, the influence of circadian rhythms is complex. During daytime watches, circadian rhythms usually promote increased activity, which is positive. However, during night watches, they can induce sleepiness, even after sufficient rest. Thus, this factor is important to consider when planning crew watch and rest schedules. For this reason, it is necessary to develop an intelligent system for identifying and controlling watchkeeping in the context of processing navigators' physiological data.

There are not many publications dedicated to solving this problem to improve navigational safety, but there are related issues in other fields of human activity. A comprehensive analysis of the literature in these areas will allow for a more detailed and effective approach to solving the problem.

In particular, in the article [13], devices are described that include systems for collecting, processing, and analyzing data to monitor patient conditions. Image processing technologies were also used to detect and analyze health conditions, which can be adapted to monitor their psychophysiological state. The use of specialized robots will allow performing routine tasks, collecting data, and providing support. However, it is difficult to imagine how robots, which require stable surfaces in rooms, can be used to support watchkeeping.

Joint approaches to solving the problem are described in the article [14], which involve the use of intelligent agents. This can be used to monitor the psychophysiological state of the crew, collecting data in real time and adapting working conditions according to the collected information. Additionally, the development of intelligent rules or algorithms that automatically adapt watch schedules based on the current state of the crew is of interest, similar to minimizing errors in GSM networks as mentioned in the article.

In the study [15], the focus is on optimizing the monitoring of logistics systems using the FIFO (First-In First-Out) method with the application of intelligent systems. Key aspects that can be adapted to development include real-time data collection and analysis, which can be applied to monitor crew conditions. Additionally, adapting FIFO for crew shift planning, taking into account their physiological state and needs, is of interest. However, potential difficulties in integrating intelligent monitoring systems into existing maritime operational systems must be considered due to differences in technologies and interfaces. The proposed technology also requires laboratory testing in stormy weather to ensure the accuracy of data collection and analysis quality.

A new approach to patient monitoring [16] uses hybrid adaptive machine learning methods, elements of which can be applied in the research. In particular, the use of convolutional neural networks (CNN) can be employed for automatic detection of important features in large datasets, and support vector machines (SVM) can ensure reliable classification in complex informational spaces. However, optimizing parameters in such complex models can be challenging, considering their integration into a real ship. Additionally, many factors and variables must be taken into account, which can complicate the process of model tuning and testing, considering the computational limitations on a ship.

The problem of feedback with navigators as watch members can be partially solved using the approaches described in the article [17]. This work uses chat dialogue subsystems adapted for integrated crew condition monitoring, where the system can conduct dialogues to collect information, for example, about the psychophysiological state of the members of the watch. Task-oriented multi-turn dialogue modules can also be used for analysis and adaptive watch planning, where the system recognizes the intentions and needs of the crew and accordingly adapts the work schedule. The application of Seq2Seq (Sequence-to-Sequence) models and task-oriented multi-turn dialogue modules may be useful for developing warning systems and automated interventions of the captain, where a quick response to requests or critical watch conditions is expected. However, there may be challenges in ensuring the accuracy and reliability of data interpretation, as automated data interpretation from navigators can be complicated due to the ambiguity of statements or unpredictability of their psychophysiological states.

For visualization, the application of media in intelligent service systems, which include personalization and multimodal interactions [18], can significantly improve the monitoring and management processes of navigators' watchkeeping, ensuring more accurate perception and response to the crew's psychophysiological state.

In the article [19], robotic monitoring systems are also used, which can be adapted to collect data on the psychophysiological state of navigators, providing the opportunity for more accurate and continuous monitoring through digital pulse signal processing and data filtering. The usage of machine learning algorithms for data analysis, including the development of predictive models for early detection of changes in the watch crew's condition, can also be effective. However, there is a difficulty in integrating these systems with existing ship safety management systems to create a comprehensive system that takes into account both technical and human aspects.

Reliable data transmission is also important, considering the confined spaces of merchant fleet ship rooms. In the work [20], the use of Data Distribution Service (DDS) technology is proposed, which can ensure reliable and flexible data exchange in a distributed system. This technology can be adapted for monitoring and managing watchkeeping on board of the ships. DDS can provide efficient data exchange between system components, and digital twins can be used for modeling and analyzing navigators' psychophysiological state.

In turn, there is a need for the use of mobile devices to identify the physiological data of navigators. In the study [21], a CNN-LSTM model, which is a combination of convolutional neural networks (CNN) and long short-term memory (LSTM), is used for ECG signal classification. This model is integrated into the STM32F429 microcontroller for real-time ECG signal identification at the network edge. Such an approach can be used for monitoring and analyzing the psychophysiological state of navigators.

Beyond data processing within a single ship, it is extremely important to have the capability of modern intelligent networks in the macrostructure, analyzing the conditions of ship navigators within a specific water area who are interacting, i.e., involved in a common maneuvering scheme. In this case, scaling the computer network using intelligent means [22] is appropriate, allowing for: adapting network parameters; optimizing router settings; detecting trends and anomalies in the network; automatically detecting and correcting errors; managing virtual networks and services; adjusting traffic using SDN (Software-Defined Networking), etc.

One of the important aspects is the analysis of behavior, movements, and reactions of watch team members, which would allow determining the level of fatigue and reaction speed in

emergency situations, conducting an analysis of the logicity and systematization of navigators' actions. The work [23] discusses the application of intelligent systems for such tasks as: implementing synchronous video recording for rapid detection of potential dangers; monitoring internal traffic in real-time; developing a geographical spatial model for efficient query and modeling of transport situations, etc.

The analysis of modern research highlights the importance of integrating contemporary technological approaches for comprehensive monitoring and intelligent management of watchkeeping on board of the ships. Particularly effective are the applications of systems from other fields of knowledge, such as medical monitoring and intelligent transport systems, which include data collection and analysis, process optimization, and adaptation of working conditions depending on the crew's state. Machine learning methods, algorithms, and Internet of Things technologies can play a key role in improving navigational safety, reducing the impact of the human factor, and enhancing the efficiency of monitoring and managing navigational watchkeeping on ships.

The described problem requires comprehensive automated monitoring and intelligent management of watchkeeping time, capable of adapting to the psychophysiological state of navigators, to reduce the impact of the human factor on navigational safety.

Research Purpose and Objectives. The purpose of the research is to develop an automated method for diagnosing navigator's states of fatigue to manage the composition of the navigational watch using an intelligent safety module.

To ensure effectiveness and achieve the research goal, it is necessary to accomplish the following tasks:

1. Develop and implement methods for controlling and analyzing the psychophysiological parameters of navigation officers. To do this, long-term monitoring of the psychophysiological parameters of officers during their duties and rest periods should be conducted using Student's t-test, time series analysis methods, regression methods, and dynamic research methods. The experiments should involve navigation officers who have undergone a medical professional examination.

2. Analyze the sleep and wakefulness parameters of officers using regression analysis. This requires analyzing the deep sleep time and the total wakefulness time of navigation officers. Regression analysis should be used to establish relationships between these parameters, determining the impact of increased deep sleep time on reducing wakefulness time.

3. Investigate the impact of circadian rhythm on the physiological indicators of officers using time series. This involves analyzing the impact of circadian rhythm on the cardiovascular system indicators of officers, constructing time series, and analyzing them as multiplicative and additive models to understand the dynamics of physiological changes. It is important to establish how circadian rhythm and time spent on the ship affect the navigator's condition.

4. Identify factors of cumulative fatigue and develop methods to prevent hazardous situations. This involves conducting multiple regression calculations to identify the impact of cumulative fatigue on the state of navigators, constructing planes of rest and wakefulness states to identify dangerous conditions such as drowsiness or excessive excitement. Methods should be developed to control the quality and quantity of sleep for officers to improve their ability to perform duties and reduce the risk of accidents.

Solving these tasks will ensure:

1. Integrated crew condition monitoring: Using biometric sensors for continuous monitoring of the physiological indicators of navigators, such as blood oxygen level, heart rate, body temperature, and sleep patterns, for early detection of signs of fatigue and stress.

2. Psychophysiological state analysis: Implementing machine learning algorithms to analyze collected data and assess the degree of fatigue, stress, and overall psychophysiological state of crew members.

3. Adaptive watch planning: Developing algorithms that automatically adjust watch schedules and rest periods based on crew condition data, ensuring an optimal balance of workload and rest.

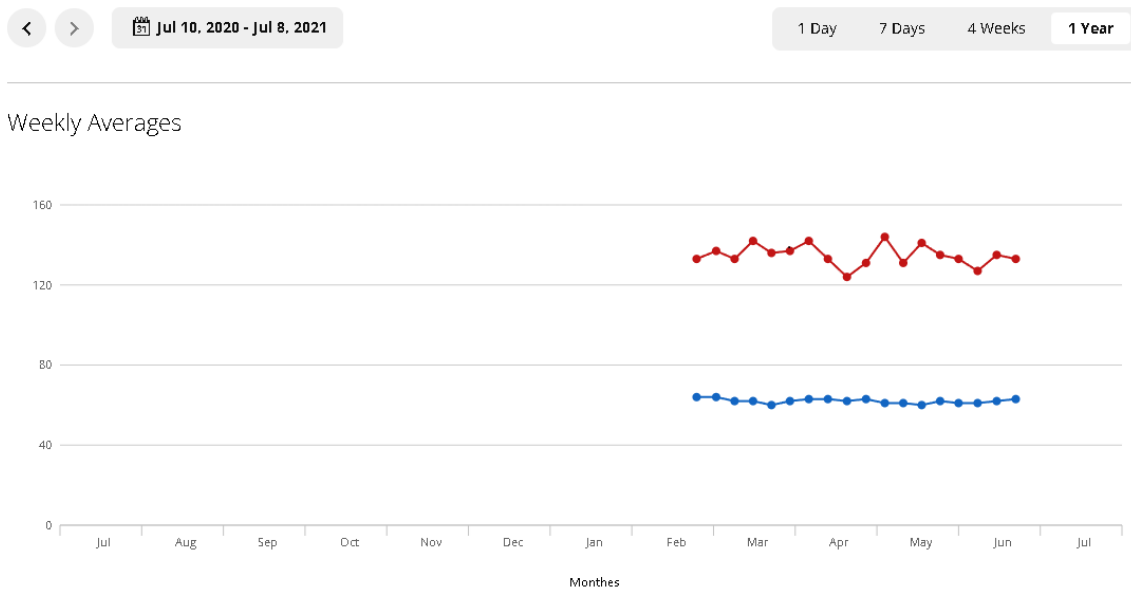
4. Warning and automated intervention system: Implementing a system that can intervene in case of a critical decrease in the navigator's performance, for example, by automatically switching to auxiliary control systems or sending an alarm signal to other crew members or the control center.

5. Ergonomic solutions development: Improving the ergonomics of workplaces based on collected data to minimize physical and psychological strain on navigators.

Thus, this research is indeed relevant and requires solutions through intelligent systems and automation.

Primary Research Material. Considering the research goal and tasks, we will conduct a detailed analysis and a series of necessary studies in real-time during the ship's movement and watchkeeping by the navigator team.

From 2020 to 2023, a number of experiments were conducted on board of the merchant ships in real time to monitor the long-term control and monitoring of the psychophysiological parameters of navigational officers during their duties and during time of rest, followed by analysis of these data. GARMIN Vivo Active 3 and Fossil Gen6 sports smartwatches, BEURER BC58 portable tonometer, BEURER PO80 pulse oximeter, and Xintai HT-101 portable infrared camera for remote body temperature measurements were used. The patented GARMIN time system, which includes a heart rate variability sensor and an accelerometer, allows to detect the time of falling asleep, the time of waking up and the stage of sleep in which the respondent is in. The total number of observations was 397 days, the observation time for one respondent ranged from 36 to 92 days. The experiments involved 3 senior officers, 2 second officers, 1 third officer and 1 captain. All were conditionally healthy according to the results of medical professional examinations. They were aged 32 to 39 years old [Figure. 2] [Figure. 3]. For the analysis, the statistical method of Student's t-test, time series methods, regression methods, and dynamic research methods were used. The following parameters were analyzed: time of deep sleep, total arousal time (the time when the heart rate, as the best indicator of arousal, was above normal), dependence of arousal time on deep sleep. Unfortunately, today there are no methods that would allow to stimulate the deep sleep phase, and in shipboard conditions external negative factors affect the body so much that the body rarely enters this phase naturally. Therefore, only days when this sleep phase was present at least minimally were chosen for the regression study [Figure. 4].



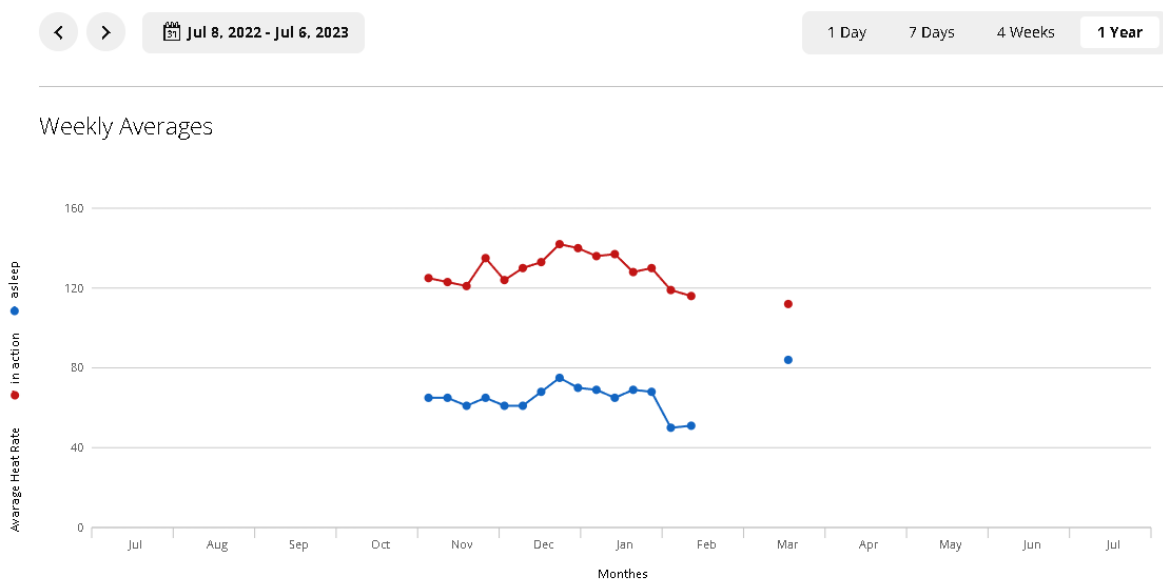
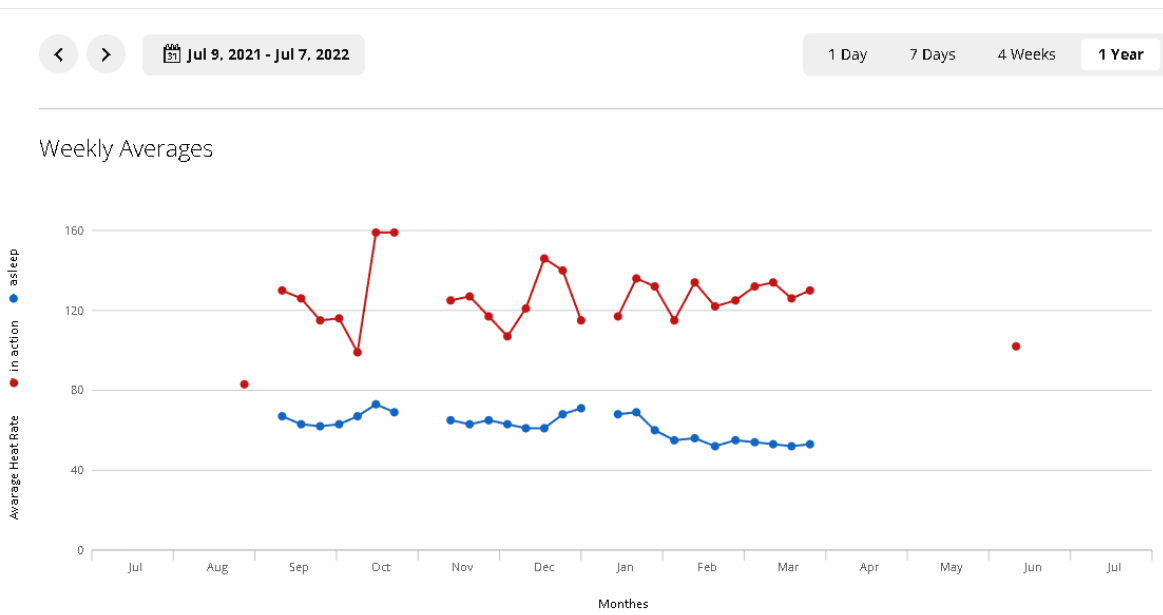
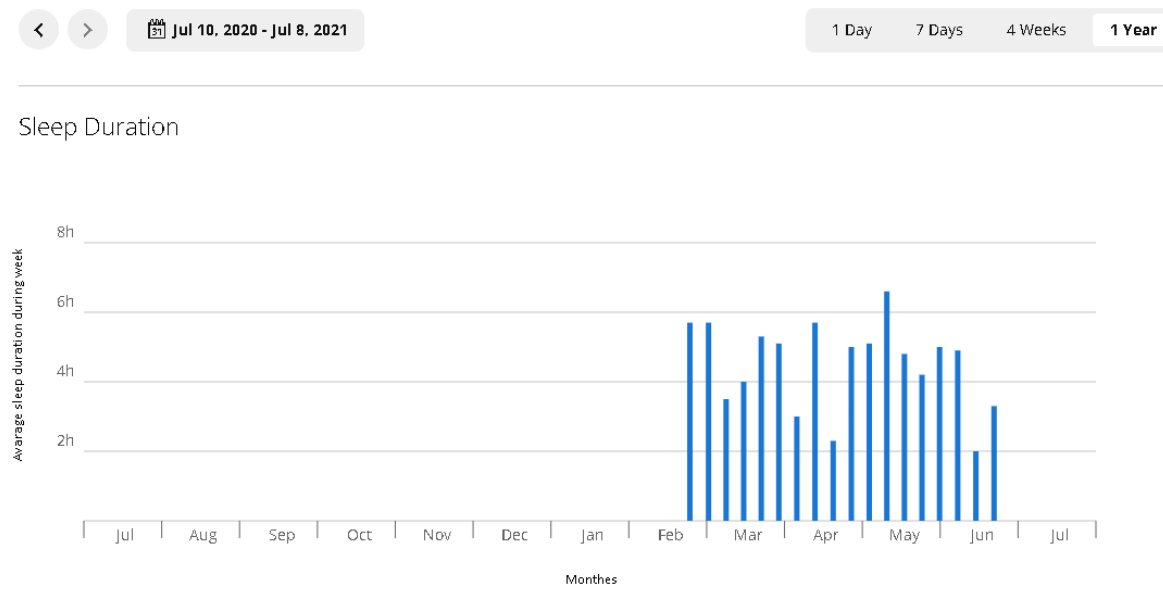


Figure 2 – Weekly average heat rate during the year



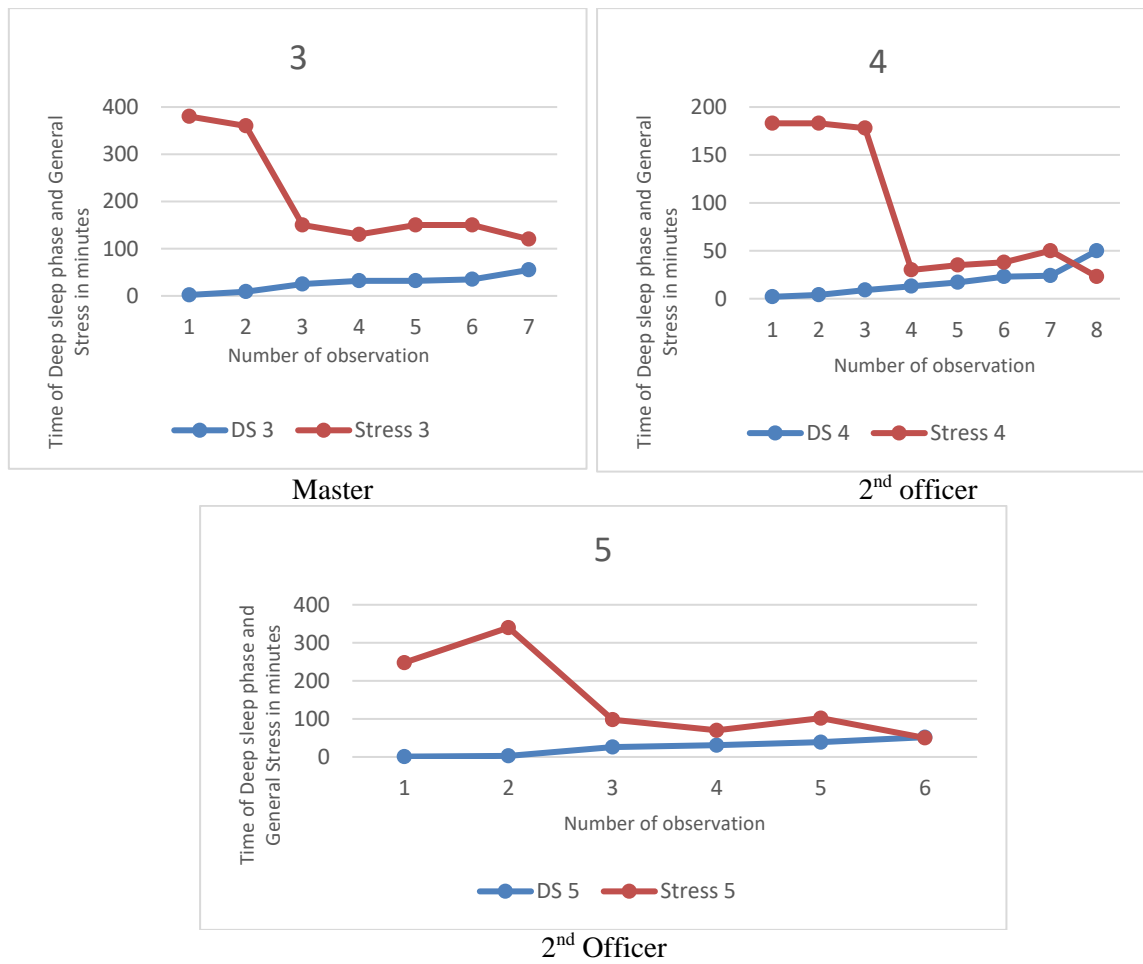


Figure 4 – Graphs of the dependency of wakefulness time on deep sleep time

What can be seen from the graphs immediately, without additional analysis, is that as longer the deep sleep time, as less the body perceives situations as stressful.

To understand the difference between the deep sleep graphs, we will apply Student's t-test. Given that the sample sizes vary significantly, a more complex and accurate formula was chosen [24]:

$$t = \frac{|M_1 - M_2|}{\sqrt{\frac{(N_1 - 1)\sigma_1^2 + (N_2 - 1)\sigma_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \left(\frac{1}{N_1} + \frac{1}{N_2} \right)}} \quad (1)$$

Where M_1 and M_2 are the sample means, N_1 and N_2 are the sample sizes, σ_1 and σ_2 are the standard deviations.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (2)$$

Where N - is the sample size, x_i – is the value of each indicator in the sample, and, μ – is the sample mean.

The calculation of degrees of freedom for entering the tables is calculated by the formula:

$$df = N_1 + N_2 - 2 \quad (3)$$

In our case, the criterion values for each pair ranged from 0.9 to 1.3, which is within the non-significance zone. Therefore, the hypothesis that the values differ is not supported, which in turn may confirm that deep sleep has the same positive effect on all people.

Regression analysis is a statistical analytical method used to calculate the relationships between a dependent variable and one or more independent variables.

For assessing dependencies, a power regression equation was chosen, which has the form [25]:

$$y = a \cdot x^b \tag{4}$$

For linearization, we chose logarithmic linearization with base 10.

The regression equation (constructed from sample data) will have the form:

$$y = a \cdot x^b + \varepsilon \tag{5}$$

Where ε_i – are the observed values (estimates) of errors ε , and b_i are the estimates of the parameters α and β of the regression model, which need to be found.

The deviations ε_i for each specific observation i – i are random, and their values in the sample are unknown, so only x_i and y_i the estimates of the parameters α and β of the regression model, which are respectively a and b can be obtained from the observations, and these estimates have a random nature since they correspond to a random sample.

After linearization, we obtain the following: $\ln(y) = \ln(a) + b \cdot \ln(x)$.

To estimate the parameters α and β – we use the least squares method, which provides the best estimates of the regression equation parameters. Formally, it can be written as:

$$S = \sum (y_i - y \cdot i)^2 \rightarrow \min \tag{6}$$

And the system of normal equations will have the form:

$$a - n + b - \sum x = \sum y - x \tag{7}$$

For the calculations, we constructed Table 1:

Table 1 – Calculation table of parameters for the least squares method (LSM)

$\ln(x)$	$\ln(y)$	$\ln(x)^2$	$\ln(y)^2$	$\ln(x) \cdot \ln(y)$
$\ln(x_1)$	$\ln(y_1)$	$\ln(x_1)^2$	$\ln(y_1)^2$	$\ln(x_1) \cdot \ln(y_1)$
$\ln(x_n)$	$\ln(y_n)$	$\ln(x_n)^2$	$\ln(y_n)^2$	$\ln(x_n) \cdot \ln(y_n)$

Equate equation (1) to equation (2) for the indicator a by multiplying it by the coefficient $-\sum \frac{x}{n}$ and solving the system of equations, we get the coefficient b , after substituting it into the first equation, we get the value of the coefficient a . The empirical equation will have the form

$$y = 10^a \cdot x^b \tag{8}$$

Calculate the parameters of the regression equation for each sample:

1) Sample means

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}, \bar{xy} = \frac{\sum x_i y_i}{n} \tag{9}$$

2) Selective variances

$$S(x)^2 = \frac{\sum x_i^2}{n} - \bar{x}^2, S(y)^2 = \frac{\sum y_i^2}{n} - \bar{y}^2 \tag{10}$$

3) Standard deviation

$$S(x) = \sqrt{S^2(x)}, S(y) = \sqrt{S^2(y)} \tag{11}$$

Now the correlation coefficient b can be calculated by the formula:

$$b = \frac{\bar{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{s_x^2}, \tag{12}$$

and the coefficient a accordingly:

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \tag{13}$$

To understand how much the value of the resultant feature changes on average by a part of its standard deviation when the factor feature changes by the amount of its standard deviation while keeping the values of the other independent variables constant, we calculate the coefficient β_j by the formula:

$$\beta_j = b_j \cdot \frac{S_{(x)}}{S_{(y)}} \quad (14)$$

We will assess the quality of the equation by calculating the approximation error using the following formula:

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|y_i - y_x|}{y_i}}{n} \cdot 100\% \quad (15)$$

The results are shown in Calculation Table 1.

To understand how close the relationship between the considered features is and how reliable the regression equation is, we calculate the value of the correlation index R. The boundaries of this index range from 0 to 1, and the closer to one, the stronger the relationship:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum (y_i - y_x)^2}{\sum (y_i - y)^2}} \quad (16)$$

In our case, the factor x significantly affects y (see Calculation Table 2).

Unlike the linear correlation coefficient, R characterizes the tightness of the nonlinear relationship and does not characterize its direction. This coefficient is universal as it reflects the tightness of the relationship and the accuracy of the model and can be used for any form of variable relationship.

The statistical measure of agreement, which can determine how well the linear regression model fits the data on which it is built, is the coefficient of determination R^2 .

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - y_x)^2}{\sum (y_i - y)^2} \quad (17)$$

In our case, the criterion accuracy ranges from 0.73 to 0.98 for all cases, high in all cases (see Calculation Table 2).

The coefficient of determination R^2 is also used to test the significance of the nonlinear regression equation in general using the Fisher F-criterion, the calculated value of which is found as the ratio of the variance of the original series of observations of the studied indicator and the unbiased estimate of the variance of the residual sequence for this model.

The statistical significance assessment of the paired linear regression is conducted according to the following algorithm: The null hypothesis is put forward that the equation is generally statistically insignificant: $H_0: R^2 = 0$ at the significance level α . Then the actual value of the Fisher criterion is determined by the formula:

$$F = \frac{R^2}{1 - R^2} \cdot \frac{n - m - 1}{m} \quad (18)$$

Where m – is the number of factors in the model

If the calculated value with $k_1 = (m)$, $k_2 = (n - m - 1)$, degrees of freedom is greater than the tabular value for a given level of significance, the model is considered significant.

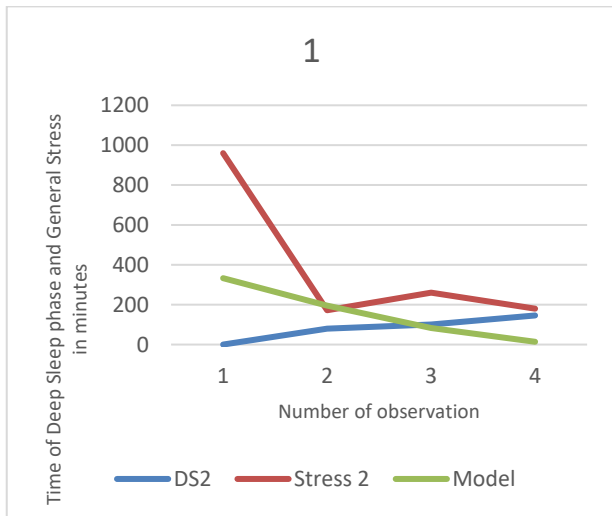
Table 2 – Estimated coefficients of the regression equation

No	a	b	x	y	xy	S(x)^2	S(y)^2	S(x)	S(y)	β	A	R	R^2	F
1	2,503	-0,0915	1,263	2,387	2,971	0,47	0,00403	0,687	0,0635	-0,99	0,34%	0,99	0,98	48,121
2	6,905	-2,3022	2,141	1,967	4,117	0,0496	0,32	0,223	0,568	-0,903	12,44%	0,903	0,8155	8,84
3	2,537	-0,4117	1,115	2,078	2,148	0,41	0,086	0,642	0,239	-0,901	5,60%	0,901	0,811	17,164
4	2,77	-0,3945	1,278	2,262	2,813	0,21	0,0379	0,45	0,195	-0,927	2,13%	0,927	0,858	30,314
5	2,6	-0,7363	1,08	1,805	1,818	0,18	0,13	0,422	0,362	-0,858	8,06%	0,858	0,736	16,754

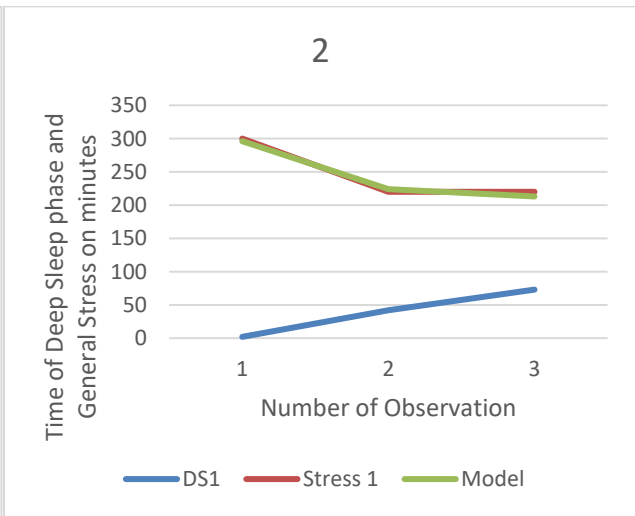
The coefficients a and b and the values of x from the experimental data were substituted into the obtained formula, and the following data were obtained, on the basis of which graphs were constructed. These graphs also clearly show the adequacy of the model, especially with the increase in sleep quality (Figure 5) (Table 3).

Table 3 – Linearized dependencies of wakefulness time on deep sleep time

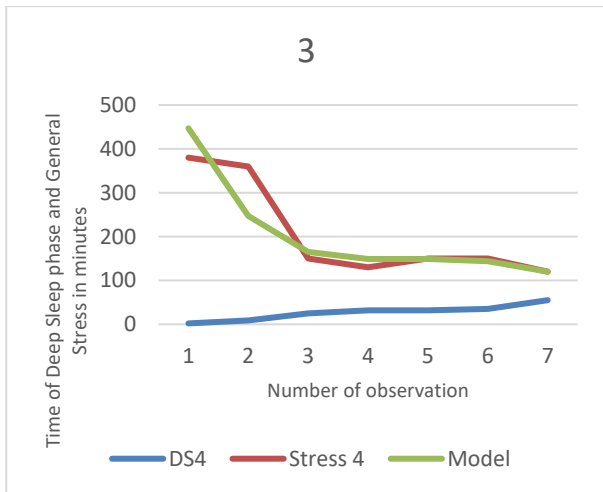
Model1	296	224	213					
Model2	333	195	83	14				
Model3	346	220	91	84	77	68		
Model4	447	247	165	149	149	144	120	
Model5	238	142	78	59	48	39	37	22



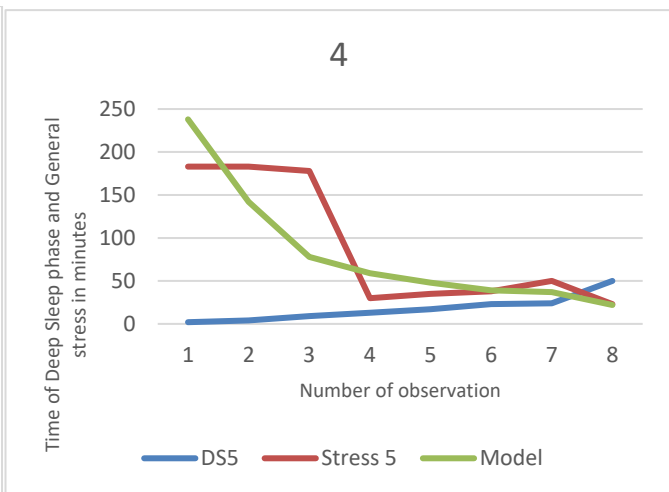
Ch. Officer



Ch. Officer



Master



2nd Officer

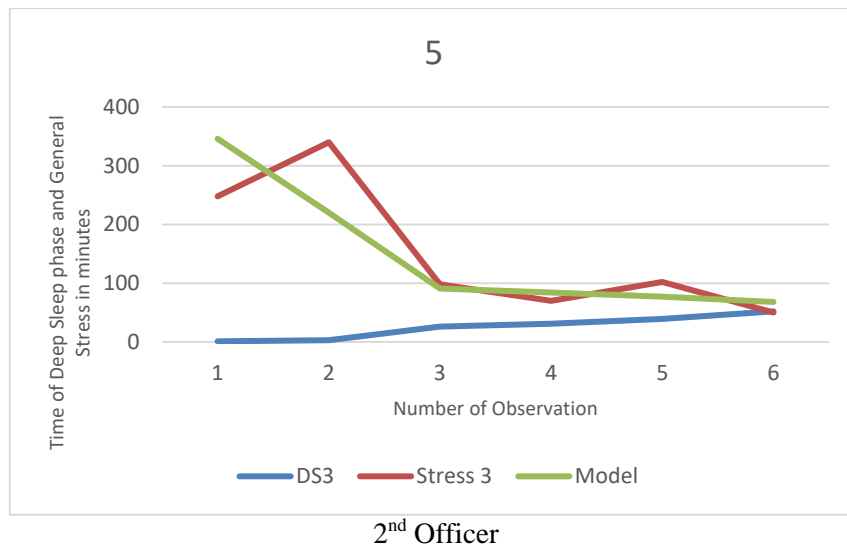


Figure 5 – Graph of the linearized model of the dependency of wakefulness time on deep sleep time

The dependencies of Y on X (the dependency of human wakefulness on deep sleep) were studied. At the specification stage, a paired power regression was chosen, linearized by a logarithm with base 10, and its parameters were estimated using the least squares method (8).

The statistical significance of the equation was tested using the coefficient of determination and the Fisher criterion. It was found that in the studied situations, from 73.63% to 98% of the total variability of Y is explained by the change in X . It was also found that the model parameters are statistically significant. The interpretation of the model parameters is that an increase in deep sleep time by 1% leads to a decrease in wakefulness time on average from 0.736% to 0.98%.

The approximation error values from 0.34% to 12.44% indicate satisfactory quality of the found model. The Fisher criterion value confirms the statistical significance of the model.

Thus, considering all the above, this model allows for fairly accurate calculation of the minimum necessary quality sleep indicator before starting a watch for a navigation officer.

Also, during the experiment, the average total sleep time of navigators during the experiment period who working on the 8hours rest 4hours watch schedule as the most acceptable for work was measured using smartwatches with a patented sleep monitoring system The average sleep time was from 4.5 to 6 hours.

According to the MLC 2006 and IMO Guidance of Fatigue, normal sleep should be at least 8 hours and should include a deep sleep stage of 30% of the total time. And according to the experiments conducted by various researchers, partial sleep deprivation disrupts the normal functioning of all psychophysiological systems of the body, including memory. Complete wakefulness for 10 days can cause of death [18].

Today, most of the methods of identification of the fatigue and sleep deprivation are the questionnaires, such as the Karolinska Sleepness Scale or Fatigue Assessment Scale based on subjective assessments of their condition by respondents. During our experiments, we did not find any significant correlation between the actual sleep time and the respondent's assessment. Thus, the navigation assistant could report feeling normal after 3 hours of sleep, and at the same time could report a very strong feeling of fatigue after 12 hours of a good quality sleep, which in turn once again confirms that the brain is not able to perceive the body's state adequately, and therefore it is necessary to develop new methods for monitoring and evaluating states

Conclusion. Thus, during the study, an automated method for detecting dangerous factors of fatigue based on sleep indicators was developed and successfully tested During the experiments, a relationship between the quantitative phase of deep sleep and the impact of the perception of negative factors was found. Today, sleep is the one factor that can compensate for these effects, and this relationship makes it possible to calculate its required quantity and quality after exposure to these factors and already understand whether the assistant is able to perform his duties

The analysis, which included statistical analysis, regression methods and dynamic studies, showed that the developed system significantly reduces the risk of fatigue-related errors and increases the safety of navigation. The practical significance of the study is to develop a system that ensures timely detection of dangerous conditions of navigators, reduces the risk of accidents and increases overall safety of navigation. It is expected that the implementation of this system will reduce the impact of the human factor on safety of navigation by 18–28% and increase the efficiency of ship management. In addition, the system will save fuel and energy on board the vessel by optimizing the time spent on the voyage.

Prospects for further research. Prospects for further research include the improvement of the developed method and monitoring system for navigator fatigue by increasing the accuracy and reliability of physiological data analysis algorithms, using advanced machine learning methods and hybrid models. Integrating the system with existing ship navigation systems will ensure a comprehensive approach to navigation safety, including automated data transmission and real-time route adjustments. Further expansion of the system's functionality will include the development of modules for adaptive watch planning and automatic work schedule adjustments based on navigators' conditions, promoting optimal load distribution on the crew and reducing the risk of fatigue. Implementing the system in real ship operation conditions will provide additional data for further analysis and improvement of monitoring methods. Overall, further research aims to increase the effectiveness and reliability of the monitoring system, ensuring improved navigation safety and reduced risk of accidents at sea.

REFERENCES

1. EMSA Annual Overview of Marine Casualties and Incidents (2023).
2. Zhang, Daiyong & Chu, Xiumin & Liu, Chenguang & He, Zhibo & Zhang, Pulin & Wu, Wenxiang (2024). A Review on Motion Prediction for Intelligent Ship Navigation. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 107. 10.3390/jmse12010107.
3. Guo, Jian & Guo, Hua (2023). Real-Time Risk Detection Method and Protection Strategy for Intelligent Ship Network Security Based on Cloud Computing. *Symmetry*. 15. 988. 10.3390/sym15050988.
4. Nosov, P., Zinchenko, S., Ben, A., Prokopchuk, Y., Mamenko, P., Popovych, I., Moiseienko, V., Kruglyj, D. (2021). Navigation safety control system development through navigator action prediction by Data mining means. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2 (9 (110)), 55–68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229237>.
5. Nosov, P., Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Y., Gritsuk, I., Sokol, I., Kyrychenko, K. (2023). Devising an approach to safety management of vessel control through the identification of navigator's state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (3 (124)), 19–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286156>.
6. Чала Ю. М., Шахрайчук А. М. (2018). Психодіагностика: навчальний посібник / Ю. М. Чала, А. М. Шахрайчук. Харків: НТУ «ХПІ».
7. Ma, Xiaoxue & Shen, Jun & Liu, Yang & Qiao, Weiliang (2020). A Methodology to Evaluate the Effectiveness of Intelligent Ship Navigational Information Monitoring System. *IEEE Access*. 8. 10.1109/ACCESS.2020.3032543.
8. Психологія стресу та стресових розладів (2023): навч. посіб. / П86 Уклад. О. Ю. Овчаренко. К.: Університет «Україна». 266 с. ISBN 978-966-388-665-7.
9. HANDBOOK OF PSYCHOPHYSIOLOGY/John T. Cacioppo University of Chicago Louis G. Tassinary TexasA&M University Gary G. Berntson/ Cambridge University Press 2007.
10. Solovey, O., Ben, A., Dudchenko, S., Nosov, P. (2020). Development of control model for loading operations on Heavy Lift vessels based on inverse algorithm. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5/2 (107), 48–56. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.214856>.
11. IMO GUIDANCE ON FATIGUE MITIGATION AND MANAGEMENT 12 June 2001.
12. The Sleep Solution WHY YOUR SLEEP IS BROKEN AND HOW TO FIX IT By W. CHRIS WINTER, M.D. 4 April 2017, Penguin Random House.

13. Xinyi, Wang (2024). The applications and prospects of intelligent services robots in medicine. *Applied and Computational Engineering*. 35. 104–109. 10.54254/2755-2721/35/20230375.
14. Amana, Anthony & Ngang Basse Ph.D., Engr.Dr.Ngang (2021). Intelligent agent based-Real time monitoring and Evaluation of GSM quality of service. *Journal of Information & Knowledge Management*. 11. 35–49. 10.7176/IKM/11-4-05.
15. Ibrahim, & Syahputra, Hindra & Sugito, Bambang & Iqbal, Muhammad & Wijaya, Rian (2023). Optimizing Logistics System Monitoring with FIFO Method Using Intelligent System. *International Journal Of Computer Sciences and Mathematics Engineering*. 2. 276–280. 10.61306/ijecom.v2i2.53.
16. Dohare, Sushil & K, Deeba & Pamulaparthu, Laxmi & Abdufattokhov, Shokhjakhon & Venkata, Janjhyam & Ramesh, Janjhyam & El-Ebiary, Yousef & Thenmozhi, E. (2024). Enhancing Diabetes Management: A Hybrid Adaptive Machine Learning Approach for Intelligent Patient Monitoring in e-Health Systems. 10.14569/IJACSA.2024.0150162.
17. Wu, Zhong & She, Qiping & Zhou, Chuan (2024). Intelligent Customer Service System Optimization Based on Artificial Intelligence. *Journal of Organizational and End User Computing*. 36. 1–27. 10.4018/JOEUC.336923.
18. Zhang, Xinwei (2023). Innovative Applications of Image Media and Intelligent Service Systems. *Scientific and Social Research*. 5. 22–29. 10.26689/ssr.v5i12.5772.
19. Wang, Yanli (2022). Engineering Safety Management System Based on Robot Intelligent Monitoring. *Advances in Multimedia*. 1–10. 10.1155/2022/8940678.
20. Lin, Chin-Te & Lu, Hong-Ji (2024). An Intelligent Product-Driven Manufacturing System Using Data Distribution Service. *IEEE Access*. PP. 1–1. 10.1109/ACCESS.2024.3359228.
21. Zhao, Yixin & Liu, Yanzhong & Zhou, Haiyang & Wei, Yuxuan & Yu, Yansuo & Lu, Sichao & An, Xiang & Liu, Qiang (2023). Intelligent Gateway Based Human Cardiopulmonary Health Monitoring System. *Journal of Sensors*. 1–16. 10.1155/2023/3534224.
22. Holub, Halyna & Voronko, Iryna & Azizov, Borys & Chernenko, Vitalii & Moseichuk, Mykola & Ishchenko, Vitalii (2023). Analytical aspects of application of intelligent methods of management of computer systems in transport infrastructure projects. *Technology audit and production reserves*. 3. 25–29. 10.15587/2706-5448.2023.284578.
23. Zhao, Huadong & Sun, Shaoming (2023). Research on the Application of Intelligent Transportation System in Transportation Management. *Academic Journal of Science and Technology*. 4. 1–4. 10.54097/ajst.v4i2.3865.
24. Економетрія (2012). Ч. 1: навч. посібник / О. Волошин, Н. Галайко. Львів: Львівський державний університет внутрішніх справ. 192 с.
25. Економетрика (2015): навчальний посібник для студентів напряму підготовки "Економічна кібернетика" всіх форм навчання / Л. С. Гур'янова, Т. С. Клебанова, О. А. Сергієнко, С. В. Прокопович. Х. : ХНЕУ ім. С. Кузнеця. 384 с.

Корецький О. А., Носов П. С., Зінченко С. М., Погорлецький Д. С. МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ФАКТОРІВ ВТОМИ У НАВІГАТОРІВ НА ОСНОВІ ПОКАЗНИКІВ СНУ

Проблема втоми серед навігаторів під час виконання їх обов'язків становить значний ризик для безпеки мореплавства, причому людський фактор є основною причиною морських аварій. Метою цього дослідження є розробка та тестування автоматизованого методу виявлення небезпечних факторів втоми у навігаторів на основі показників сну. Це дослідження вирішує проблему точної діагностики втоми, яка часто недооцінюється або неправильно інтерпретується самими навігаторами. Дослідження включало довгостроковий моніторинг психофізіологічного стану навігаторів під час виконання своїх обов'язків та періодів відпочинку на судах: "Олександр" ІМО 9433353, "Brigitte M" ІМО 9155913 та "LONGWOOD" ІМО 9504138. У дослідженні використовувалися різні статистичні та динамічні методи аналізу, зокрема регресійний аналіз, аналіз часових рядів та критерій Стьюдента.

Експерименти показали значний зв'язок між тривалістю глибокого сну та зменшенням періодів неспання, що свідчить про те, що триваліші періоди глибокого сну зменшують вплив втоми. Було встановлено, що збільшення часу глибокого сну на 1% призводить до зменшення часу неспання в середньому на 0,736% до 0,98%. Коефіцієнт кореляції між тривалістю глибокого сну та рівнем стресу

склав від 0,73 до 0,98, що підтверджує високий ступінь зв'язку. Значення похибки апроксимації становило від 0,34% до 12,44%, що свідчить про задовільну якість моделі.

Розроблена автоматизована система для виявлення втоми показала перспективні результати у підвищенні безпеки навігації, забезпечуючи аналіз у реальному часі та адаптивне планування вахт на основі стану екіпажу. Система здатна автоматично коригувати графіки вахт та періодів відпочинку, забезпечуючи оптимальний баланс між робочим навантаженням та відпочинком.

Практична значущість системи полягає у її потенціалі знизити вплив людського фактора на безпеку мореплавства на 18–28% та оптимізувати час плавання, сприяючи економії палива та енергії.

Система також може автоматично втручатися у випадку критичного зниження продуктивності навігатора, наприклад, шляхом автоматичного переключення на допоміжні системи управління (автопілот) або надсилання сигналу тривоги іншим членам екіпажу або до центру управління.

Теоретичне значення отриманих результатів полягає у експериментальному доведенні ефективності використання показників сну для моніторингу та аналізу стану втоми навігаторів у реальному часі.

Практичне значення результатів полягає у розробці системи, яка забезпечує своєчасне виявлення небезпечних станів навігаторів, знижує ризик аварій та підвищує загальну безпеку навігації.

Ключові слова: автоматизація виявлення втоми; показники сну; безпека мореплавства; психофізіологічний моніторинг; автоматизована система управління; метод.

© Koretsky O., Nosov P., Zinchenko S., Pohorletskyi D.

Статтю прийнято до редакції 14.06.2024

UDC 004.58:004.8

METHOD OF DECISION SUPPORT FOR NAVIGATORS FOR AUTOMATED CONTROL OF VESSEL TRAFFIC SAFETY BASED ON ECDIS DATA

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

Objective of the research is to develop a method for integrating automated decision support tools for navigator on the bridge of a sea vessel, considering the factors of uncertainty in the completeness of ECDIS data.

The primary problem of the research addressed is the need for accurate and efficient Decision Support Systems (DSS) that account for uncertainties in electronic navigational data.

Research Methodology involves the development of automated modules: an OCR processing module for ECDIS images using the Tesseract library, a module for comparing textual and geolocation data from ECDIS screenshots using text comparison algorithms and geolocation calculations (Haversine formula), a geographic data visualization module on an interactive map using the Folium library, and a decision support module for navigators that includes analyzing of navigational data, determining their similarity, and providing recommendations.

Research results demonstrate that the developed DSS significantly enhances navigation safety, reduces travel time by 7% to 18%, and saves fuel, lubricants, and electricity. It increases the accuracy and efficiency of navigation by automating OCR processing (capturing ECDIS screenshots in real-time, preprocessing images to enhance OCR accuracy, extracting text, and saving it to files), text and geolocation data comparison (analyzing information and geographic data to determine their similarity, loading data from files, and calculating similarity), and data visualization on an interactive map (creating maps with markers and routes based on geographic data).

Practical significance of the research lies in improving navigational decision-making processes, reducing navigator workload, enhancing situational awareness, and minimizing collision risks in maritime navigation. The DSS automates critical aspects of navigation operations, reducing the likelihood of human errors.

Prospects for further research include improving data integration methods to enhance the accuracy and reliability of the DSS. Future work will benefit from the use of artificial neural networks to obtain better approximations. An important aspect of DSS development is identifying navigator qualification parameters to ensure logical conclusions regarding their actions and prevent undesirable consequences. Further research is necessary to expand and verify the effectiveness of the DSS in real maritime navigation conditions, which will improve algorithms for analyzing large volumes of data and integrating artificial intelligence to provide more adaptive and autonomous solutions.

Bibliography: 23, figures 11.

Key words: ECDIS; automation; risk; uncertainty; automated control systems; intelligent systems; human factor; maritime safety; qualification parameters; identification.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.022-040

Introduction. Keeping watch in adverse conditions increases the demands on navigators, their qualifications, experience, and speed of making rational decisions [1]. Considering that in complex situations where the full spectrum of navigation parameters is uncertain, the navigator has terminal limitations for forming a comprehensive real-time picture of the situation [2]. In some cases, enhancing safety can be assisted by autopilots, pilots, or tugs, but ultimately only the captain is responsible for the safety of navigation [3]. The reduction in the number of watch team members, combined with an increase in the number of navigational information systems, overloads navigators in the waters of seaports, canals, etc. [4]. Additionally, the intensity of traffic and the need to comply with COLREG rules compel captains to choose decision-making strategies very closely and carefully, which, in conditions of limited experience despite qualifications, can lead to non-standard and even critical situations [5]. All of this necessitates new informational approaches in the development of decision support technologies that narrow the navigator's focus on key aspects, processing a significant flow of information in real-time.

For the creation of decision support systems (DSS) for navigators, the application of big data and analytics for ship identification and collision risk analysis using deep reinforcement learning is considered, which allows for route optimization and enhances navigation safety. A separate direction is the use of artificial intelligence, automated systems, and fully autonomous robots to

improve port logistics and cargo transportation, promoting efficiency and reducing human intervention [6].

Thus, the development of specialized DSS in navigation systems will not only improve the accuracy of forecasts but also provide additional levels of control and support. Such systems will help analyze large volumes of data in real-time, assisting the captain in making more informed decisions while managing the ship's movement.

Problem Statement. Given the above, the development of a navigator decision support system (DSS) under conditions of partial uncertainty directs research into the following scientific directions:

1. Reducing the workload on navigators. With the increasing volume of information coming from navigation systems, navigators often face overload, which can lead to errors. It is important to develop systems that will effectively filter and prioritize information, displaying only the most critical data to the navigators.

2. Improving situational awareness. In complex navigational conditions, especially in narrow channels and ports, navigators may not have a complete picture of the situation. It is important to implement technologies that will help create a comprehensive and accurate picture of the navigational situation.

3. Minimizing collision risks. Despite the introduction of new technologies, the risk of collisions remains high, especially in conditions of intense traffic. Decision support systems should include algorithms for analyzing ship trajectories and warning about deviations from a safe course.

4. Optimizing ship movement. To increase navigation efficiency and reduce risks, it is necessary to use artificial neural network training to identify the level of danger regarding the ship's position and further optimize ship routes considering current conditions.

5. Analyzing navigator qualifications. It is important to develop computer programs to identify the qualification level of the navigator and analyze the impact of qualification levels on ship management methods in special and dangerous navigation areas.

Considering these scientific directions, a critical review of scientific sources will be conducted.

When considering a decision support system using radio communication for small vessel captains in the Caribbean Sea, the study noted the use of artificial neural networks. However, it lacks a detailed description of the model and comparison with other approaches, necessitating further research to confirm the results [7]. The integration of artificial intelligence, big data, and remote control for risk management in autonomous navigation is theoretically substantiated, but lacks sufficient methodology or data to confirm effectiveness, requiring practical testing of the model [8].

The method for determining collision risks using AIS data has limitations due to data transmission delays and incompleteness, indicating a need for empirical verification of its effectiveness in real navigation conditions [9]. To improve data transmission, the use of VDES instead of AIS is proposed. Although the new standard promises significant improvements, the study lacks real-world data to confirm the system's effectiveness in maritime navigation [10].

The integration of sensor technologies to improve the accuracy and reliability of navigation systems, as well as ensuring cybersecurity, is an important aspect of the research. Additionally, the need for improved personnel qualifications is emphasized [11]. The use of artificial intelligence, machine learning, big data analytics, and the Internet of Things for enhancing maritime navigation safety highlights the importance of processing large volumes of data and ensuring cybersecurity [6].

The analysis of methods for detecting marine objects using RGB cameras underscores the challenges associated with variable lighting conditions and weather phenomena. However, the application of deep learning methods requires significant computational resources [12].

The development of intelligent systems for predicting marine conditions using deep learning algorithms and image processing shows promise but needs real-world validation to confirm effectiveness [13]. The use of various sensors for data collection on the navigational environment

emphasizes the importance of visual perception and target detection at distances up to 6 nautical miles. Issues such as "blind spots" and signal loss are noted [14].

The integration of AIS data for modeling and forecasting the trajectories of other vessels using deep learning technologies underscores the need for additional data processing and verification [15]. In certain situations, the approach for Smart Maritime Autonomous Surface Vessel (SMASV) based on an improved Soft Actor-Critic (SAC) algorithm demonstrates high efficiency but requires real-world confirmation [16].

Probabilistic models also show potential, as exemplified by the dynamic Bayesian network (DBN) model for risk analysis in intelligent navigation of autonomous ships. This approach is effective but requires precise data and significant computational resources [17]. The application of the RMA model for classifying images of navigational signs achieves high accuracy but must consider the limitations of real navigation conditions and parameter settings [18]. Developing methods to ensure the functional resilience of navigation systems in non-standard situations is crucial, highlighting the need for further research to confirm the effectiveness of these methods [19].

The new AN-YOLOv4 algorithm for detecting navigational signs increases accuracy to 92% through the use of DCGAN and pyramid image methods, but real-world technical challenges must be addressed [20]. In other studies, the intelligent decision-making system for analyzing the state of the ship and ensuring hull balance uses IoT technologies for monitoring and data collection, but requires high-quality data and algorithms [21].

To account for uncertainty, fuzzy set theory and fuzzy logic are recommended for expert evaluations, emphasizing the need for real-world implementation of these methods [22]. However, such systems require a high level of data verification from experts. The use of virtual reality (VR) for crew training creates an interactive and realistic environment, but demands significant computational resources and user adaptation [23].

Thus, the development of a navigator DSS under conditions of partial uncertainty aims to reduce the workload on navigators, improve situational awareness, minimize collision risks, optimize ship movement, and analyze navigator qualifications. The main problem lies in the impact of a large amount of data and complex navigation conditions, which can lead to errors and dangers. To solve this problem, it is necessary to develop a system that effectively filters and provides the most critical information, improves awareness of the navigational situation, and takes into account the navigator's qualification level to enhance navigation safety and efficiency.

Research Purpose and Objectives. The aim of the research is to develop a method for integrating automated decision support tools for a navigator on the bridge of a sea vessel, considering the factors of uncertainty in the completeness of ECDIS data. To achieve this goal, a number of tasks must be solved to create a navigator DSS by developing automated modules:

1. Develop a module for automated OCR processing of images and text recognition on ECDIS display images in real time. The software module is designed to capture screenshots, preprocess images to enhance OCR accuracy, extract text from images using the Tesseract library, and save the extracted text to a file. Accomplishing this task will prepare the data for further analysis and ensure high text recognition accuracy.

2. Develop a module for comparing textual data and geolocations to analyze information and geographic data between different ECDIS screenshots to determine their similarity. The module includes loading data from files, analyzing key values using text comparison algorithms, and calculating the similarity of geolocations. Automating this process will speed up data analysis and support informed decision-making. Completing this task is essential for subsequent stages as it provides reliable data for comparison and analysis.

3. Develop a module for visualizing geographic data on a map, which includes creating interactive maps with markers and routes based on geographic data. The use of the Folium library is planned to create the map, add markers for each coordinate, visualize the ship's route and activity zone, and save the map in HTML web format. The data visualization module on the map will

ensure clarity and convenience for further analysis within the DSS, promoting a better understanding of movements and geographic patterns.

4. Develop a decision support module for a navigator, which will include comparing navigational data between pattern files, determining similarity between them, and providing recommendations based on this similarity. The module will load data from files, compare key values, calculate the similarity of textual data and geolocations, and output recommendations from an expert dictionary. Automating this process will effectively analyze navigational data, identify pattern files with high similarity, and provide specialized recommendations. Completing this task will form the core data and analytics for strategic decision-making by a navigator.

Primary Research Material. To achieve the research objective, it is necessary to develop integration modules for incorporating these DSS tools into the navigator's workflow on the bridge of a sea vessel. This involves addressing several key tasks: ensuring the completeness and accuracy of electronic navigational data (ECDIS), automating data processing and analysis, and providing navigators with timely and actionable recommendations.

To accomplish these tasks, the creation of automated modules, which constitute the core components of the navigator DSS, is proposed. These include modules for optical character recognition (OCR) to process ECDIS images, geolocation comparison to analyze and validate navigational data, and visualization tools to enhance situational awareness through interactive maps. Additionally, the decision support module is designed to compare navigational patterns and provide specialized recommendations based on the analysis of textual and geospatial data.

To create the navigator DSS, the route to the port of Lagos, Timkan was chosen (Figure 1). In collaboration with an expert, Captain of the long voyage, PhD, Pavlo Momenko, an action dictionary was compiled for each stage of the route, according to ECDIS data.

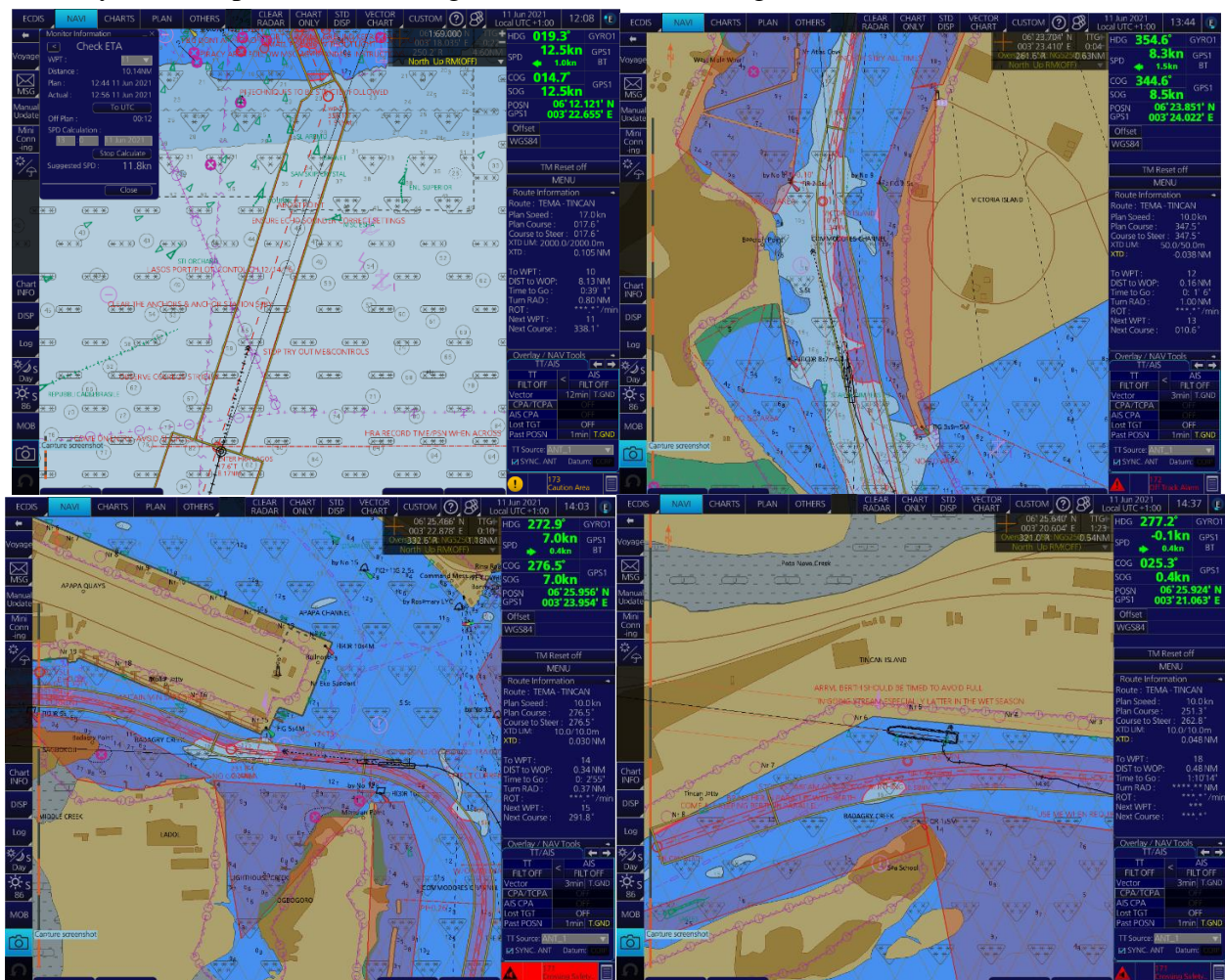


Figure 1 – Fragments-screenshots of the ECDIS TRANSAS system display in the port of Lagos

Considering the data from the ECDIS TRANSAS navigational information systems, the stages of the navigator's actions (expert system dictionary) were determined, which were subsequently planned to be integrated into the navigator DSS.

Initial data on the stages for creating the navigator DSS:

Stage 1. Initial Preparation: The captain and the bridge team review the route plans and port information, considering specific restrictions or requirements.

Stage 2. ECDIS №1 (Screenshot 20210611110841). Preparation of the Pilot Ladder: Setting up the ladder according to the pilot's instructions (side, height, straps). Speed adjustment: controlling the ship's speed according to the pilot's instructions, reducing speed if necessary. Visual and radar monitoring: monitoring the navigational situation using radars, with special attention to dredging vessels. Using the echo sounder: monitoring the water depth under the keel, cross-checking with the electronic chart. Fixing the ship's position: marking the position on the e-chart at 5-7 minute intervals. Ship movement: moving at a speed of 12.5 knots, adjusting the speed. Course angle 19.30, ground course 14.70.

Stage 3. ECDIS №2 (Screenshot 20210611115028), ECDIS №3 (Screenshot 20210611115557), ECDIS №4 (Screenshot 20210611120848), ECDIS №5 (Screenshot 20210611121957): Communication: maintaining contact with the port's vessel traffic service and the pilot via VHF channels 16/12. Ship speed adjustment: reducing speed to DSAH (dead slow ahead) to 4 knots, which is the minimum safe speed for ship maneuverability using the rudder. Navigational planning and control: more carefully monitoring the depth under the keel in accordance with the ship's draft, especially when approaching the 30-meter isobath, monitoring the course angle 004.5° and ground course 354.8° . Ship maneuvering: performing maneuvers with reversing the main engine and using the bow thruster, awaiting the pilot.

Stage 4. Pilot Boarding: Establishing radio communication: the captain establishes radio contact using the VHF receiver on channels 16/12. Monitoring the pilot boat: visually observing the approach of the pilot boat. Managing ship speed: moving the ship at a speed of 6 knots, as indicated by the pilot. Navigational planning: changing the ship's course towards the entrance channel, defined by navigation buoys. Checking the pilot ladder: the watch officer goes to the main deck to the pilot boarding area to check the pilot ladder according to international requirements (Resolution A.1045(27) and IMAP Notice № 849).

Stage 5. ECDIS №6 (Screenshot 20210611122409): Speed and course management of the ship: the ship moves at a speed of 6 knots, set by the pilot, the captain adjusts the course to the entrance channel according to the route in ECDIS. Coordination with the pilot boat: the watch officer monitors the pilot's boarding and informs the captain after the safe departure of the boat. Pilot reception: the watch officer accompanies the pilot to the bridge, the captain provides the pilot with information about the ship through the pilot card and the main engine characteristics and ship's maneuvering characteristics. Beginning of the second maneuvering stage: after providing information to the pilot, the second maneuvering stage begins – pilotage, which requires coordination between the captain, the watch officer, and the pilot for the ship's safety when approaching the port and maneuvering in the port area.

Stage 6. ECDIS №7 (Screenshot 20210611122937), ECDIS №8 (Screenshot 20210611124034): Maneuvering along the fairway: the ship follows the approach fairway, marked by red buoys on the left and green buoys on the right (IALA region A system). Controlling ship speed and course: ship speed (SOG) is 6.2 knots, course (COG) 348.8° . Using Parallel Indexing (PI): the captain uses PI to control the ship's position relative to the shoreline and landmarks, setting distance limits. Monitoring depth under the keel: tracking depths on the sea chart and cross-checking with echo sounder readings to ensure safe depth under the keel. Adjusting speed depending on conditions: speed increases to SAH (slow ahead) 8-10 knots for better maneuverability, and decreases to DSAH (dead slow ahead) 6-8 knots for precise maneuvering when approaching the dock.

Stage 7. ECDIS №9 (Screenshot 20210611124452), ECDIS №10 (Screenshot 20210611124902), ECDIS №11 (Screenshot 20210611125313), ECDIS №12 (Screenshot

20210611125928): Maneuver preparation: the bridge team carefully studies and plans maneuvers in difficult sections of the fairway, highlighted in the Harbour Approach & Manoeuvring Plan. Maneuvering during approach: performing a 90° turn to the left, changing the course to the required direction, then maneuvering to the right to 220°. Controlling speed and course: increasing speed to 8-10 knots for maneuverability, then reducing to 6-8 knots for precise maneuvering. Ensuring safety: strictly following the pilot's commands and helm adjustments with high attention. Using Parallel Indexing (PI): setting distance limits relative to landmarks or the shoreline for safe distances. Integration with ECDIS: information about the ship's speed, helm angle, and point of helm adjustment is added to the electronic chart. Responding to conditions: the captain remains attentive and ready to intervene in case of unsafe maneuver execution by the pilot.

Stage 8. ECDIS №13 (Screenshot 20210611130013), ECDIS №14 (Screenshot 20210611130326), ECDIS №15 (Screenshot 20210611130626): Coordination with the pilot and helmsman for maneuvers: close cooperation with the pilot for precise maneuvering, especially during 90° and 220° turns, evaluating performed maneuvers and readiness to intervene in case of accident risk. Adjusting ship speed: ship speed (SOG) varies between 7.4 and 7.2 knots during maneuvering. Navigational control using Parallel Indexing (PI): using PI to establish safe distances from the shoreline and moored vessels. Monitoring the suction effect: maintaining speed modes to minimize the risk of creating a suction effect that can damage the mooring lines of moored vessels.

Stage 9. ECDIS №16 (Screenshot 20210611130909), ECDIS №17 (Screenshot 20210611131354), ECDIS №18 (Screenshot 20210611131820): Navigation: the ship moves in port waterways at a speed of 7.6 knots (SOG), the ship's course (COG) changes from 250 to 350 degrees, indicating direction changes during maneuvering. Maneuvering operations: the captain coordinates maneuvers for safe passage near moored vessels, maintaining distance from the shoreline and other obstacles. Speed control: the captain controls the speed to minimize the risk of damaging moored vessels and their mooring lines due to the suction effect. Communication with the bridge: the captain maintains constant communication with the bridge and helmsman for quick and accurate execution of maneuvering commands.

Stage 10. ECDIS №19 (Screenshot 20210611132652): Preparation for towing: the ship reduces speed to 4-5 knots for safe approach to the tugs. The captain organizes mooring teams under the direction of the third mate on the bow and the second mate on the stern. Communication with tugs: commands for tugs are given through the pilot and the captain; direct communication between crews is excluded. Attention to the human factor: the captain focuses on avoiding errors due to language barriers or professional differences. Navigational parameters: the ship's course (COG) is 250°-278°, speed (SOG) 4-7 knots, indicating preparation for docking or towing.

Stage 11. ECDIS №20 (Screenshot 20210611132715): Controlling the ship's speed and direction: the ship's speed is reduced to 4.3 knots for controlled approach to the dock with the possibility of reversing. Cooperation with tugs: the captain coordinates actions with tugs after confirming their readiness. Reversing the main engine: depending on the distance to the dock and the ship's speed, the captain chooses between reversing the main engine or additional tug thrust. Ship handling: the rudder is used for precise control of the ship when approaching the dock, even at low speed.

Stage 12. ECDIS №21 (Screenshot 20210611133405), ECDIS №22 (Screenshot 20210611133627), ECDIS №23 (Screenshot 20210611133740), ECDIS №24 (Screenshot 20210611133903): Parallel docking of the ship: the captain coordinates actions to position the ship parallel to the dock, using tugs at a speed of 0.5 knots, then 0.0 knots. Main engine readiness for maneuver: the main engine is ready for any necessary maneuver at the captain's command. Preparation for an emergency: the boatswain and the mooring team are ready to use the anchor in case of an unforeseen situation. Mooring operations: the captain instructs the mooring teams on the bow and stern regarding the delivery of mooring lines to the dock. Completion of maneuvering: after securing the mooring lines and releasing the tugs, the captain completes the maneuvering, gives the command to stop using the main engine, and the pilot leaves the ship.

The data within the expert system dictionary allowed the transition to creating software modules for the navigator DSS as a whole.

1. Development of an automated OCR module for image processing and text recognition on ECDIS display images in real time on the bridge (Figure 2).

Detailed description of the program processes for OCR image processing with specified regions of interest (ROI):

Initialization and loading libraries:

Loading necessary modules: `import cv2, pytesseract, os, pyautogui, pygetwindow as gw, time.`

Setting configuration for pytesseract: `pytesseract.pytesseract.tesseract_cmd = r'C:\Program Files\Tesseract-OCR\tesseract.exe'.`

Capturing screenshots (take_screenshots):

Finding the window by title: `window = gw.getWindowsWithTitle(window_title)[0].`

Checking window activity and activating if necessary: `if not window.isActive: window.activate().`

Capturing and saving the screenshot: `screenshot = pyautogui.screenshot() та screenshot.save(filename), де filename = os.path.join(save_folder, f"{time.strftime('%Y%m%d-%H%M%S')}.png").`

Repeating the process at a specified interval: `time.sleep(interval).`

Preprocessing the image for OCR (preprocess_image):

Reading the image: `image = cv2.imread(image_path).`

Converting the image to grayscale: `gray_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY).`

Extracting text from the image (extract_text_from_image):

Configuring and running OCR: `text = pytesseract.image_to_string(image, config='--oem 3 --psm 11').`

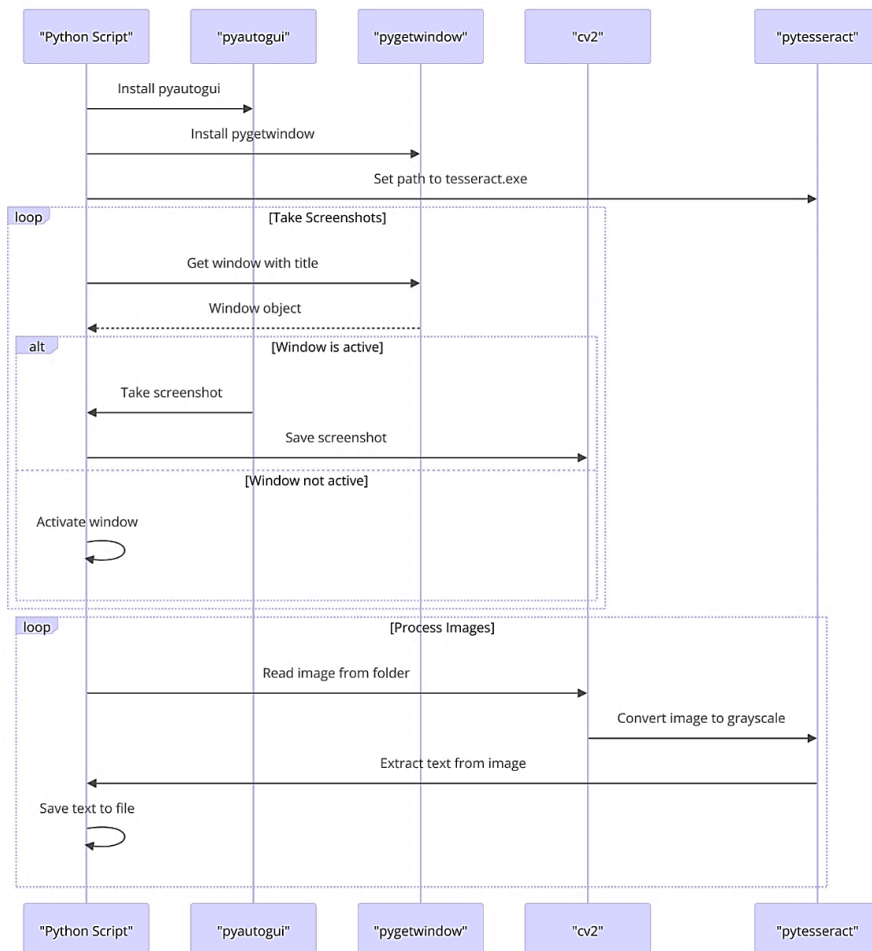


Figure 2 – Structure of the ECDIS Image Processing and Text Recognition Module

Saving text to a file (save_text_to_file):

Opening the file and writing the text: `with open(file_path, 'w', encoding='utf-8') as file: file.write(text).`

Processing all images in a folder (process_images_from_folder):

Iterating over files in the folder: `for root, dirs, files in os.walk(folder_path).`

Processing each image and saving the text: `preprocessed_image = preprocess_image(file_path), text = extract_text_from_image(preprocessed_image), save_text_to_file(text, text_file_path).`

Managing threads and user interaction:

Creating a thread: `screenshot_thread = Thread(target=take_screenshots, args=(window_title, screenshot_folder, 10)).`

Starting the thread: `screenshot_thread.start().`

Waiting for user input: `input("Натисніть Enter, коли закінчите працювати з програмою...").`

This approach ensures systematic and automated extraction of textual information from specific areas of the image, which can be useful for analyzing images with consistent structures, such as forms, maps, or other documents.

1.2. OCR image processing with specified regions of interest (ROI). Detailed ROI collection involves gathering key navigational data from ECDIS (Figure 3).

Initialization and loading libraries:

Importing libraries: `import cv2, pytesseract, os.`

Setting configuration for pytesseract: `pytesseract.pytesseract.tesseract_cmd = r'C:\Program Files\Tesseract-OCR\tesseract.exe'.`

Defining the region of interest (ROI) on the image (get_roi):

Getting a part of the image by specified coordinates: `return image[y1:y2, x1:x2].`

Performing OCR for the defined region (ocr_zone):

Defining ROI using get_roi: `roi = get_roi(image, x1, y1, x2, y2).`

Using pytesseract to recognize text in the area: `text = pytesseract.image_to_string(roi, config='--psm 7').`

Cleaning and returning the obtained text: `return text.strip().`

Image processing procedure (process_image):

Reading the image: `image = cv2.imread(image_path).`

Converting the image to grayscale to enhance OCR accuracy: `gray_image = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY).`

Defining zone coordinates and collecting data using OCR for each zone: `data = {key: ocr_zone(gray_image, coords) for key, coords in zones.items()}.`

Saving data to a file (save_data_to_file):

Opening the file for writing: `with open(file_path, 'w', encoding='utf-8') as file.`

Writing data to the file: `file.write(f"{key}: {value}\n" for key, value in data.items()).`

Main function for processing images in a folder (main):

Iterating over all images in the folder: `for file_name in os.listdir(folder_path).`

Checking the file format (accepts image files): `if file_name.lower().endswith(('.png', '.jpg', '.jpeg')).`

Processing each image and saving the results: `data = process_image(file_path), save_data_to_file(data, text_file_path).`

Outputting results or errors: `print(f"Дані з {file_name} збережено в {text_file_path}"), print(f"Помилка при обробці файлу {file_name}: {e}").`

This approach ensures systematic and automated extraction of textual information from specific areas of the image, which can be useful for analyzing images with consistent structures, such as forms, maps, or other documents.

For example, ECDIS №3 (Screenshot 20210611115557)_data, processed by the developed software module, has the following automatic identification: date: 11 Jun 2021; time: 12:55; heading_hdg: 000.5"; speed: 2.5kn; course_cog: 357.7; latitude: 06° 19.513' N; longitude: 003° 25.073" E; waypoint_wpt: To WPT: 10; distance_to_wpt: DIST to WOP: 0.32 NM; time_to_go: Time to Go: 0: 7'37"; next_wpt: 'Next WPT: 1; next_course: 'Next Course: 338.1";

distance_between_wpt: Distance: 2.43NM; plan_speed: Plan Speed: 17.0kn; plan_course: Plan Course: 017.6°.

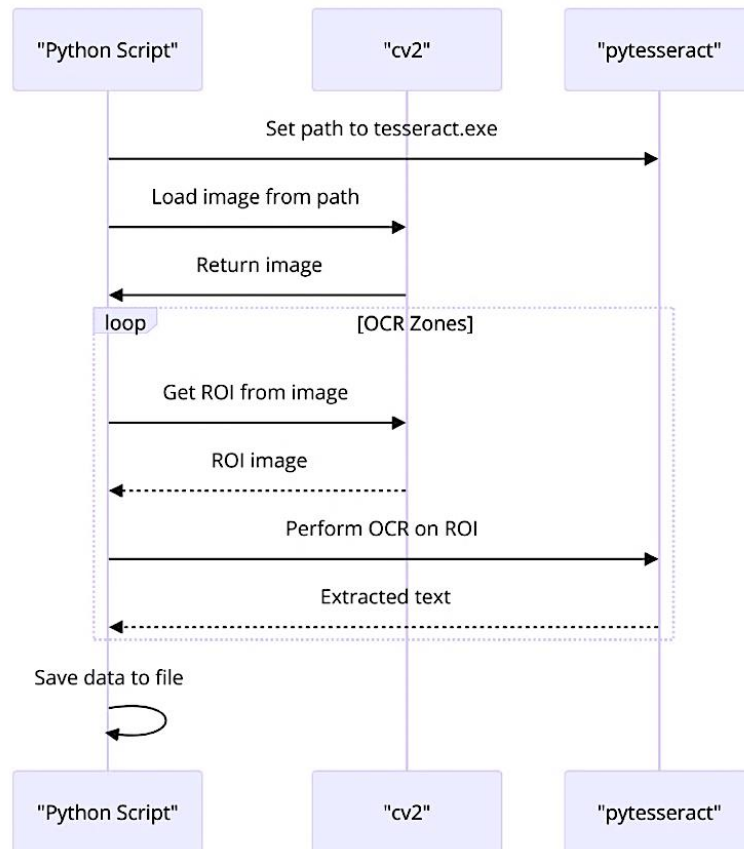


Figure 3 – Structure of the Image Processing Module with Navigational Data Zones from ECDIS

2. Development of a module for comparing textual data and geolocations to analyze information and geographic data between different ECDIS screenshots (Figure 4).

Initialization and loading libraries:

Importing libraries: `import os, from difflib import SequenceMatcher, from math import radians, cos, sin, asin, sqrt.`

Loading data from a file (`load_data_from_file`):

Opening the file and reading lines: `with open(file_path, 'r', encoding='utf-8') as file: lines = file.readlines().`

Extracting keys and values from file lines: `data = {line.split(':')[0].strip(): line.split(':')[1].strip() for line in lines if line.strip()}.`

Comparing data (`compare_data`):

Determining common keys for comparison, excluding 'date' and 'time': `keys_to_compare = set(test_data.keys()) & set(reference_data.keys()) - {'date', 'time'}.`

Calculating similarity for each key: `scores = [SequenceMatcher(None, test_data[key], reference_data[key]).ratio() for key in keys_to_compare].`

Returning the average similarity as a percentage: `return sum(scores) / len(scores) * 100 if scores else 0.`

Converting DMS to decimal coordinates (`dms_to_decimal`):

Cleaning the coordinate string and splitting it into parts: `parts = dms_str.replace('°', '').replace("'", '').replace('"', '').split().`

Converting degrees and minutes to decimal degrees, accounting for direction: `decimal = degrees + minutes / 60, if direction in ['S', 'W']: decimal = -decimal.`

Calculating the distance between two points (haversine):

Converting coordinates to radians and calculating the difference: `dlon = lon2 - lon1, dlat = lat2 - lat1.`

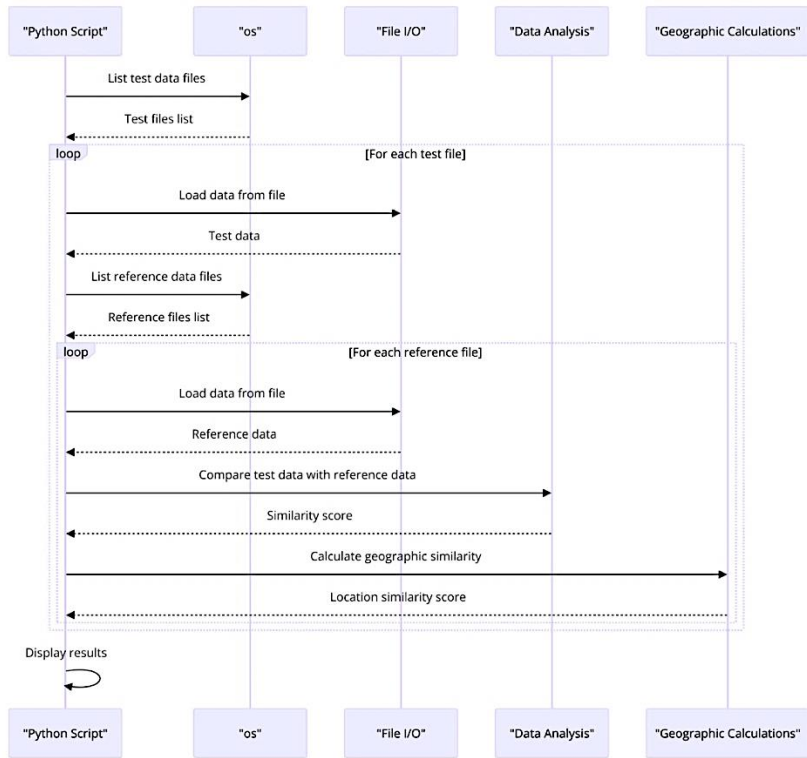


Figure 4 – Structure of the ECDIS Information and Geographic Data Analysis Module

Calculating the distance using the Haversine formula: $a = \sin(dlat/2)^2 + \cos(lat1) * \cos(lat2) * \sin(dlon/2)^2$, $c = 2 * \arcsin(\sqrt{a})$, return $c * r$.

Calculating location similarity (calculate_location_similarity):

Determining coordinates and calculating the distance: $distance = haversine(lat1, lon1, lat2, lon2)$.

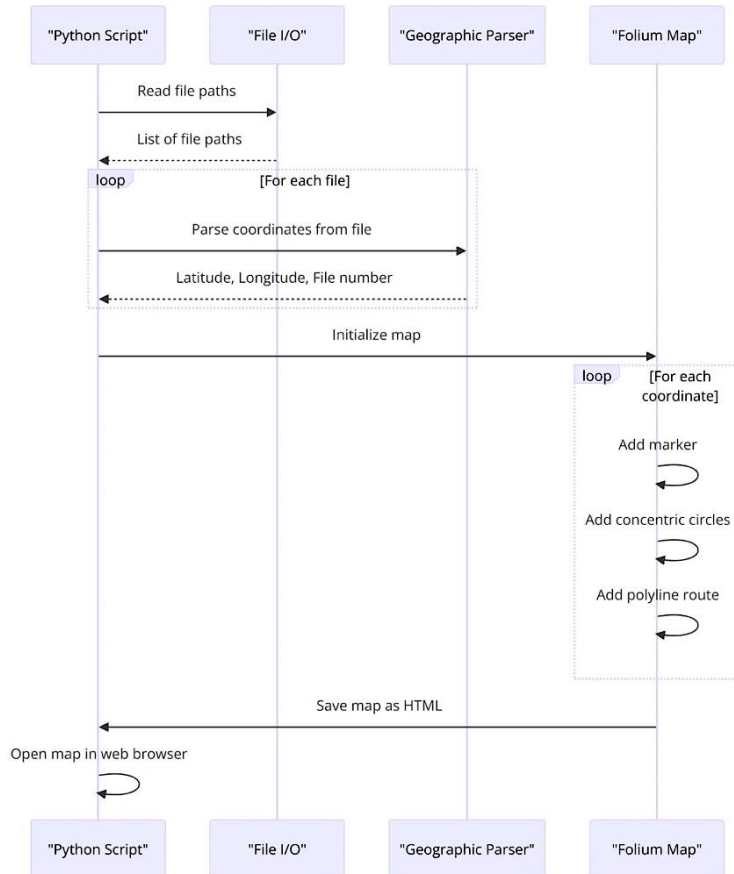


Figure 5 – Structure of the Geographic Data Visualization Module

Converting distance to percentage similarity: `return max(0, 100 - (distance / 1 * 100)).`

Main function for comparing files (main):

Loading and comparing data from test and reference files: `test_data = load_data_from_file(test_data_file), reference_data = load_data_from_file(reference_file_path), similarity = compare_data(test_data, reference_data).`

Outputting similarity results and sorting in descending order: `comparison_results.sort(key=lambda x: x[1], reverse=True).`

Checking similarity by geolocation: `for file_name, _, reference_data in comparison_results, loc_similarity = calculate_location_similarity(test_data, reference_data).`

This approach describes in detail how your program processes data, compares it based on textual information and geolocation, and organizes the output of results, allowing easy identification of files with a high level of similarity.

3. Development of a geographic data visualization module, which includes creating interactive maps with markers and routes based on geographic data.

Initialization and loading libraries:

Importing libraries: `import folium, import os, import glob, import webbrowser.`

Converting coordinates to decimal format (convert_to_decimal):

Converting degrees and minutes to decimal coordinates: `value = float(degrees) + float(minutes) / 60.`

Adjusting value for southern and western coordinates: `if direction in ['S', 'W']: value = -value.`

Parsing coordinates from files (parse_coordinates):

Opening the file and reading data: `with open(filename, 'r', encoding='utf-8') as file: lines = file.readlines().`

Selecting lines with latitude and longitude information: `latitude_line = next((line for line in lines if "latitude:" in line), None).`

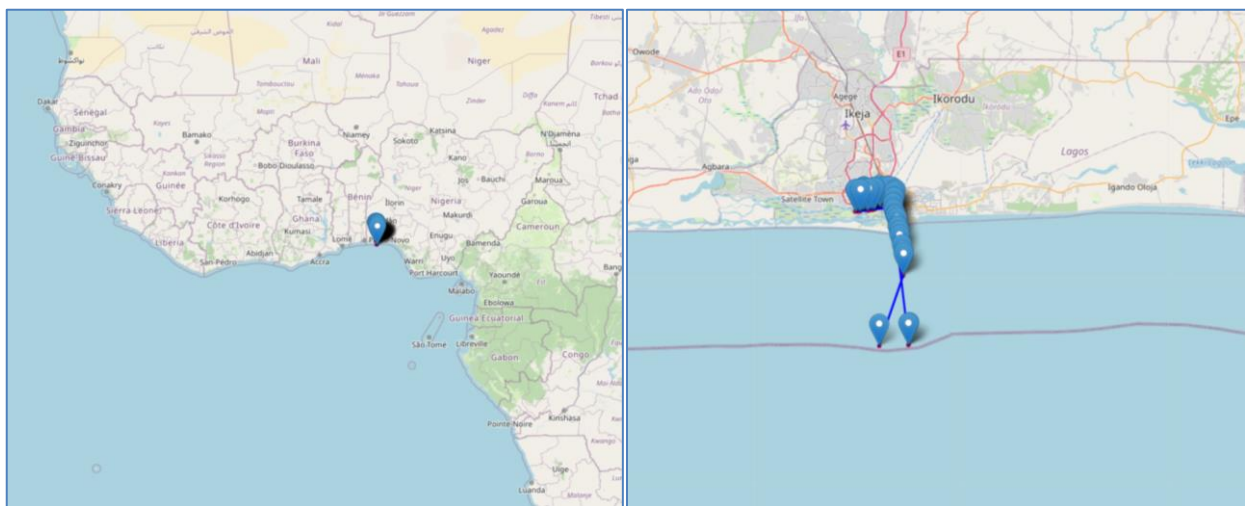
Cleaning latitude and longitude information and splitting into parts: `latitude_info = latitude_line.split('latitude:')[1].strip().replace('°', '').replace("'", '').replace('\"', '').replace('\"', '').`

Calculating decimal coordinates: `latitude = convert_to_decimal(lat_deg, lat_min, lat_dir).`

Creating the map and adding markers (Figure 6):

Initializing the map: `map = folium.Map(location=[0, 0], zoom_start=5).`

Adding markers to the map with popup text: `folium.Marker([lat, lon], tooltip=popup_text).add_to(map).`



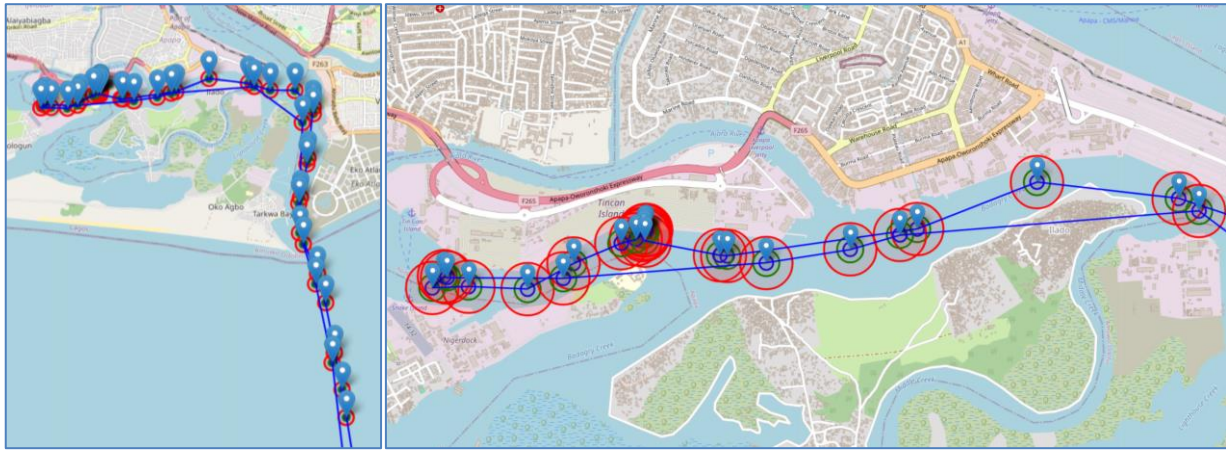


Figure 6 – Creating Interactive Maps with Route and Danger Zone Markings

Adding concentric circles and routes:

Adding different radii for skin coordinates: `folium.Circle(location=[lat, lon], radius=50, color='blue', fill=True).add_to(map)`.

Creating a polyline to visualize the route: `folium.PolyLine(route_coordinates, color="blue", weight=2.5, opacity=1).add_to(map)`.

Saving the map and opening it in a browser:

Saving the map to an HTML file: `map.save('map.html')`.

Automatically opening the map in a web browser: `webbrowser.open('map.html', new=2)`.

This program automates the process of creating an interactive map with markers that display locations from data in text files. It can visualize routes and activity zones, making it ideal for geographic analysis or tracking movements within research projects or logistics operations.

3.1. Detailed description of the program processes that read geographic positions from files and visualize them on an interactive map by adding markers indicating deviations from the base ship coordinate (Figure 7):

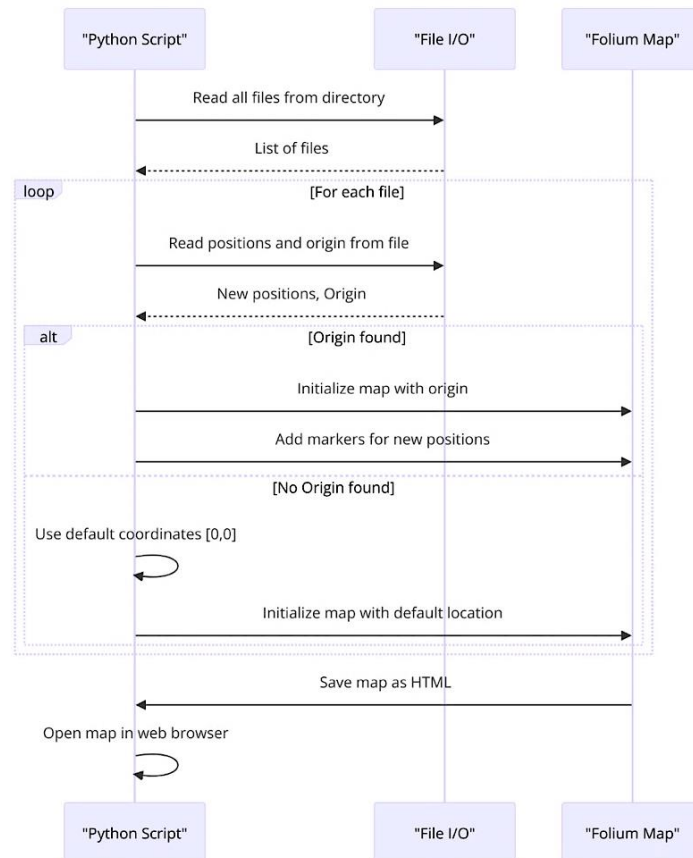


Figure 7 – Creating Interactive Maps with Markers Indicating Deviations from the Standard

Initialization and loading libraries:

Importing necessary libraries: `import folium, import webbrowser, import os.`

Reading positions and the initial point from a file (`read_positions_and_origin`):

Opening the file and reading all lines: `with open(file_path, 'r', encoding='utf-8') as file: lines = file.readlines().`

Finding the line containing the initial point label and parsing coordinates: `origin_coords = origin_parts[1].strip().strip('[]').split(',')`, `origin_lat, origin_lon = [float(coord) for coord in origin_coords].`

Recording new positions after finding the initial point: `if 'm' in line and origin_found: new_positions.append((lat, lon)).`

Creating a map with all positions for the directory (`create_map_with_all_positions`):

Getting a list of files with specific suffixes: `all_files = [f for f in os.listdir(directory) if f.endswith(".s.txt")].`

Checking for the presence of files and selecting the first file to initialize the map: `first_file_path = os.path.join(directory, all_files[0]).`

Initializing the map with the first initial point: `my_map = folium.Map(location=first_origin, zoom_start=15).`

Adding markers to the map:

Reading positions and initial points from all files in the directory: `new_positions, origin = read_positions_and_origin(file_path).`

Adding markers for initial points and new positions: `folium.Marker(origin, icon=folium.Icon(color='red')).add_to(my_map)` та `for lat, lon in new_positions: folium.Marker([lat, lon]).add_to(my_map).`

Saving the map and opening it in a web browser:

Saving the map to an HTML file: `my_map.save('all_positions_map.html').`

Automatically opening the map in a web browser (Figure 8): `webbrowser.open('all_positions_map.html', new=2).`

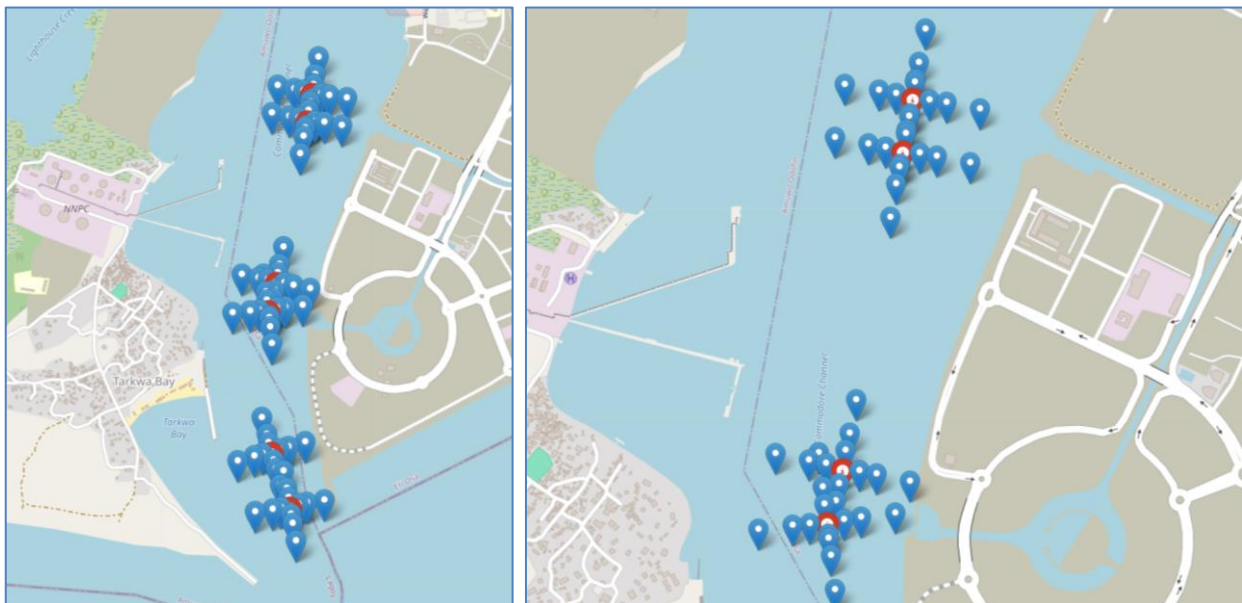


Figure 8 – Visualizing Multiple Markers on an Interactive Map by Safety Level

This program allows the visualization of geographic data from multiple files, integrating them into a single map, making it easy to analyze and compare geographic tracks and identify different geolocations specified in the data.

4. Development of a Decision Support Module for the Navigator, which will include comparing navigational data between pattern files, determining their similarity, and providing recommendations based on this similarity (Figure 9).

Initialization and loading libraries:

Importing necessary libraries: `import os, from difflib import SequenceMatcher, from math import radians, cos, sin, asin, sqrt.`

Loading data from a file (load_data_from_file):

Opening the file and reading lines: `with open(file_path, 'r', encoding='utf-8') as file: lines = file.readlines().`

Extracting keys and values from file lines: `data = {line.split(':')[0].strip(): line.split(':')[1].strip() for line in lines if line.strip()}.`

Comparing data (compare_data):

Determining common keys for comparison, excluding 'date' and 'time': `keys_to_compare = set(test_data.keys()) & set(reference_data.keys()) - {'date', 'time'}.`

Calculating similarity for each key: `scores = [SequenceMatcher(None, test_data[key], reference_data[key]).ratio() for key in keys_to_compare].`

Returning the average similarity as a percentage: `return sum(scores) / len(scores) * 100 if scores else 0.`

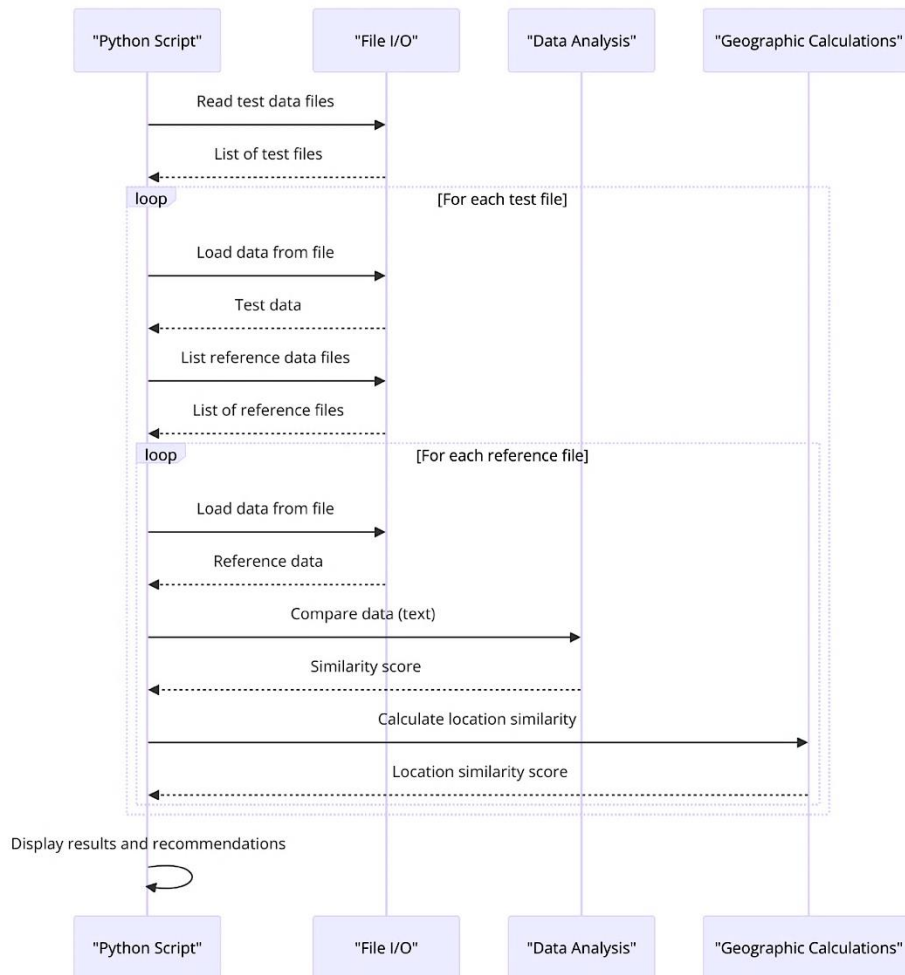


Figure 9 – Visualization of Multiple Markers on an Interactive Map by Safety Level

Converting DMS to decimal coordinates (dms_to_decimal):

Cleaning the coordinate string and splitting it into parts: `parts = dms_str.replace('°', '').replace("'", '').replace('N', '').replace('S', '').replace('E', '').replace('W', '').split().`

Converting degrees and minutes to decimal degrees, accounting for direction: `decimal = degrees + minutes / 60, if direction in ['S', 'W']: decimal = -decimal.`

Calculating the distance between two points (haversine):

Converting coordinates to radians and calculating the difference: `dlon = lon2 - lon1, dlat = lat2 - lat1.`

Calculating the distance using the Haversine formula: `a = sin(dlat/2)**2 + cos(lat1) * cos(lat2) * sin(dlon/2)**2, c = 2 * asin(sqrt(a)), return c * r.`

Calculating location similarity (calculate_location_similarity):

Determining coordinates and calculating the distance: `distance = haversine(lat1, lon1, lat2, lon2).`

Converting distance to percentage similarity: `return max(0, 100 - (distance / 1 * 100)).`

Main function for comparing files (main):

Loading and comparing data from test and reference files: `test_data = load_data_from_file(test_data_file), reference_data = load_data_from_file(reference_file_path), similarity = compare_data(test_data, reference_data).`

Outputting similarity results and sorting in descending order: `comparison_results.sort(key=lambda x: x[1], reverse=True).`

Checking similarity by geolocation: `for file_name, _, reference_data in comparison_results, loc_similarity = calculate_location_similarity(test_data, reference_data).`

Providing recommendations based on comparison results:

Finding files with the highest similarity rating and outputting corresponding recommendations from the dictionary: `if top_file in recommendations: for rec in recommendations[top_file]: print(rec).`

This program automates the comparison of navigational data by determining similarity across various parameters, identifying the relevant file(s) to provide specialized recommendations based on this data (Figure 10).

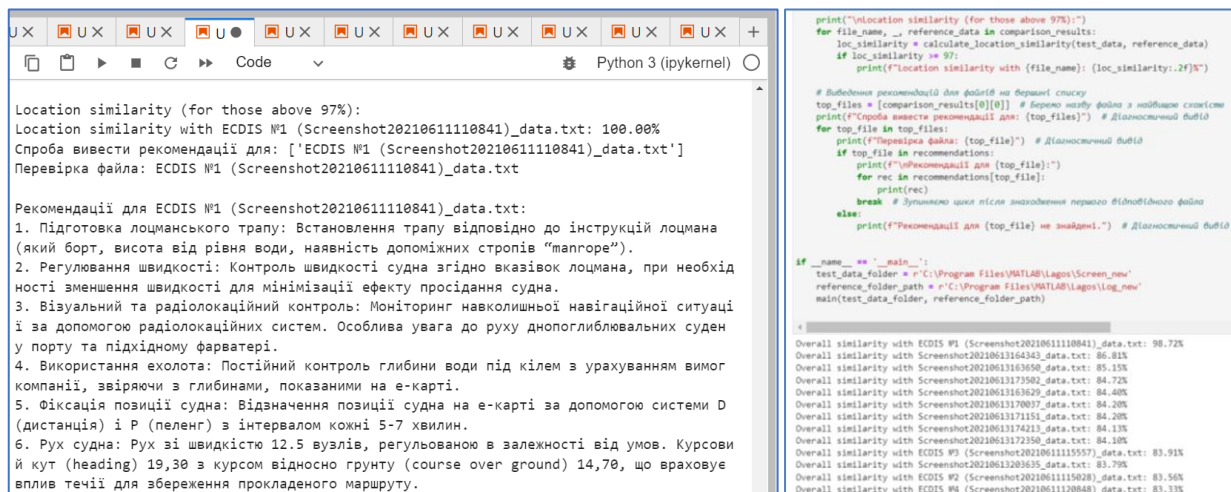


Figure 10 – Implementation of the Navigator Decision Support System

4.1. The functionality of loading point coordinates from files, comparing them with a reference point, calculating the distance between them, and providing recommendations based on point identifiers is presented in the following algorithm.

Loading coordinates: The function `load_coordinates_from_file(filepath)` reads the coordinates of points from a file, where the first line contains the reference point, and the subsequent lines contain the identifiers and coordinates of other points. The coordinates are stored in a dictionary with identifiers as keys.

Analyzing points: The function `analyze_points(reference_point, points)` calculates the Euclidean distances between the reference point and other points, storing the results in a dictionary. The identifier of the point with the shortest distance to the reference point is determined.

Providing recommendations: The function `get_advice(identifier)` provides recommendations based on the direction encoded in the point identifier. For example, the direction "270°" indicates the need to adjust the course to the right.

Haversine formula: The function `haversine(coord1, coord2)` calculates the distance between two coordinates on the surface of a sphere (in meters), using the Earth's radius and the coordinates of the points in radians.

Finding the best match: The function `find_best_match(reference_file_path, comparison_files_directory)` compares the reference point with other points from files in the specified directory. First, the reference point is loaded from the reference file. Then, for each file in the directory, the coordinates are loaded, and the distance between the reference points is calculated using the Haversine formula. The file with the shortest distance to the reference point is determined, and recommendations are provided based on the identifier of the closest point (Figure 11).

```

Best matching file: C:/Program Files/MATLAB/Lagos/Neuro_learning\5_s.txt
Distance to the closest point: 100.07553549486686 meters
Best identifier: 100m 180B°
Recommendation: 100m Продовжуйте рух прямо із пришвидшенням.

```

Figure 11 – Implementation of the Navigator Decision Support System
(Recommendations for Ship Maneuvering)

This process allows automated finding and comparing of point coordinates, assessing their proximity to the reference point, and obtaining directional movement recommendations.

Experiments conducted using the TRANSAS Wärtsilä Navi-Sailor ECDIS navigation simulators significantly enhanced the support of the navigator's actions. This was particularly noticeable during training as part of the "Navigation and Piloting" course, ECDIS module.

Overall, the developed Navigator Decision Support System, exemplified by the Lagos location, Port Kimkan, reduced the ship's travel time by 7% to 18% when applied. Besides ensuring navigation safety, the Navigator Decision Support System shortens the ship's route and consequently saves fuel and lubricants as well as electricity on the ship.

Conclusion. The research focused on developing an automated Decision Support System (DSS) for navigators, specifically targeting the enhancement of maritime safety and efficiency under conditions of partial uncertainty in ECDIS data. The DSS developed integrates various automated modules, each addressing a specific aspect of navigational decision-making, from OCR processing of ECDIS images to the comparison of geolocation data and visualization of geographic information. The following conclusions summarize the key findings and results of the research:

1. The developed DSS significantly reduces the workload on navigators by effectively filtering and prioritizing navigational information. This reduces the risk of information overload, which can lead to errors and critical situations. The OCR processing module automates the extraction of textual data from ECDIS images, ensuring that only the most relevant information is presented to the navigator.

2. By integrating geographic data visualization and comparison modules, the DSS improves situational awareness. Navigators can better understand and interpret the navigational environment through interactive maps with markers and routes, enhancing their ability to make informed decisions in real-time.

3. The DSS includes advanced algorithms for analyzing ship trajectories and warning of potential deviations from safe courses. This proactive approach to collision risk management helps in maintaining a safe distance from other vessels and obstacles, thereby minimizing the risk of collisions.

4. The use of artificial neural networks and data analysis techniques allows for the optimization of ship routes. The DSS identifies potential hazards and optimizes the ship's movement to avoid these hazards, thus improving overall navigation efficiency. Practical tests have shown that the DSS can reduce travel time by 7% to 18%, leading to significant savings in fuel, lubricants, and electricity.

5. The decision support module provides tailored recommendations based on the comparison of navigational data. By identifying patterns and similarities in data, the DSS offers strategic advice to navigators, which is crucial for effective decision-making, especially in complex and high-risk navigational scenarios.

6. Experiments conducted using TRANSAS Wärtsilä Navi-Sailor ECDIS navigation simulators confirmed the effectiveness of the DSS in enhancing navigational safety and efficiency. The practical application of the DSS during the "Navigation and Piloting" course demonstrated its capability to reduce the ship's travel time and improve overall navigation performance.

Practical significance. The research provides a robust and practical solution for enhancing maritime safety and efficiency through the development of an automated DSS. The system's ability to filter and prioritize information, improve situational awareness, and provide strategic recommendations significantly enhances the navigator's decision-making capabilities. The DSS not

only ensures safer navigation but also contributes to operational efficiency by reducing fuel consumption and travel time.

Prospects for further research. Prospects for further research involve improving data integration methods to enhance the accuracy and reliability of the navigator DSS. Future work will benefit from the use of artificial neural networks to obtain intermediate assessments in the form of approximations. Additionally, an important aspect of developing the navigator DSS is identifying the navigator's qualification parameters to ensure logical conclusions regarding their actions and prevent undesirable consequences. Further research is necessary both to expand and verify the effectiveness of the DSS in real maritime navigation conditions. This will allow the improvement of algorithms for analyzing large volumes of data and integrating artificial intelligence to provide more adaptive and autonomous solutions.

REFERENCES

1. 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>.
2. Nosov, P., Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Y., Gritsuk, I., Sokol, I., Kyrychenko, K. (2023). Devising an approach to safety management of vessel control through the identification of navigator's state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (3 (124)), 19–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286156>.
3. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi, O., Nosov, P., & Popovych, I. (2023). Intelligent System Control of the Vessel Executive Devices Redundant Structure. In *CEUR Workshop Proceedings (Vol. 3403, Paper 44, pp. 582-594)*. CEUR-WS.org.
4. Gritsuk I. V., Nosov P. S., Ponomaryova V. P., Diahyleva O. S. (2023). Reduction of navigation risks by using fuzzy logic to automate control processes under uncertainty. «Наука і техніка сьогодні» (Серія «Техніка»): журнал. № 6(20). С. 8–22.
5. Victoria Ponomaryova, Pavlo Nosov. (2023). Method of automated identification of qualification parameters for marine operators under risk conditions // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії (Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології): науковий журнал*. – Херсон: Херсонська державна морська академія, № 26–27. С. 144–165.
6. Zhang, Mingyang & Zhang, Xinyu & Fu, Shanshan & Dai, Lei & Yu, Qing. (2024). *Recent Developments and Knowledge in Intelligent and Safe Marine Navigation*. MDPI. 219 pp. ISBN: 978-3-03928-624-9.
7. Banaszek, Andrzej & Lisaj, Andrzej. (2023). The Radiocommunication Support Decision System to Use in Distress Situations for Captains of Small Non-conventional Vessels Operating in the Caribbean Sea Area. *Procedia Computer Science*. 225. 765–774. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.063>.
8. Luo, Jianan & Geng, Xiongfei & Li, Yabin & Yu, Qiaochan. (2022). Study on the Risk Model of the Intelligent Ship Navigation. *Wireless Communications and Mobile Computing*. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/3437255>.
9. Wang, Zhiyuan & Wu, Yong & Chu, Xiumin & Liu, Chenguang & Zheng, Mao. (2023). Risk Identification Method for Ship Navigation in the Complex Waterways via Consideration of Ship Domain. *Journal of Marine Science and Engineering*. 11. 2265. <https://doi.org/10.3390/jmse11122265>.
10. Qian, Jingyi & Zeng, Huilu & Yao, Guowei & Kong, Fanwei. (2023). Research of the New Generation Marine Navigation Security Communication System. *Transactions on Computer Science and Intelligent Systems Research*. 2. 130–139. <https://doi.org/10.62051/vvvt15>.
11. Sarkodie, Pokuaa & Zhang, Zhenkai & Benuwa, Ben & Ghansah, Benjamin & Ansa, Ernest. (2018). *A Survey of Advanced Marine Communication and Navigation Technologies*:

Developments and Strategies. International Journal of Engineering Research in Africa. 34. 102–115. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.34.102>.

12. Yang, Defu & Solihin, Mahmud Iwan & Zhao, Yawen & Yao, Benchun & Chen, Chaoran & Cai, Bingyu & Machmudah, Affiani. (2023). A review of intelligent ship marine object detection based on RGB camera. IET Image Processing. 18. n/a-n/a. <https://doi.org/10.1049/ipr2.12959>.

13. Jian, Jun & Sun, Zheng & Sun, Kai. (2024). An Intelligent Automatic Sea Forecasting System Targeting Specific Areas on Sailing Routes. Sustainability. 16. 1117. <https://doi.org/10.3390/su16031117>.

14. Wang, Yong & Gao, Zengyun & Li, Chunxu & Ge, Fan & Wei, Changgeng & Xu, Jiaqing. (2022). Research on Maritime Navigation Perception Requirements of Intelligent Ships. Journal of Physics: Conference Series. 2356. 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2356/1/012033>.

15. Zhang, Daiyong & Chu, Xiumin & Liu, Chenguang & He, Zhibo & Zhang, Pulin & Wu, Wenxiang. (2024). A Review on Motion Prediction for Intelligent Ship Navigation. Journal of Marine Science and Engineering. 12. 107. <https://doi.org/10.3390/jmse12010107>.

16. Cui, Zhewen & Guan, Wei & Zhang, Xianku & Zhang, Cheng. (2023). Autonomous Navigation Decision-Making Method for a Smart Marine Surface Vessel Based on an Improved Soft Actor–Critic Algorithm. Journal of Marine Science and Engineering. 11. 1554. <https://doi.org/10.3390/jmse11081554>.

17. Liu, Qixin & Bai, Xu & Luo, Xiaofang & Yang, Li & Li, Yongzheng & Wang, Ke. (2023). Dynamic Risk Analysis of Intelligent Navigation Process Based on Dynamic Bayesian Network. Journal of Physics: Conference Series. 2491. 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2491/1/012011>.

18. Du, Yanke & Sun, Shuo & Qiu, Shi & Li, Shaoxi & Pan, Mingyang & Chen, Chi-Hua. (2021). Intelligent Recognition System Based on Contour Accentuation for Navigation Marks. Wireless Communications and Mobile Computing. <https://doi.org/10.1155/2021/6631074>.

19. Serhii, Firsov & Pishchukhina, Olga. (2018). Intelligent support of multilevel functional stability of control and navigation systems. Radio Electronics, Computer Science, Control. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-2-20>.

20. Zhen, Rong & Ye, Yingdong & Chen, Xinqiang & Xu, Liangkun. (2023). A Novel Intelligent Detection Algorithm of Aids to Navigation Based on Improved YOLOv4. Journal of Marine Science and Engineering. 11. 452. <https://doi.org/10.3390/jmse11020452>.

21. Luo, Jianping. (2024). Intelligent Stowage Expert Decision-Making System for Ro-Ro Passenger Ships. Electronics, Communications and Networks. <https://doi.org/10.3233/FAIA231186>.

22. Xue, Xingqun & Ma, Xiaochen & Jiang, Mingnan & Gao, Yang & Park, Sae. (2020). The Construction of an Intelligent Risk-Prevention System for Marine Silk Road. Applied Sciences. 10. 5044. <https://doi.org/10.3390/app10155044>.

23. Bingchan, Li & Mao, Bo & Cao, Jie. (2018). Maintenance and Management of Marine Communication and Navigation Equipment Based on Virtual Reality. Procedia Computer Science. 139. 221–226. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.10.254>.

Пономарьова В. МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СУДНОВОДІЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗПЕКОЮ РУХУ СУДНА ПО ДАНИМ ECDIS

Мета дослідження – підвищення безпеки мореплавства шляхом розробки та застосування методу інтеграції автоматизованих засобів підтримки прийняття рішень (СППР) судноводія в умовах невизначеності. Основною проблемою є високе навантаження на судноводіїв через збільшення обсягу інформації від навігаційних систем, що може призводити до помилок та аварійних ситуацій.

Основна проблема дослідження полягає у необхідності створення автоматизованої системи, яка здатна ефективно фільтрувати великий обсяг інформації та надавати судноводію лише найважливіші дані для прийняття рішень, мінімізуючи ризик помилок у складних навігаційних умовах.

Методика дослідження передбачає створення СППР судноводія на основі великих даних ECDIS та аналітики для ідентифікації суден і аналізу ризиків зіткнень, використовуючи методи розпізнавання

навігаційної інформації для оптимізації маршрутів. Дослідження проводилось на маршруті заходу у порт Лагос, Тимкан, де разом з експертом, було складено словник дій на кожному етапі маршруту, відповідно до даних ECDIS.

Результати дослідження демонструють, що застосування розробленої СППР дозволяє зменшити навантаження на судноводіїв, покращити ситуаційну обізнаність та мінімізувати ризики зіткнень. Зокрема, під час тренажерної підготовки за курсом «Навігація і лоція» з використанням навігаційних тренажерів TRANSAS Wärtsilä Navi-Sailor ECDIS, час руху судна було скорочено від 7% до 18%, що також сприяло економії паливно-мастільних матеріалів та електроенергії на судні.

Практична значущість дослідження полягає в розробці СППР, яка забезпечує фільтрацію та пріоритизацію інформації, покращуючи обізнаність про навігаційну ситуацію. Система використовує методи ідентифікації рівня небезпеки та надає згенеровані автоматичні поради.

Перспективи подальших досліджень включають вдосконалення методів інтеграції різних сенсорів, підвищення точності та надійності навігаційних систем, а також забезпечення кібербезпеки. Розширення дослідження сприятимуть більш глибокій перевірці ефективності запропонованого методу у реальних умовах морської навігації та вдосконаленням алгоритмів аналізу великих обсягів даних.

Бібл. 23, рис. 11.

Ключові слова: ECDIS; автоматизація; ризик; невизначеність; автоматизовані системи управління; інтелектуальні системи; людський фактор; безпека мореплавства; кваліфікаційні параметри; ідентифікація.

© Пономарьова V.

Статтю прийнято до редакції 26.05.2024

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОСТІЙНОСТІ СУДНА НА РЕГУЛЯРНОМУ ХВИЛЮВАННІ

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

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

Матейчук В. М., аспірант, старший викладач кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: mateichykv@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9328-0651;

Носов П. С., к.т.н., доцент, доцент кафедри судноводіння, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766.

Одним із важливих питань безпеки мореплавства є контроль остійності судна під час рейсу. Під час руху по схвильованій поверхні моря змінюється форма об'єму підводної частини корпусу судна, що призводить до постійної зміни метацентричної висоти і плеча остійності. До теперішнього часу судноводії не мають надійних розрахункових методів оперативної оцінки зниження остійності на хвилюванні. Найбільш радикальним напрямком уникнення небезпек недопустимого зниження та втрати остійності є автоматичний контроль в автоматизованих системах. Ефективна робота такого контролю забезпечується математичними моделями об'єктів або процесів, які повинні мати достатню швидкодію для можливості використання у реальному часі. У роботі розроблено аналітичну модель розрахунку відновлювального моменту у каналі крену судна для регулярного хвилювання, яка враховує геометричні розміри корпусу, параметри занурення, параметри руху судна та параметри хвилювання. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що мають аналітичний вигляд і можуть використовуватися у бортовому обчислювачі автоматизованої або автоматичної системи керування для визначення параметрів остійності судна у реальному часі. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у розробці аналітичної моделі обчислення відновлювального моменту у каналі крену на регулярному хвилюванні. Практичне значення отриманих результатів полягає у: перевірці працездатності аналітичної моделі математичним моделюванням під час проведення обчислювального експерименту та можливості використання аналітичної моделі у бортовому обчислювачі автоматизованої або автоматичної системи керування для оцінювання характеристик остійності судна у реальному часі.

Ключові слова: інтелектуальні системи транспорту; автоматичне керування; навігаційна безпека; людський чинник; остійність судна; відновлювальний момент.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.041-056

Вступ. Важливою проблемою безпеки судноплавства є значне зменшення і навіть втрата остійності суден на хвилюванні, про що свідчить статистика аварій [1]. У реальних умовах експлуатації форма об'єму підводної частини корпусу весь час змінюється, що призводить до зміни метацентричної висоти та плеча остійності до 40 % [1]. Дослідженнями встановлено, що найбільшою небезпекою для суден є зустріч з хвилею, довжина якої збігається з довжиною судна. Коли судно знаходиться на вершині хвилі (гребінь хвилі збігається із середнім шпангоутом), площа змоченої поверхні корпусу і остійність судна зменшується. На зустрічній хвилі уявний період хвилі зменшується і судно не встигає зреагувати на зниження остійності, оскільки на гребені хвилі воно знаходиться незначну частину періоду власних коливань. Плече статичної остійності значно зменшується зі збільшенням висоти хвилі. Круті хвилі небезпечніші за пологі; ймовірність втрати остійності значно зростає, коли судно знаходиться на схилі хвилі на швидкостях, менших за швидкість поширення хвилі. Керівництва та Рекомендації щодо безпечного плавання в складних погодних умовах наведені в документах ІМО [2–5], інших документах, зокрема в [6]. Проте, щоб реагувати на небезпеку відповідно до існуючих рекомендацій, її спочатку необхідно ідентифікувати, що вже є складним технічним завданням, оскільки крім зазначеної небезпеки

існують інші, які можуть призвести до перекидання судна або руйнування корпусу. Автори статті вважають, що найбільш радикальним способом уникнення небезпек є використання автоматизованих систем або модулів автоматичного керування в автоматизованих системах. Приклади використання таких систем і модулів наведені, наприклад, у роботах авторів [7–11]. Ефективне функціонування автоматизованих і автоматичних систем забезпечується математичними моделями об'єктів або процесів, які повинні мати достатню швидкодію для можливості їх використання в режимі реального часу. Тому, розробка такої моделі є актуальною науково-технічною задачею.

Об'єктом дослідження є процеси остійності судна на регулярному хвилюванні.

Предметом дослідження є розробка аналітичної моделі розрахунку остійності на регулярному хвилюванні.

Метою дослідження є зменшення ризиків перевертання судна і втрати вантажу, за рахунок постійного оцінювання остійності у бортовому обчислювачі автоматизованої системи у реальному часі.

Постановка проблеми. На рис. 1 наведено бокову проєкцію корпусу судна на регулярному хвилюванні.

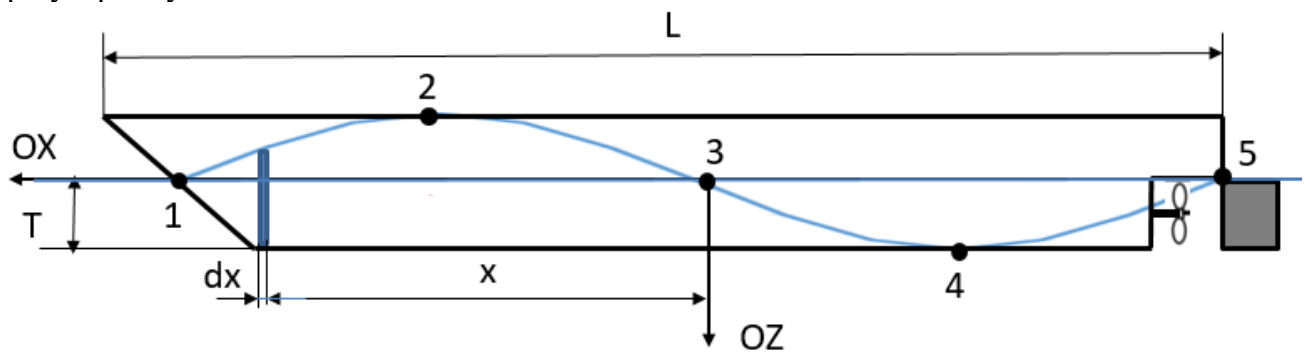


Рисунок 1 – Бокова проєкція корпусу судна на регулярному хвилюванні

Показана зв'язана із судном система координат (ЗСК) $OXOY$ та $OZOY$. Задані геометричні розміри корпусу судна: довжина L , ширина B , висота H ; параметри занурення: осадка T , кут крену θ ; параметри регулярного хвилювання: довжина хвилі λ ; параметри руху: швидкість судна V , кут набігання хвилі q на діаметральну площину судна. Необхідно розробити аналітичну модель оцінювання відновлювального моменту у каналі крену для використання у бортовому контролері з метою оцінки остійності у реальному часі

$$M_x = f(L, B, H, T, \theta, \lambda, V, q) \quad (1)$$

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питанням розробки та використання математичних моделей судна на хвилюванні присвячено багато робіт авторів. Зокрема, у статті [12] розглянуто питання математичного моделювання втрати остійності судна на хвилюванні за умови автоматичного підтримування курсу. Під час моделювання враховано гідродинамічну взаємодію корпусу, гвинта та корми судна. Проведено оцінку кренуючого моменту, створюваного здвоєними рулями та гвинтами на різних швидкостях, а також визначено характеристики гідродинамічного обтікання судна, що призводять до перекидання на критичних швидкостях.

У статті [13] розглянуто математичну модель судна з урахуванням 6 ступенів свободи, яка додатково вдосконалена для забезпечення остійності. Відновлювальний момент у каналі крену визначався в режимі реального часу з врахуванням характеристик занурення корпусу. Розраховані динамічні сили і моменти в каналах крену і рискання, з урахуванням швидкості руху.

Чисельне прогнозування процесів втрати остійності та перекидання судна досліджено в роботі [14], із врахуванням критеріїв остійності непошкодженого судна. Порівняльний аналіз результатів моделювання та проведеного експерименту показав, що різниця між ними

не перевищує 3%. Встановлено, що причиною перекидання судна стала значна втрата остійності під час вільного руху на великій швидкості.

У роботі [15] досліджено процеси розхитування судна в каналі крену та його перекидання внаслідок втрати остійності. При проведенні досліджень враховувалися модель корпусу судна, модель гвинта і система автоматичного підтримування курсу. Встановлено, що перекидання судна відбувається в поєднанні з швидкою зміною курсу, що узгоджується з результатами чинних модельних випробувань.

У роботі [16] розглянуті питання втрати остійності судна із використанням математичної моделі. Математична модель враховує параметри остійності судна на курсі та при маневруванні. При моделюванні враховувалися сили Фруда-Крилова, гідростатичні сили та хвильовий тиск навколо корпусу.

Спектр хвилювання є ключовим елементом для оцінки поведінки морського судна. У дослідженні [17] розроблено методологію та проведено імовірнісну оцінку спектру хвилювання шляхом обробки бортових вимірювань. Океанська хвиля моделювалася за допомогою 10-параметричного бімодального спектра, що поєднує довго- та короткохвильові компоненти. Десять параметрів спектра бімодальної хвилі визначалися шляхом розв'язання нелінійної задачі методом найменших квадратів, що мінімізує різницю між прогнозом моделі та даними бортових вимірювань.

У роботі [18] розроблено гібридну числову модель реакції вільного руху судна на хвилі, що підтверджено експериментальними даними. Числова модель оцінює електромеханічне перетворення енергії хвилі шляхом імітації потужності трубчастого лінійного генератора. Експерименти з рушійною силою вільної хвилі проводилися як на передній, так і на задній хвилях, використовуючи модель із пружинними закритками на носі та кормі судна в діапазоні частот хвиль.

У дослідженні [19] отримано нелінійну модель масиву суднових датчиків і показано, що напрямок хвилі та хвильове число можна ідентифікувати принаймні трьома неколінеарними датчиками шляхом аналізу результатів вимірювань. На основі отриманої моделі побудовано фільтр Калмана для оцінювання напрямку хвилі та хвильового числа, який має зручну структуру, за рахунок можливості додавання вимірювань та врахування невизначеностей. Дослідження також оцінювало параметри регулярних хвиль для судна у хвилях з малими кутами крену та диференту.

У статті [20] досліджено реакцію малих рибальських суден різного тоннажу на регулярні хвилі. На всіх досліджуваних судах виявлено збільшення амплітуди крену зі збільшенням швидкості, як за наявності зустрічної, так і бокової хвилі. На зустрічній хвилі спостерігався зсув максимального значення крену в область довгих хвиль, при збільшенні відносної швидкості руху, незалежно від розмірів судна. Встановлено, що під час плавання на зустрічних і попутних хвилях зниження швидкості судна є одним із найефективніших засобів зменшення амплітуди коливань у каналах вертикального руху та крену.

У роботі [21] розроблена модель судна для дослідження процесів маневрування та остійності на курсі. Проведено моделювання процесів маневрування на спокійній та схвильованій поверхні води. При порівнянні отриманих результатів моделювання з експериментальними даними доведено, що отримана модель судна забезпечує задовільне прогнозування процесів маневрування судна на хвилях.

У роботі [22] розроблено модель маневреного судна, яка включає кінематичну модель криволінійного руху та кінематичну модель усталеної циркуляції. Чотири сценарії, отримані шляхом поєднання розроблених моделей і алгоритмів оцінювання, порівняні з даними маневрування на навігаційному тренажері та доведена узгодженість характеристик остійності.

У статті [23] розроблено метод ідентифікації коефіцієнтів маневрування та хвильову модель на основі даних точки розвороту та параметрів руху судна на спокійній воді. Коефіцієнти маневрування оцінювалися із використанням лінійних сил Фруда-Крилова.

Порівняно з відомими рішеннями, розроблений метод показав значно кращу узгодженість з експериментальними даними як у спокійній воді, так і на попутному хвилюванні.

У кандидатській дисертації [24] автором встановлено зв'язок між: сталим рухом судна, його характеристиками мореплавності і параметрами хвилювання, представлений у вигляді нелінійної математичної моделі; формою зануреної частини перерізу корпусу та його локальною осадкою, представлений у вигляді двошарової штучної нейронної мережі; параметрами руху судна, роботою витраченою за перехід і додатковою роботою витраченою на компенсацію збуджуючих сил та зниження пов'язаного з ними ризику у вигляді інтегральної залежності; параметрами хитавиці і рівнем ризику, методами евристичного аналізу та теорії нечіткої логіки.

У статті [25] запропоновано метод визначення поперечної остійності судна на регулярних хвилях довільного напрямку. Отримано рівняння визначення осадки точок корпусу судна, розташованих на профілі хвилі, з довільним диферентом і креном судна. Для розв'язання даного рівняння розроблена спеціальна техніка відображення форми корпусу (ордината поперечного перерізу судна представлена як функція осадки). Використовуючи конфігурацію зануреної частини корпусу, визначено його об'єм, положення центру плавучості і плече відновлювального моменту.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є зменшення ризиків перевертання, втрати судна і вантажу, за рахунок постійного оцінювання остійності у бортовому обчислювачі автоматизованої системи у реальному часі. Поставлена мета досягається за рахунок використання у бортовому обчислювачі автоматизованої системи керування розробленої математичної моделі остійності судна, що дозволяє постійно контролювати остійність у реальному часі, зменшити ризики перевертання та втрати судна і вантажу. Задачі дослідження: розробка аналітичної моделі розрахунку відновлювального моменту на регулярному хвилюванні для різних варіантів занурення судна; проведення обчислювального експерименту для різних параметрів хвилювання і занурення; аналіз отриманих результатів.

Основна частина. Глибина занурення елемента dx корпусу судна, який розміщений на відстані x від центру обертання судна, рис. 1, можна записати у вигляді

$$z = T + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta(t)\right), \quad (2)$$

де T – осадка судна, A – амплітуда хвилі, $\frac{2\pi}{\lambda}$ – частота хвилі, приведена до довжини судна, λ – довжина хвилі, $\Delta(t)$ – фаза хвилі відносно початку ЗСК

$$\Delta(t) = \frac{\partial \Delta}{\partial t} t = \frac{2\pi}{T_E} t = \frac{2\pi}{\lambda} (C + V \cos q) t, \quad (3)$$

де C – швидкість поширення хвилі, V – швидкість судна, q – курсовий кут хвилі.

Після підстановки параметру $\Delta(t)$ з рівняння (3) в рівняння (2), отримуємо

$$z = T + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \frac{2\pi}{\lambda} (C + V \cos q) t\right) \quad (4)$$

На рис. 2 зображено поперечний переріз корпусу судна, для якого поверхня хвилі проходить через борти судна.

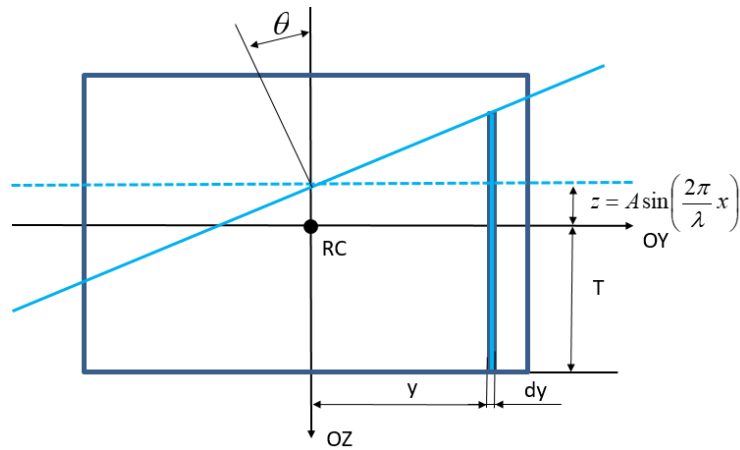


Рисунок 2 – Поперечний переріз судна у випадку проходження хвилі через борта судна

Штриховою лінією показана поверхня хвилі в місці поперечного перерізу за відсутності крену, а суцільною лінією – поверхня хвилі за наявності крену θ на правий борт. Відновлювальний момент m_x перерізу корпусу шириною dx знаходимо шляхом інтегрування відновлювального моменту елементу dy по ширині корпусу судна

$$\begin{aligned}
 m_x &= \rho g dx \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} z y dy = \rho g dx \left(\int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \left(T + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) + y \operatorname{tg} \theta \right) y dy \right) = \\
 &= \rho g dx \left(\frac{T}{2} y^2 + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) y^2 + \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} y^3 \right) \Big|_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} = \\
 &= \rho g dx \left(\frac{T}{2} \left(\frac{B^2}{4} - \frac{B^2}{4} \right) + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \left(\frac{B^2}{4} - \frac{B^2}{4} \right) + \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} \left(\frac{B^3}{8} + \frac{B^3}{8} \right) \right) = \rho g dx \frac{\operatorname{tg} \theta}{12} B^3
 \end{aligned} \quad (5)$$

Відновлювальний момент M_x всього корпусу судна визначається інтегруванням відновлювального моменту (5) по довжині судна.

$$M_x = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_x dx = \rho g \frac{\operatorname{tg} \theta}{12} B^3 x \Big|_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} = \rho g \frac{\operatorname{tg} \theta}{12} B^3 \left(\frac{L}{2} + \frac{L}{2} \right) = \rho g \frac{\operatorname{tg} \theta}{12} B^3 L \quad (6)$$

На рис. 3 зображено поперечний переріз корпусу судна, для якого поверхня хвилі проходить через борт і палубу судна, а також через борт і днище судна.

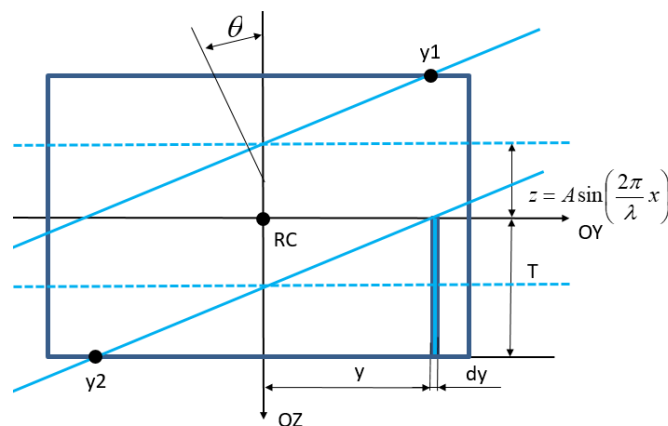


Рисунок 3 – Поперечний переріз судна у випадку проходження хвилі через борт і палубу судна та борт і днище судна

Координата точки перетину поверхні хвилі з палубою судна y_1 знаходиться з рівняння

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta y + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) &= H - T \\ y_1 &= \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} \left(H - T - A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \right), \end{aligned} \quad (7)$$

а координата точки перетину поверхні хвилі з днищем судна y_2 знаходиться з рівняння

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta y + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) &= -T \\ y_2 &= \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} \left(-T - A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Для випадку, коли хвиля перетинає лівий борт і палубу судна, відновний момент m_x елемента dx матиме вигляд

$$\begin{aligned} m_x &= \rho g dx \int_{-\frac{B}{2}}^{y_1} z y dy + \rho g dx \int_{y_1}^{\frac{B}{2}} H y dy = \rho g dx \int_{-\frac{B}{2}}^{y_1} \left(T + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) + y \operatorname{tg} \theta \right) y dy + \\ &+ \rho g dx \frac{H}{2} y^2 \Big|_{y_1}^{\frac{B}{2}} = \rho g dx \left(\frac{T}{2} y^2 + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) y^2 + \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} y^3 \right) \Big|_{-\frac{B}{2}}^{y_1} + \rho g dx \frac{H}{2} \left(\frac{B^2}{4} - y_1^2 \right) = \\ &= \rho g dx \left(\frac{T}{2} \left(y_1^2 - \frac{B^2}{4} \right) + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \left(y_1^2 - \frac{B^2}{4} \right) + \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} \left(y_1^3 + \frac{B^3}{8} \right) \right) + \\ &+ \rho g dx \frac{H}{2} \left(\frac{B^2}{4} - y_1^2 \right) = \rho g dx y_1^2 \left(\frac{T}{2} + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) - \frac{H}{2} \right) - \\ &- \rho g dx \frac{B^2}{4} \left(\frac{T}{2} + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) - \frac{H}{2} \right) + \rho g dx \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} \left(y_1^3 + \frac{B^3}{8} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

Із врахуванням системи (7), отримуємо

$$\begin{aligned} m_x &= -\frac{\rho g dx}{2} \operatorname{tg} \theta y_1^3 + \rho g dx \operatorname{tg} \theta \frac{B^2}{8} y_1 + \rho g dx \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} y_1^3 + \rho g dx \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} \frac{B^3}{8} = \\ &= \rho g dx \operatorname{tg} \theta \left(-\frac{1}{6} y_1^3 + \frac{B^2}{8} y_1 + \frac{B^3}{24} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Для $y_1 = \frac{B}{2}$, з формули (10) отримуємо формулу (5), що дотично підтверджує правильність отриманого результату

$$m_x = \rho g dx \operatorname{tg} \theta \left(-\frac{1}{6} \left(\frac{B}{2} \right)^3 + \frac{B^2}{8} \frac{B}{2} + \frac{B^3}{24} \right) = \rho g dx \operatorname{tg} \theta B^3 \left(-\frac{1}{48} + \frac{1}{16} + \frac{1}{24} \right) = \rho g dx \operatorname{tg} \theta \frac{B^3}{12} \quad (11)$$

Для знаходження відновлювального моменту M_x всього корпусу необхідно проінтегрувати рівняння (10) по довжині судна, з урахуванням формули (7)

$$M_x = \rho g \operatorname{tg} \theta \int_0^L \left(-\frac{1}{6} y_1^3 + \frac{B^2}{8} y_1 + \frac{B^3}{24} \right) dx$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \frac{B^2 L}{8} \int_0^L y_1 dx = \frac{B^2}{8} \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} \int_0^L \left(H - T - A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) \right) dx = \\
 &= \frac{B^2 (H - T)L}{8 \operatorname{tg} \theta} + \frac{B^2 A}{8 \operatorname{tg} \theta} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) \Big|_0^L = \\
 &= \frac{B^2 (H - T)L}{8 \operatorname{tg} \theta} + \frac{B^2 A}{8 \operatorname{tg} \theta} \frac{\lambda}{2\pi} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos \Delta \right)
 \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= -\frac{1}{6} \int_0^L y_1^3 dx = -\frac{1}{6} \frac{1}{\operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L \left(H - T - A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) \right)^3 dx = \\
 &= -\frac{1}{6} \frac{1}{\operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L (H - T)^3 dx + 3 \frac{(H - T)^2 A L}{6 \operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) dx - 3 \frac{(H - T) A^2 L}{6 \operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) dx + \\
 &+ \frac{1}{6} \frac{A^3 L}{\operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L \sin^3 \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) dx
 \end{aligned} \tag{13}$$

Всі інтеграли формули (13) можуть бути знайдені із використанням табличних інтегралів

$$\begin{aligned}
 \int_0^L (H - T)^3 dx &= (H - T)^3 L \\
 \int_0^L \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) dx &= -\frac{\lambda}{2\pi} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos \Delta \right) \\
 \int_0^L \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) dx &= \frac{L}{2} - \frac{\lambda}{8\pi} \left(\sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} L + 2\Delta \right) - \sin 2\Delta \right) \\
 \int_0^L \sin^3 \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) dx &= -\frac{\lambda}{2\pi} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos \Delta \right) + \frac{\lambda}{6\pi} \left(\cos^3 \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos^3 \Delta \right)
 \end{aligned} \tag{14}$$

Після підстановки табличних інтегралів (14) у формулу (13), отримуємо

$$\begin{aligned}
 I_1 &= -\frac{1}{6} \frac{1}{\operatorname{tg}^3 \theta} (H - T)^3 L + 3 \frac{(H - T)^2 A}{6 \operatorname{tg}^3 \theta} \left(-\frac{\lambda}{2\pi} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos \Delta \right) \right) - \\
 &- 3 \frac{(H - T) A^2}{6 \operatorname{tg}^3 \theta} \left(\frac{L}{2} - \frac{\lambda}{8\pi} \left(\sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} L + 2\Delta \right) - \sin 2\Delta \right) \right) + \\
 &+ \frac{1}{6} \frac{A^3}{\operatorname{tg}^3 \theta} \left(-\frac{\lambda}{2\pi} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos \Delta \right) + \frac{\lambda}{6\pi} \left(\cos^3 \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos^3 \Delta \right) \right)
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$I_3 = \int_0^L \frac{B^3}{24} dx = \frac{B^3}{24} L$$

$$M_x = \rho g \operatorname{tg} \theta (I_1 + I_2 + I_3)$$

Для випадку, коли хвиля перетинає правий борт і днище судна, відновлювальний момент m_x елемента dx матиме вигляд

$$\begin{aligned}
 m_x &= \rho g dx \int_{y_2}^{\frac{B}{2}} zy dy = \rho g dx \int_{y_2}^{\frac{B}{2}} \left(T + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) + y \operatorname{tg} \theta \right) y dy = \\
 &= \rho g dx \left(\frac{T}{2} y^2 + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) y^2 + \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} y^3 \right) \Big|_{y_2}^{\frac{B}{2}} = \\
 &= \rho g dx \left(\frac{T}{2} \left(\frac{B^2}{4} - y_2^2 \right) + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \left(\frac{B^2}{4} - y_2^2 \right) + \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} \left(\frac{B^3}{8} - y_2^3 \right) \right) = \\
 &= -\rho g dx y_2^2 \left(\frac{T}{2} + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \right) + \rho g dx \frac{B^2}{4} \left(\frac{T}{2} + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \right) + \\
 &+ \rho g dx \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} \left(\frac{B^3}{8} - y_2^3 \right) = \frac{\rho g dx \operatorname{tg} \theta}{2} y_2^3 - \rho g dx \operatorname{tg} \theta \frac{B^2}{8} y_2 - \rho g dx \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} y_2^3 + \\
 &+ \rho g dx \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} \frac{B^3}{8} = \rho g dx \operatorname{tg} \theta \left(\frac{1}{6} y_2^3 - \frac{B^2}{8} y_2 + \frac{B^3}{24} \right)
 \end{aligned}$$

16

Для $y_2 = -\frac{B}{2}$, з формули (16) отримуємо формулу (5), яка дотично підтверджує правильність отриманого результату.

$$m_x = \rho g dx \operatorname{tg} \theta \left(\frac{1}{6} \left(-\frac{B}{2} \right)^3 - \frac{B^2}{8} \left(-\frac{B}{2} \right) + \frac{B^3}{24} \right) = \rho g dx \operatorname{tg} \theta B^3 \left(-\frac{1}{48} + \frac{1}{16} + \frac{1}{24} \right) = \rho g dx \operatorname{tg} \theta \frac{B^3}{12} \quad (17)$$

Відновлювальний момент корпусу M_x знаходимо інтегруванням формули (16) по довжині судна

$$M_x = \rho g \operatorname{tg} \theta \int_0^L \left(\frac{1}{6} y_2^3 - \frac{B^2}{8} y_2 + \frac{B^3}{24} \right) dx \quad (18)$$

$$\begin{aligned}
 I_2 &= -\frac{B^2}{8} \int_0^L y_2 dx = -\frac{B^2}{8} \frac{1}{\operatorname{tg} \theta} \int_0^L \left(-T - A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \right) dx = \\
 &= \frac{B^2}{8} \frac{TL}{\operatorname{tg} \theta} - \frac{B^2}{8} \frac{A}{\operatorname{tg} \theta} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \frac{\lambda}{2\pi} \Big|_0^L = \\
 &= \frac{B^2}{8} \frac{TL}{\operatorname{tg} \theta} - \frac{B^2}{8} \frac{A}{\operatorname{tg} \theta} \frac{\lambda}{2\pi} \left(\cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta\right) - \cos \Delta \right)
 \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
 I_1 &= \frac{1}{6} \int_0^L y_2^3 dx = \frac{1}{6} \frac{1}{\operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L \left(-T - A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \right)^3 dx = -\frac{1}{6} \frac{1}{\operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L T^3 dx \\
 &- 3 \frac{T^2 A}{6 \operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) dx - 3 \frac{TA^2}{6 \operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L \sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) dx - \frac{A^3}{6 \operatorname{tg}^3 \theta} \int_0^L \sin^3\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) dx
 \end{aligned} \quad (20)$$

Після використання табличних інтегралів (14), отримуємо

$$\begin{aligned}
 I_1 = & -\frac{1}{6} \frac{1}{\text{tg}^3 \theta} T^3 L - 3 \frac{T^2 A}{6 \text{tg}^3 \theta} \left(-\frac{\lambda}{2\pi} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos \Delta \right) \right) - \\
 & - 3 \frac{TA^2}{6 \text{tg}^3 \theta} \left(\frac{L}{2} - \frac{\lambda}{8\pi} \left(\sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} L + 2\Delta \right) - \sin 2\Delta \right) \right) - \\
 & - \frac{1}{6} \frac{A^3}{\text{tg}^3 \theta} \left(-\frac{\lambda}{2\pi} \left(\cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos \Delta \right) + \frac{\lambda}{6\pi} \left(\cos^3 \left(\frac{2\pi}{\lambda} L + \Delta \right) - \cos^3 \Delta \right) \right) \\
 I_3 = & \int_0^L \frac{B^3}{24} dx = \frac{B^3}{24} L \\
 M_x = & \rho g \text{tg} \theta (I_1 + I_2 + I_3).
 \end{aligned} \tag{21}$$

На рис. 4 наведено поперечний переріз корпусу судна у випадку проходження хвилі через палубу і днище судна.

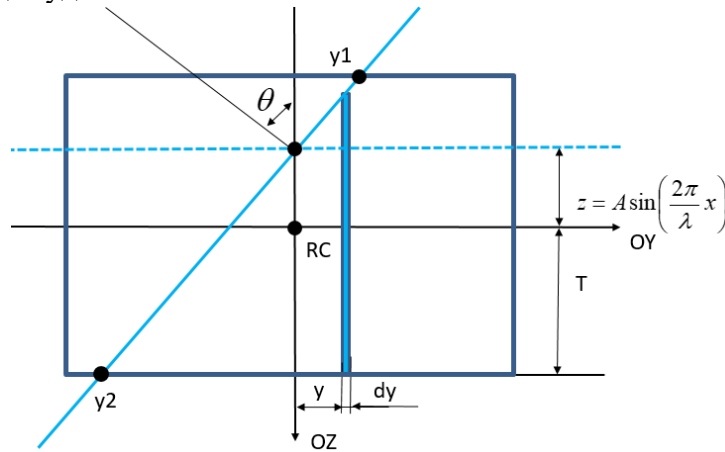


Рисунок 4 – Поперечний переріз судна у випадку проходження хвилі через палубу і днище судна

Відновлювальний момент m_x елемента dx у цьому випадку дорівнює

$$\begin{aligned}
 m_x = & \rho g dx \int_{y_2}^{y_1} z y dy + \rho g dx \int_{y_1}^{\frac{B}{2}} H y dy = \rho g dx \int_{y_2}^{y_1} \left(T + A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) + y \text{tg} \theta \right) y dy + \\
 & + \rho g dx \frac{H}{2} y^2 \Big|_{y_1}^{\frac{B}{2}} = \rho g dx \left(\frac{T}{2} y^2 + \frac{A}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) y^2 + \frac{\text{tg} \theta}{3} y^3 \right) \Big|_{y_2}^{y_1} + \rho g dx \frac{H}{2} \left(\frac{B^2}{4} - y_1^2 \right) = \\
 = & \rho g dx \left(\frac{T}{2} (y_1^2 - y_2^2) + \frac{A}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) (y_1^2 - y_2^2) + \frac{\text{tg} \theta}{3} (y_1^3 - y_2^3) \right) + \\
 & + \rho g dx \frac{H}{2} \left(\frac{B^2}{4} - y_1^2 \right) = \rho g dx y_1^2 \left(\frac{T}{2} + \frac{A}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) - \frac{H}{2} \right) - \\
 & - \rho g dx y_2^2 \left(\frac{T}{2} + \frac{A}{2} \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta \right) \right) + \rho g dx \frac{H}{2} \frac{B^2}{4} + \rho g dx \frac{\text{tg} \theta}{3} (y_1^3 - y_2^3)
 \end{aligned} \tag{22}$$

Враховуючи рівняння (7), (8), отримуємо

$$\begin{aligned}
 m_x = & -\frac{1}{2} \rho g dx y_1^3 \text{tg} \theta + \frac{1}{2} \rho g dx y_2^3 \text{tg} \theta + \rho g dx \frac{H}{2} \frac{B^2}{4} + \rho g dx \frac{\text{tg} \theta}{3} (y_1^3 - y_2^3) = \\
 = & \rho g dx \text{tg} \theta \left(-\frac{y_1^3}{6} + \frac{y_2^3}{6} \right) + \rho g dx \frac{HB^2}{8}
 \end{aligned} \tag{23}$$

Для $y_1 = \frac{B}{2}, y_2 = -\frac{B}{2}$, враховуючи, що $\frac{H}{B} = \operatorname{tg} \theta$, з формули (23) отримуємо формулу (5), що дотично підтверджує правильність отриманого результату

$$m_x = \rho g dx \operatorname{tg} \theta \left(-\frac{y_1^3}{6} + \frac{y_2^3}{6} \right) + \rho g dx \frac{H}{2} \frac{B^2}{4} = \rho g dx \operatorname{tg} \theta \left(-\frac{B^3}{48} - \frac{B^3}{48} \right) + \rho g dx \operatorname{tg} \theta \frac{B^3}{8} =$$

$$= \rho g dx \operatorname{tg} \theta B^3 \left(-\frac{1}{24} + \frac{1}{8} \right) = \rho g dx \operatorname{tg} \theta \frac{B^3}{12}$$
(24)

Відновлювальний момент корпусу M_x знаходимо інтегруванням формули (23) по довжині судна

$$M_x = \rho g \operatorname{tg} \theta \int_0^L \left(-\frac{1}{6} y_1^3 + \frac{1}{6} y_2^3 \right) dx + \rho g \frac{HB^2}{8} \int_0^L dx$$
(25)

Інтеграл $I_1 = -\frac{1}{6} \int_0^L y_1^3 dx$ та інтеграл $I_2 = \frac{1}{6} \int_0^L y_2^3 dx$ були обчислені раніше, див. формули (13) і (20).

$$I_3 = \frac{H}{2} \frac{B^2}{4} \int_0^L dx = \frac{HB^2}{8} L$$
(26)

$$M_x = \rho g \operatorname{tg} \theta (I_1 + I_2) + \rho g I_3$$
(27)

Варіанти розташування поверхні хвилі і корпусу можуть бути різними по довжині судна, тому при інтегруванні необхідно це враховувати і вибрати необхідну формулу відповідно до ситуації.

Обчислювальний експеримент. Для перевірки працездатності та ефективності аналітичної моделі проведено обчислювальний експеримент. Характеристики судна, параметри руху та турбулентність наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики судна

<i>Найменування параметра</i>	<i>Значення параметра</i>
Довжина судна L, м	100
Ширина судна B, м	13
Висота борту судна H, м	10
Осадка T, м	4
Кут крену θ , град.	10, 30, 60
Амплітуда хвилі A, м	0, 2, 4
Довжина хвилі λ , м	100

Результати обчислювального експерименту наведені на рис. 5

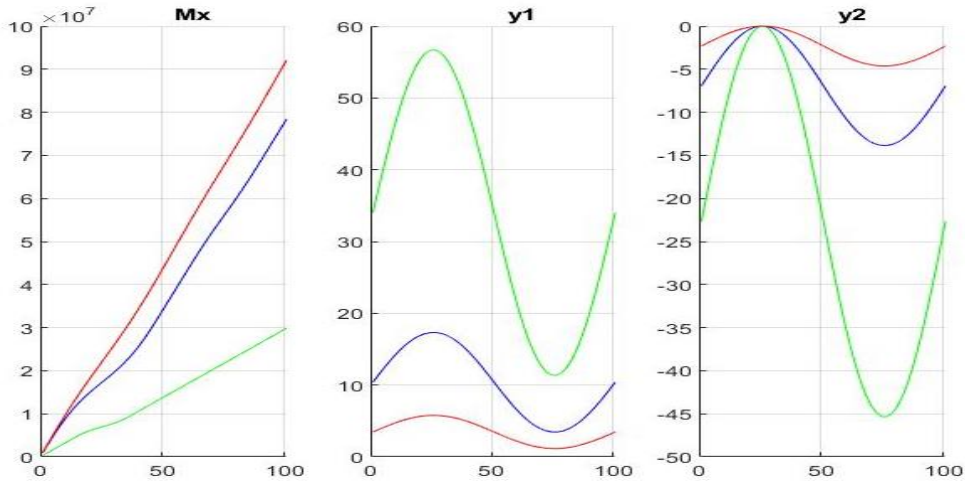


Рисунок 5 – Результати обчислювального експерименту

На графіках показано зміну відновного моменту $M_x(L)$, при інтегруванні по довжині судна, положення точки перетину поверхні хвилі з палубою судна $y_1(x)$ та положення точки перетину поверхні хвилі з днищем судна $y_2(x)$, залежно від координати поперечного перерізу, для кутів крену $\theta = 10^\circ$ (зелена крива), $\theta = 30^\circ$ (синя крива) і $\theta = 60^\circ$ (червона крива). Для характеристик судна, наведених у таблиці 1, координата лівого борту дорівнює $y_l = -\frac{B}{2} = -6.5\text{ м}$, координата правого борту дорівнює $y_r = \frac{B}{2} = 6.5\text{ м}$. Для кута крену $\theta = 10^\circ$

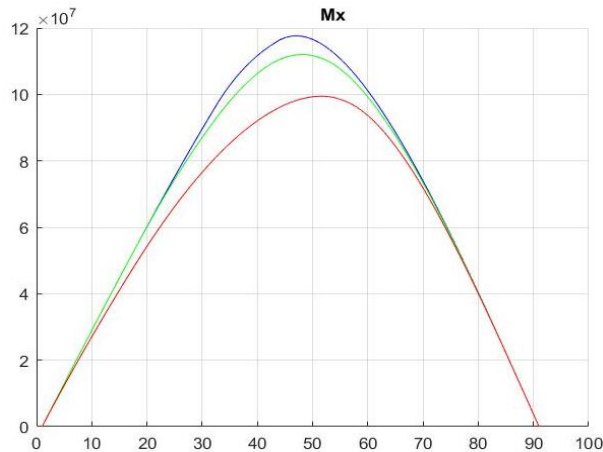


Рисунок 6 – Залежність відновлювального моменту від кута крену та амплітуди хвилі

(зелена крива): координата точки перетину поверхні хвилі з палубою судна знаходиться в діапазоні $10\text{ м} \leq y_1(x) \leq 55\text{ м}$, за межами правого борту $y_1(x) > 6.5\text{ м}$. Це означає, що поверхня хвилі по всій довжині судна перетинає правий борт; координата точки перетину поверхні хвилі з днищем судна змінюється в діапазоні $-45\text{ м} \leq y_2(x) \leq 0\text{ м}$. Залежно від координати перерізу вона може знаходитися як у межах корпусу судна, так і поза межами лівого борту. Це означає, що поверхня хвилі для різних перерізів може перетинати як днище, так і лівий борт судна. Для кута крену $\theta = 30^\circ$ (синя крива): координата точки перетину поверхні хвилі з палубою судна знаходиться в діапазоні $5\text{ м} \leq y_1(x) \leq 17\text{ м}$, тобто, залежно від координати перерізу, вона може перетинати як палубу, так і правий борт судна; координата точки перетину поверхні хвилі з днищем судна знаходиться в межах $-14\text{ м} \leq y_2(x) \leq 0\text{ м}$, тобто, в залежності від координати перерізу, вона може перетинати як дно, так і лівий борт судна. Для кута крену $\theta = 60^\circ$ (червона крива): координата точки перетину поверхні хвилі з палубою

судна знаходиться в діапазоні $0m \leq y_1(x) \leq 5m$, тобто завжди перетинає палубу судна; координата точки перетину поверхні хвилі з днищем судна знаходиться в діапазоні $-5m \leq y_2(x) \leq 0m$, тобто завжди перетинає дно судна. Зміна варіанту перетину призводить до зміни величини відновлювального моменту m_x елемента dx та інтенсивності накопичення моменту $M_x(x)$ під час інтегрування. Загальний відновлювальний момент M_x для кута крену $\theta = 10^\circ$ становить $M_x = 3.0 \times 10^7$ Нм, для кута крену $\theta = 30^\circ$ становить $M_x = 7.8 \times 10^7$ Нм, для кута крену $\theta = 60^\circ$ становить $M_x = 9.2 \times 10^7$ Нм. Залежності відновлювального моменту $M_x(\theta)$ від кута крену для амплітуд хвиль $A = 0m$ (синій графік), $A = 2m$ (зелений графік) та $A = 4m$ (червоний графік) наведені на рис. 6.

На рис. 7 показана залежність відновлювального моменту M_x у каналі крену від зміщення хвилі $\Delta(t)$ відносно корпусу судна, див. рівняння (3), для кутів крену $\theta = 10^\circ$, $\theta = 30^\circ$, $\theta = 60^\circ$.

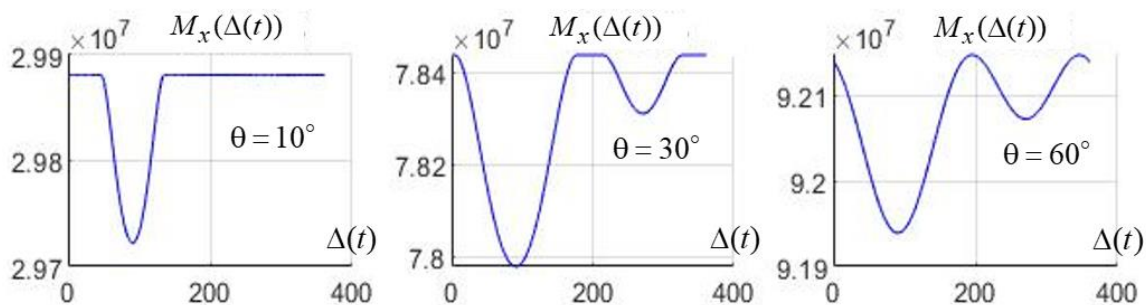


Рисунок 7 – Залежність відновлювального моменту M_x від зміщення хвилі $\Delta(t)$ та кута крену

Як видно з графіків, відновлювальний момент змінюється в залежності від фази хвилі (положення хвилі) відносно корпусу судна, найменше значення він має для фази хвилі $\Delta(t) = 90^\circ$ та $\Delta(t) = 270^\circ = -90^\circ$, коли судно знаходиться на гребні хвилі. Періодична зміна відновлювального моменту є причиною такого небезпечного явища, як параметричний резонанс.

На рис. 8 показано залежність відновлювального моменту $M_x(\lambda)$ від довжини хвилі, для кута крену $\theta = 10^\circ$.

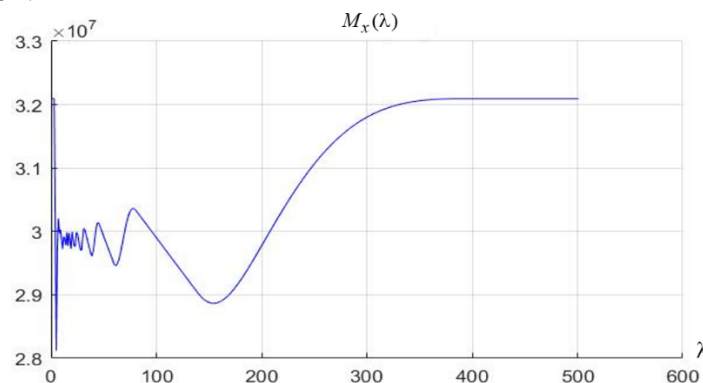


Рисунок 8 – Залежність відновлювального моменту $M_x(\lambda)$ від довжини хвилі

Як видно з отриманих результатів, залежність моменту відновлення від довжини хвилі має незначні коливання з амплітудою до 0,7% для довжин хвиль менше третини довжини судна, амплітуда зростає до 3% для довжини хвилі, що дорівнює довжині судна. Для довжин хвиль, які в кілька разів перевищують довжину судна, відносне збільшення відновлювального моменту становить близько 7%.

Основні результати та їх обговорення. Розроблено аналітичну модель розрахунку відновлювального моменту судна в каналі крену, яка дозволяє оцінювати остійність судна на регулярному хвилюванні. Розроблена аналітична модель може використовуватися при лабораторних дослідженнях остійності на регулярному хвилюванні, а також у бортовому обчислювачі автоматизованої системи керування рухом судна, що дозволить постійно, на кожному кроці бортового обчислювача, оцінювати остійність судна, зменшити, за рахунок цього, ризику перекидання, втрати судна і вантажу. Можливість використання аналітичної моделі у бортовому обчислювачі пояснюються незначними вимогами до обчислювальних потужностей. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що дозволяють автоматизувати процеси контролю остійності на регулярному хвилюванні, зменшити вплив людського чинника та підвищити безпеку мореплавства. Отримані результати є відтворюваними і можуть використовуватися при розробці автоматизованих та автоматичних систем.

Висновки. Розроблено аналітичну модель розрахунку відновлювального моменту у каналі крену, яка дозволяє постійно оцінювати остійність судна на регулярному хвилюванні у реальному часі. Отримані результати пояснюються можливістю використання аналітичної моделі у бортовому обчислювачі автоматизованої системи керування. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у розробці аналітичної моделі розрахунку відновлювального моменту на регулярному хвилюванні, яка враховує геометричні розміри судна, параметри занурення, параметри хвилювання та параметри руху судна і хвиль. Практичне значення отриманих результатів полягає у перевірці її працездатності під час обчислювального експерименту, можливості застосування для лабораторних досліджень та у бортовому обчислювачі автоматизованої / автоматичної системи керування рухом, що дозволяє автоматизувати процеси контролю остійності під час виконання рейсу, зменшити вплив людського чинника на процеси оцінювання, зменшити ризику перевертання судна та втрати вантажу, підвищити безпеку судноплавства в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Why do ships built in compliance with the laws of stability capsize? *Boats and yachts*, №113, 1985.
2. Recommendation on intact stability for passenger and cargo ships under 100 meters in length, IMCO RESOLUTION A.167 (ES.IV) adopted on 28 November 1968.
3. Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas, IMO MSC/Circ.707. Ref. T1/2.04/ 1995.
4. Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 meters in length and over, IMO RESOLUTION A.562(14) adopted on 20 November 1985.
5. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions, IMO MSC.1/Circ.1228 2007, 8 p.
6. Capt. Takuzo Okada. Marine Weather Ship Handling in Rough Sea, *Japan P&I Club. P&I Loss Prevention Bulletin* 45, 2019, 100 p.
7. Nosov P, Koretsky O., Zinchenko S., Prokopchuk Yu., Gritsuk I., Sokol I., Kyrychenko K. Devising an approach to safety management of vessel control through the identification of navigator's state, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023, Vol. 4(3(124)), p.19–32. <https://doi.org/10.15587/1720-4061.2023.286156>.
8. Zinchenko S., Kobets V., Tovstokoryi O., Kyrychenko K., Nosov P., Popovych I, Control of the Pivot Point Position of a Conventional Single-Screw Vessel, *CEUR-WS.org*, 2023, Vol. 3513, P.130–140, (ICST-2023). <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper11.pdf>.
9. Zinchenko S., Kyrychenko, K., Grosheva, O., Nosov, P., Popovych, I., Mamenko, P. Automatic reset of kinetic energy in case of inevitable collision of ships, *IEEE Xplore*, p. 496-500,

13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland. <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275545>.

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

11. Krugliy D. G., Appazov E. S., Zinchenko S. M., Nosov, P. S. Choice of the Fractal Method For Visualization of Input Data While Designing Support Systems for Decision-Making by Navigator. *Sci. in nov.* 2021. V. 17, no. 5. P. 63–72. <https://doi.org/10.15407/scine17.05.063>.

12. Zeng K., Lu J., Gu M., Chen Y. A Comparative Analysis of CFD and the Potential Flow Method for the Pure Loss of Stability in Following Waves. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023, 11(11), November 2135. <https://doi.org/10.3390/jmse11112135>.

13. Lu J., Gu M. Evangelos Boulougouris. Further Study on One of the Numerical Methods for Pure Loss of Stability in Stern Quartering Waves. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023, 11(2), 394. <https://doi.org/10.3390/jmse11020394>.

14. Liu L., Yao Ch., Feng D., Wang X., Yu J., Chen M. Numerical study of the interaction between the pure loss of stability, surf-riding, and broaching on ship capsizing. *Ocean Engineering*. 2022, 266(4), 112868. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112868>.

15. Liu L., Feng D., Wang X., Zhang Zh., Yu J., Chen M. Study on extreme roll event with capsizing induced by pure loss of stability for the free-running ONR Tumblehome. *Ocean Engineering*. 2022, 257(4), 111656. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111656>.

16. Lu J., Gu M. A Unified Numerical Method for Broaching and Loss of Stability in Astern Seas. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022, 11(8):1555. <https://doi.org/10.3390/jmse11081555>.

17. Park M., Kim Y. Probabilistic estimation of directional wave spectrum using onboard measurement data. *Journal of Marine Science and Technology*. 2023, Vol. 29, p. 200–220 <https://doi.org/10.1007/s00773-023-00984-z>.

18. Bowker J. Coupled dynamics of a flapping foil wave powered vessel. *A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy*. 2018, 251 p.

19. Dirdal J. A., Skjetne R., Rohac J., Fossen T. I. Online wave direction and wave number estimation from surface vessel motions using distributed inertial measurement arrays and phase-time-path-differences. *Ocean Engineering*. 2023, 249(3). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110760>.

20. Im N., Lee S. A Study on Motion Response of Small Fishing Vessels According to Various Tonnage in Regular Waves. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*. 2021, 27(6):832-838. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2021.27.6.832>.

21. Xie Zh., Falzarano J., Wang H. A Framework of Numerically Evaluating a Maneuvering Vessel in Waves. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2023, 8(392):392. <https://doi.org/10.3390/jmse8060392>.

22. Wang Y., Perera L., Batalden B. Kinematic motion models based vessel state estimation to support advanced ship predictors. *Ocean Engineering*. 2023, Volume 286, Part 1, 15, 115503. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115503>.

23. Araki M., Sadat H., Sanada Yu., Umeda N., Stern F. Improved Maneuvering-Based Mathematical Model for Free-Running Ship Motions in Following Waves Using High-Fidelity CFD Results and System-Identification Technique: Risk of Capsizing, *Fluid Mechanics and its Applications*. 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00516-0_6.

24. Піпченко О. Д. Оптимізація керування рухом судна в штормових умовах, кандидатська дисертація, Одеська національна морська академія, 2010.

25. Pipchenko, O. D. On the method of calculation of ship's transverse stability in regular waves, *Ships and Offshore Structures*, Vol.4, Issue 1, <https://doi.org/10.1080/17445300802402579>.

REFERENCES

1. Why do ships built in compliance with the laws of stability capsize? *Boats and yachts*, №113, 1985.
2. Recommendation on intact stability for passenger and cargo ships under 100 meters in length, IMCO RESOLUTION A.167 (ES.IV) adopted on 28 November (1968).
3. Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas, IMO MSC/Circ.707. Ref. T1/2.04/ (1995).
4. Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 meters in length and over, IMO RESOLUTION A.562(14) adopted on 20 November (1985).
5. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions, IMO MSC.1/Circ.1228 (2007), 8 p.
6. Capt. Takuzo Okada (2019). *Marine Weather Ship Handling in Rough Sea*, Japan P&I Club. P&I Loss Prevention Bulletin 45, 100 p.
7. Nosov, P., Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Yu., Gritsuk, I., Sokol, I., Kyrychenko, K. (2023). Devising an approach to safety management of vessel control through the identification of navigator's state, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(3(124)),19–32. <https://doi.org/10.15587/1720-4061.2023.286156>.
8. 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>.
9. Zinchenko, S., Kyrychenko, K., Grosheva, O., Nosov, P., Popovych, I., Mamenko, P. (2023). Automatic reset of kinetic energy in case of inevitable collision of ships, *IEEE Xplore*, p. 496–500, 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland. <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275545>.
10. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I. (2023). Intelligent System Control of the Vessel Executive Devices Redundant Structure, *CEUR Workshop Proceedings*, Vol-3403, pp. 582–594. <https://ceur-ws.org/Vol-3403/>.
11. Krugliy, D. G., Appazov, E. S., Zinchenko, S. M., and Nosov, P. S. (2021). Choice of the Fractal Method For Visualization of Input Data While Designing Support Systems for Decision-Making by Navigator. *Sci. in nov.* 2021. V. 17, no. 5. P. 63–72. <https://doi.org/10.15407/scine17.05.063>.
12. Zeng, K., Lu, J., Gu, M., Chen, Y. (2023). A Comparative Analysis of CFD and the Potential Flow Method for the Pure Loss of Stability in Following Waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(11), November 2135. <https://doi.org/10.3390/jmse11112135>.
13. Lu, J., Gu, M. Evangelos Boulougouris. (2023). Further Study on One of the Numerical Methods for Pure Loss of Stability in Stern Quartering Waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(2), 394. <https://doi.org/10.3390/jmse11020394>.
14. Liu, L., Yao, Ch., Feng, D., Wang, X., Yu, J., Chen, M. (2022). Numerical study of the interaction between the pure loss of stability, surf-riding, and broaching on ship capsizing. *Ocean Engineering*, 266(4), 112868. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112868>.
15. Liu, L., Feng, D., Wang, X., Zhang, Zh., Yu, J., Chen, M. (2022). Study on extreme roll event with capsizing induced by pure loss of stability for the free-running ONR Tumblehome. *Ocean Engineering*, 257(4), 111656. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111656>.
16. Lu, J., Gu, M. (2023). A Unified Numerical Method for Broaching and Loss of Stability in Astern Seas. *Journal of Marine Science and Engineering* 11(8):1555 <https://doi.org/10.3390/jmse11081555>.
17. Park, M., Kim, Y. (2024). Probabilistic estimation of directional wave spectrum using onboard measurement data. *Journal of Marine Science and Technology*. Vol. 29, p. 200–220 <https://doi.org/10.1007/s00773-023-00984-z>.

18. Bowker, J. (2018). Coupled dynamics of a flapping foil wave powered vessel. A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, 251 p.

19. Dirdal, J.A., Skjetne, R., Rohac, J., Fossen, T.I. (2022). Online wave direction and wave number estimation from surface vessel motions using distributed inertial measurement arrays and phase-time-path-differences. *Ocean Engineering*, 249(3). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110760>.

20. Im, N., Lee, S. (2021). A Study on Motion Response of Small Fishing Vessels According to Various Tonnage in Regular Waves. *Journal of the Korean Society of Marine Environment and Safety*. 27(6):832-838. <https://doi.org/10.7837/kosomes.2021.27.6.832>.

21. Xie, Zh., Falzarano, J., Wang, H. (2020). A Framework of Numerically Evaluating a Maneuvering Vessel in Waves. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(392):392. <https://doi.org/10.3390/jmse8060392>.

22. Wang, Y., Perera, L., Batalden, B. (2023). Kinematic motion models based vessel state estimation to support advanced ship predictors. *Ocean Engineering*. Volume 286, Part 1, 15, 115503. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115503>.

23. Araki, M., Sadat, H., Sanada, Yu., Umeda, N., Stern, F. (2019). Improved Maneuvering-Based Mathematical Model for Free-Running Ship Motions in Following Waves Using High-Fidelity CFD Results and System-Identification Technique: Risk of Capsizing. *Fluid Mechanics and its Applications*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00516-0_6.

24. Pipchenko, O. D. (2010). Optimization of vessel movement control in stormy conditions, PhD Thesis, Odesa National Maritime Academy.

25. Pipchenko, O. D. (2009). On the method of calculation of ship's transverse stability in regular waves, *Ships and Offshore Structures*, Vol.4, Issue 1, <https://doi.org/10.1080/17445300802402579>.

Zinchenko S. M., Tovstokoryi O. M., Mateichuk V. M., Nosov P. S. MATHEMATICAL MODEL OF VESSEL STABILITY ON REGULAR WAVES

One of the important issues of shipping safety is a significant decrease and even loss of stability of ships in waves, as evidenced by accident statistics. In real operating conditions, the shape of the volume of the underwater part of the ship's hull changes all the time, which leads to changes in the metacentric height and stability shoulder up to 40%. Research has established that the greatest danger for ships is an encounter with a wave whose length coincides with the length of the ship. Guidelines and Recommendations for safe sailing in adverse weather conditions are provided in IMO documents. However, in order to respond to hazards in accordance with existing guidelines, the hazards must first be identified, which is already a difficult technical task, since, in addition to the specified hazard, there are other hazards that can lead to a capsizing of the ship or a collapse of the hull. According to the authors of the article, the most radical way to avoid dangers is to utilize automated systems or automatic control modules in automated systems. Effective functioning of automated and automatic systems is ensured by mathematical models of objects or processes, which must have sufficient speed for the possibility of their use in real time. Therefore, the development of such a model is an urgent scientific and technical task. The work developed an analytical model for calculating the restoring moment of the vessel in the roll channel, which allows to estimate the stability of the vessel on regular waves. The developed analytical model can be used both in laboratory studies on stability on regular waves, and in the on-board computer of the automated ship motion control system, which will allow to constantly, at each step of the on-board computer, assess the stability of the ship, thereby reducing the risks of capsizing, loss of the ship and cargo. The possibility of using the analytical model in the on-board computer is explained by the small requirements for computing power. The obtained results differ from the known solutions in that they allow to automate the stability control processes on regular waves, reduce the influence of the human factor and increase the safety of navigation.

Key words: intelligent transport systems; navigation safety; human factor; loss of stability; regular disturbance; restoring moment.

© Зінченко С. М., Товстокорій О. М., Матейчук В. М., Носов П. С.

Статтю прийнято до редакції 27.05.2024

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРОБКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНИМ ПАТРУЛЬНИМ КАТЕРОМ ДЛЯ ОХОРОНИ МІЛКОВОДНОЇ ЗАХИЩЕНОЇ АКВАТОРІЇ

Надточій В. А., к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматики та електроустаткування Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна, e-mail: nva074@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3869-3546;

Бурунін А. П., аспірант кафедри автоматики та електроустаткування Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна, e-mail: splashbox98@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1017-9766.

Безекіпажні патрульні катери є одним з видів надводних засобів морської робототехніки. Вони здатні виконувати широкий спектр прикладних охоронних задач на мілководних акваторіях, які охороняються. Дослідження наукових проблем їх створення відносяться до спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» галузі знань «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації». Дослідження присвячене розробці узагальненої функціональної схеми системи автоматичного керування основними режимами роботи безекіпажного патрульного катера. Такі катери використовуються як носії засобів морської робототехніки, призначеної для висвітлення надводної, підводної та повітряної обстановки на захищеній акваторії. Для дослідження використано методологію аналізу науково-технічної літератури та основи системного підходу до складання переліку режимів роботи безекіпажного патрульного катера. Сформована множина основних режимів функціонування катера включає базовий перелік операцій катера. Множина задач системи керування катером охоплює керування виконавчими механізмами катера та його корисного вантажу, безпечну електронну навігацію та задачі діагностування. Узагальнена функціональна схема системи автоматичного керування катером утворює теоретичну основу для синтезу алгоритмічного забезпечення системи керування катером та корисним вантажем.
Ключові слова: безекіпажний патрульний катер; система автоматичного керування; режими роботи; головні задачі керування; узагальнена функціональна схема системи автоматичного керування.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.057-066

Вступ. Безекіпажні надводні судна на цей час широко застосовуються промислово розвиненими морськими країнами у господарській діяльності. Спектр їх застосування з кожним роком розширюється і сьогодні охоплює морські транспортні перевезення, морські наукові дослідження та природоохоронні роботи [1, 2].

У порівнянні з традиційними суднами безекіпажні надводні судна мають наступні переваги [3, 4]:

- можливість виконувати більш тривалі за часом та небезпечні для життя і здоров'я членів екіпажів морські місії;
- нижчі витрати на технічне обслуговування суден;
- менші витрати та утримання екіпажів (тільки береговий технічний персонал);
- низькі масогабаритні характеристики безекіпажних надводних суден, що забезпечує їм високу маневреність і можливості застосування на мілководних акваторіях;
- потенційно більша вантажопідйомність, оскільки на борту безекіпажних надводних суден немає систем життєзабезпечення для екіпажів суден;
- можливість дистанційно виконувати типові морські операції.

Наведений вище перелік переваг безекіпажних надводних суден над традиційними суднами обумовлює актуальність їх застосування для охорони мілководних морських, річкових та озерних акваторій, на яких розташовані об'єкти морської критичної інфраструктури та проводиться промислово-господарська діяльність держави.

Постановка проблеми. На цей час завдання охорони мілководних акваторій держави від загроз з моря традиційно виконується береговими технічними засобами, які контролюють

тільки надводну та повітряну обстановку над акваторією, яка охороняється. Подальше вдосконалення техніки прихованого порушення меж таких акваторій з боку зловмисників вимагає подальшого вдосконалення технічних засобів охорони акваторій від підводних загроз. Тому актуальним є системний підхід до розробки і створення спеціальних засобів морської робототехніки, які б мали змогу контролювати всі три складові захищеної акваторії – повітряну, надводну і підводну.

Такий підхід може бути реалізований за допомогою безкіпажних малорозмірних суден – безкіпажних патрульних катерів (БПК, в англійській літературі – Unmanned Patrol Boat, UPB), оснащених приладами та системами висвітлення надводної, підводної та повітряної обстановки на захищеній акваторії, а також системами зв'язку та дистанційного контролю й керування БПК.

Одним з ключових завдань при створенні такого виду морських рухомих об'єктів є завдання синтезу систем керування БПК, які б забезпечували ефективно та безаварійне використання таких катерів в інтересах держави.

Очевидно, що успішне виконання цього завдання можливе при одночасному врахуванні низки вимог, обумовлених режимами роботи та особливостями автоматичного керування виконавчими механізмами БПК, які забезпечують його функціонування та експлуатуються безвахтовим методом, а також обумовлених невизначеностями умов зовнішнього морського середовища (наявністю зовнішніх збурень – вітру, хвиль та течій) [5, 6].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Історично першим патентом щодо побудови безкіпажного надводного судна (БНС) був патент Ніколо Тесли у 1898 року [7]. На початку ХХ сторіччя у Німеччині були побудовані радіокеровані БНС, які використовувались у Першій світовій війні [8].

У Другій світовій війні БНС використовувались як засіб доставки вибухівки для знищення надводних кораблів на Середземному морі [9].

Наприкінці ХХ сторіччя в Ізраїлі було створено низку БНС для автоматизації операцій з охорони морського узбережжя та акваторій портів [10, 11].

Генеральний план створення БНС для потреб військово-морського флоту США було розроблено у 2006 році [12], а з 2012 року в рамках європейської програми “MUNIN” розпочались прикладні наукові дослідження щодо розробки концепції керування БНС та оцінки технічної, економічної та правової складових їх використання [13].

У наступні роки у провідних морських країнах світу було започатковано спеціальні проекти з розробки теорії БНС, їх проектуванню і будівництву [14–18]. До таких програм, у першу чергу, можна віднести: проєкт «Advanced Autonomous Waterborne Applications» (AAWA) [19, 20], проєкт “AUTOSEA” [21], проєкт “Hull-to-Hull” [22] та інші проекти і програми, у результаті реалізації яких на сьогодні у всьому світі для науково-дослідницьких завдань, природоохоронних та аварійно-рятувальних морських робіт використовується вже понад 1000 БНС [23–27].

Тому безкіпажні патрульні катери, призначені для моніторингу надводної, підводної та повітряної обстановки акваторій, що охороняються, є перспективним видом морської робототехніки, а розробка систем автоматичного керування ними відноситься до актуальних завдань їх створення.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є розробка узагальненої функціональної схеми системи автоматичного керування (САК) основними режимами роботи безкіпажного патрульного катера як носія засобів морської робототехніки, яка призначена для висвітлення надводної, підводної та повітряної обстановки на захищеній акваторії. Для досягнення поставленої мети необхідно сформулювати множину основних режимів функціонування безкіпажного патрульного катера та множину головних задач, які має реалізувати його система автоматичного керування.

Методи дослідження. У процесі роботи використано методологію наукового аналізу науково-технічної літератури для визначення переваг безкіпажної морської техніки і доцільності її створення для задач патрулювання захищених акваторій та основи системного підходу до оцінки безкіпажного патрульного катера як об'єкту керування з позицій цілісної множини відношень і зв'язків між множинами режимів його роботи та головних задач функціонування катера при виконанні морських місій.

Основні результати та їх обговорення. Попередній аналіз завдань для БПК, які вони мають виконувати на акваторіях, що охороняються, свідчить про їх різноманіття та складність, оскільки ці завдання включають:

- безпечну автоматичну навігацію (е-навігацію [27]) на акваторіях, для яких характерними є вітро-хвильові збурення і течії та які містять статичні та динамічні навігаційні завади;

- висвітлення морської обстановки в трьох середовищах – надводному, підводному та повітряному, що вимагає оснащення катерів відповідними системами сенсорів та засобами морської робототехніки (для оперативного вимірювання параметрів цих середовищ) і розробки систем автоматизованого та/чи автоматичного керування ними;

- застосування корисного вантажу – бортових засобів морської робототехніки (малорозмірних катерів, підводних апаратів та літальних апаратів коптерного типу) для оперативного обстеження великих за площею акваторій та підвищення продуктивності морських місій БПК;

- оснащення БПК надійними системами зв'язку з береговими центрами керування (для передачі отриманої інформації у реальному часі).

Як об'єкти автоматизації БПК відносяться до морських рухомих об'єктів, яким притаманні високі швидкості руху (50 вузлів і більше) та високі акселеративні характеристики руху.

Крім того, оскільки БПК є носіями інших засобів морської робототехніки, такі катери повинні мати ще дві функціональні властивості:

- можливість позиціонування в точці (для спуску на воду та підйому з води корисного вантажу);

- можливість рухатись з малими швидкостями (3–5 вузлів), які необхідні для застосування корисного вантажу за призначенням (наприклад, для роботи з прив'язними підводними апаратами різних типів).

Зазвичай, БПК застосовуються на морських та річкових акваторіях з обмеженими навігаційними умовами, що вимагає застосування САК великої точності. Часто від САК вимагається рух катера по заданій траєкторії з високою точністю для роботи з деякими видами корисного вантажу (наприклад, з буксируваними та самохідними прив'язними підводними апаратами), а також підтримання сталої швидкості руху БПК.

У цілому, виходячи з основних завдань експлуатації БПК та з урахуванням [17] можна сформулювати основні режими його функціонування при повній автоматизації:

- берегова підготовка БПК до виконання місії – автоматичне діагностування виконавчих механізмів БПК R_{DBI} та автоматизоване діагностування виконавчих механізмів корисного вантажу R_{DCI} перед початком виконання місії;

- автоматичний чи автоматизований (під керуванням берегового оператора) вихід БПК R_{SM} у стартову точку маршруту місії;

- автоматичний постійний контроль працездатності R_{DW} виконавчих механізмів самого БПК та його корисного вантажу у процесі їх застосування за призначенням;

- автоматичний траєкторний рух БПК R_{TI} під час переходу до робочої акваторії для виконання місії;

– автоматичний чи автоматизований маневровий рух БПК R_M при його знаходженні в робочій зоні акваторії та/чи автоматична просторова стабілізація нерухомого БПК R_S на заданій акваторії під час застосування корисного вантажу за його призначенням;

– автоматизоване або автоматичне забезпечення застосування бортового корисного вантажу за призначенням R_{AU} (наприклад, запуск та прийом безекіпажних літальних апаратів коптерного типу, спуск на воду прив'язних та автономних ненаселених підводних апаратів, керування їх роботою та підйом їх на борт БПК після завершення їх місії);

– автоматичний рух БПК R_{NM} по траєкторії переходу на нову акваторію чи рух до кінцевої точки маршруту, у якій місія буде завершена;

– автоматичне чи автоматизоване повернення БПК R_{FM} до бази;

– берегові операції БПК після виконання місії – автоматичне діагностування БПК R_{DB2} та його корисного вантажу R_{DC2} після завершення місії.

Таким чином, множина R_{UPB} основних режимів функціонування БПК містить наступні складові:

$$R_{UPB} = \{R_{DB1}; R_{DC1}; R_{SM}; R_{DW}; R_{TI}; R_M; R_S; R_{AU}; R_{NM}; R_{FM}; R_{DB2}; R_{DC2}\}. \quad (1)$$

Зазначимо, що під час виконання морської частини місії на БПК та його корисний вантаж будуть діяти зовнішні збурення, які можна представити векторами сил вітру \vec{F}_{Wn} , хвиль \vec{F}_{Wv} та течії \vec{F}_V , що діють на конструкції БПК та засобів морської робототехніки, які застосовуються з його борту як носія такої робототехніки. Крім того, при синтезі САК БПК слід враховувати інформацію про виникнення перешкод навігаційного походження (сигнали від стаціонарних навігаційних знаків, сигнали про наявність інших суден та параметри їх руху тощо).

Узагальнюючи все вище сказане, констатуємо, що до головних задач, які висувуються до САК БПК, необхідно віднести:

– задачу T_N безпечної навігації БПК у режимах $R_{SM}, R_{TI}; R_M; R_S; R_{AU}; R_{NM}; R_{FM}$;

– задачу T_E автоматичного керування бортовими джерелами енергії БПК (двигунами внутрішнього згоряння чи іншими джерелами енергії);

– задачу T_P автоматичного керування головними та допоміжними (підрулюючими) рушійними пристроями БПК;

– задачу T_R автоматичного керування кермовим пристроєм БПК (кермом, насадкою);

– задачу T_C автоматичного керування корисним вантажем БПК;

– задачу T_D автоматичного та/чи автоматизованого контролю працездатності) обладнання БПК та його корисного вантажу (режими $R_{DB1}, R_{DC1}, R_{DW}; R_{DB2}, R_{DC2}$).

Множина T_{UPB} головних задач САК БПК має вигляд:

$$T_{UPB} = \{T_N; T_E; T_P; T_R; T_C; T_D\}. \quad (2)$$

Кожна з цих задач потребує розробки відповідних методів синтезу САК, математичних моделей функціонування та алгоритмічного забезпечення, а також їх практичної апробації. Успішний розв'язок задач множини (2) дасть змогу забезпечити високу ефективність застосування БПК як мобільної платформи для засобів морської робототехніки різних типів, що знаходяться на його борту.

Виходячи з аналізу множини (1) основних режимів функціонування БПК R_{UPB} та множини (2) головних задач САК БПК T_{UPB} , можна запропонувати наступну узагальнену функціональну схему системи автоматичного керування БПК (рис. 1).

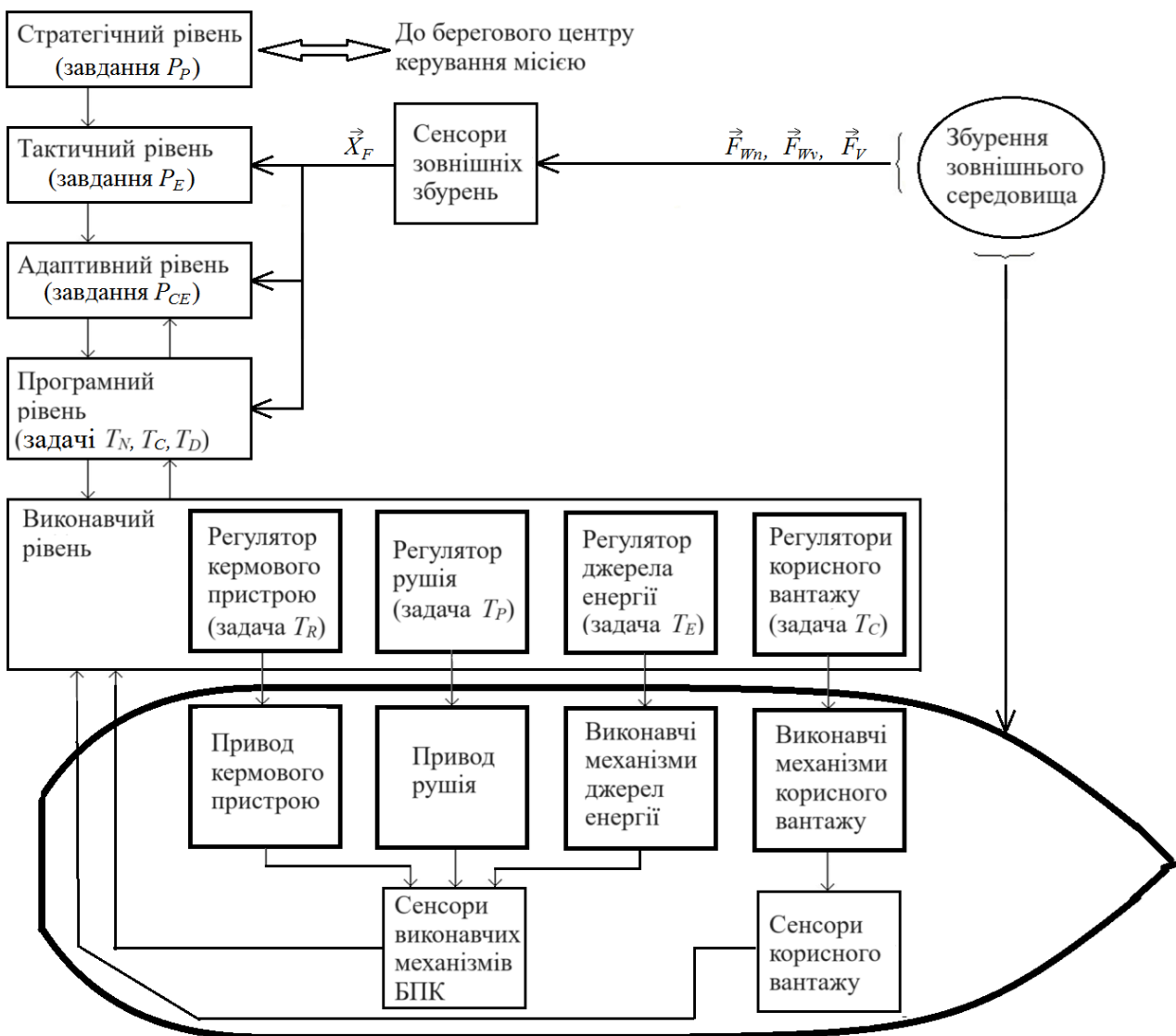


Рисунок 1 – Узагальнена функціональна схема системи автоматичного керування БПК

Як бачимо, узагальнена функціональна схема системи автоматичного керування БПК є багаторівневою і містить п'ять основних рівнів – виконавчий, програмний, адаптивний, тактичний і стратегічний.

Розглянемо вказані рівні більш детально.

Виконавчий рівень реалізує керування окремими виконавчими механізмами БПК та його корисного вантажу в основних режимах його функціонування згідно (1). На цьому рівні відбувається керування приводами кермового та рушійного пристроїв, насосами, компресорами, вентиляторами тощо (задачі T_E , T_P , T_R).

Крім того, на цьому рівні відбувається керування виконавчими механізмами корисного вантажу (задача T_C) – приводами пристроїв, які забезпечують його використання за призначенням (приводами автоматичних спуско-піднімальних пристроїв для бортових засобів морської робототехніки, приводами замків та фіксаторів цих засобів, кришок контейнерів та іншого палубного устаткування).

На програмному рівні САК БПК забезпечує керування окремими елементарними операціями, які забезпечують контрольований просторовий рух БНС (задача T_N) та керування його корисним вантажем (задача T_C). Це реалізується за допомогою вбудованих керуючих програм, які здійснюють узгоджене функціонування виконавчих механізмів БНС та корисного вантажу. Тут виконується аналіз інформації про зовнішнє середовище та поточний технічний стан виконавчих механізмів БНС і корисного вантажу (задача T_D), оперативно формуються команди керування, які забезпечують виконання базових

технологічних операцій катера та контроль за їх виконанням. Зазначені команди керування генеруються згідно до поставлених верхніми рівнями завдань (вибір траєкторій просторового руху БПК, планування руху виконавчих механізмів корисного вантажу тощо).

Таким чином, два нижніх рівні функціональної схеми системи автоматичного керування БПК виробляють команди керування для виконавчих механізмів БНС та його корисного вантажу. Для цих рівнів вхідною інформацією є сигнали від стратегічного, тактичного та адаптивного рівнів керування, а також сигнали від системи внутрішнього контролю обладнання катера та корисного вантажу (задача T_D), які надходять від відповідних сенсорів контролю технічного стану їх виконавчих механізмів.

Розглянемо тепер сутність завдань, розв'язок яких реалізується на трьох верхніх рівнях керування.

На стратегічному рівні керування морською місією БПК розв'язується первісне завдання – загальне планування місії P_P . Тут виконуються розрахунки щодо можливостей виконання головних завдань місії – аналіз досяжності заданих робочих акваторій, обґрунтування траєкторій руху БПК та швидкісних режимів, перевірка необхідного енергетичного та інформаційного (комунікаційного та навігаційного) забезпечення місії, а також складаються плани-графіки практичної реалізації місії, включаючи застосування корисного вантажу.

На тактичному рівні з використанням результатів роботи стратегічного рівня виконується завдання P_E формування траєкторій просторового переміщення БПК та послідовності виконання конкретних робіт згідно до призначення катера та його корисного вантажу. При цьому враховуються можливі обмеження, обумовлені збуреннями зовнішнього середовища – вітро-хвильовими збуреннями, течіями та навігаційними обмеженнями. На цьому рівні складаються детальні плани-графіки використання корисного вантажу згідно його призначенню, які передбачають узгоджену роботу палубного обладнання БПК та, власне, конкретного засобу морської робототехніки, а також обладнання каналу комунікацій з береговим центром керування місією.

На адаптивному рівні керування місією БПК виконується завдання P_{CE} коригування планів-графіків функціонування катера та його корисного вантажу з урахуванням поточного технічного стану їх виконавчих механізмів (задача T_D) та поточних значень зовнішніх збурень на основі інформації від відповідних груп сенсорів. Результатом роботи цього рівня системи керування є оптимальні рекомендовані траєкторії руху виконавчих механізмів катера та його корисного вантажу.

Висновки

1. На основі аналізу науково-технічної літератури по безекіпажним надводним суднам встановлена актуальність створення безекіпажних патрульних катерів для охорони мілководних морських, річкових та озерних акваторій, на яких розташовані об'єкти морської критичної інфраструктури та проводиться промислово-господарська діяльність держави.

2. Показано актуальність завдання синтезу систем керування безекіпажними надводними суднами, які б забезпечували ефективно та безаварійне використання таких катерів в інтересах держави. Зокрема, показана необхідність одночасного врахування низки вимог, обумовлених режимами роботи та особливостями автоматичного керування виконавчими механізмами таких катерів, які забезпечують його функціонування та використання за призначенням його корисного вантажу.

3. Сформовано множину основних режимів функціонування безекіпажного патрульного катера, яка включає базовий перелік операцій катера, починаючи від автоматичної діагностики обладнання і до застосування корисного вантажу катера за його призначенням.

4. Сформовано множину головних задач, які має реалізувати система автоматичного керування безекіпажним патрульним катером, що охоплює задачі керування виконавчими механізмами катера та його корисного вантажу, задачі безпечної електронної навігації та задачі автоматичного діагностування обладнання катера та корисного вантажу.

5. Запропоновано узагальнену функціональну схему системи автоматичного керування безкіпажним патрульним катером як теоретичну основу для синтезу структури та алгоритмічного забезпечення системи керування катером та його корисним вантажем.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно проводити у двох основних напрямках:

- синтез структурних схем систем автоматичного керування безкіпажними патрульними катерами, які експлуатуються безвахтовим методом;
- синтез математичного та алгоритмічного забезпечення систем автоматичного керування безкіпажними патрульними катерами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Joel Coito. Maritime Autonomous Surface Ships: New Possibilities – and Challenges – in Ocean Law and Policy. Published by the Stockton Center for International Law. Volume 97, 2021. 49 Pages. <https://digital-commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2955&context=ils>.
2. The Future is Now: Unmanned and Autonomous Surface Vessels and Their Impact on the Maritime Industry. Benedict's Maritime Bulletin December 2017. <https://www.blankrome.com/publications/future-now-unmanned-and-autonomous-surface-vessels-and-their-impact-maritime-0>.
3. Zhixiang Liua, Youmin Zhanga, Xiang Yua, Chi Yuana. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. Annual Reviews in Control, Volume 41, 2016, Pages 71–93. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>.
4. Unmanned and Autonomous Ships. An Overview of MASS. By R. Glenn Wright. Published March 24, 2020 by Routledge. 288 Pages.
5. EU-backed Autonomous Shipping Project Moves Forward. (2018). – Marine Linc. Sunday, May 31, 2018. <https://www.marinelink.com/news/eubacked-autonomous-shipping-project-438094>.
6. DEVELOPMENT OF A GOAL-BASED INSTRUMENT FOR MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIPS (MASS). Report of the MSC-LEG-FAL Joint Working Group on Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) on its second session. – International Maritime Organization, 2 May 2023. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/MSC%20107-5-1-Report%20of%20the%20MSC-LEGFAL%20Joint%20Working%20Group.pdf>.
7. Tesla N. Method of and apparatus for controlling the mechanism of moving vessels or vehicles. Patent USA №613, 809. Patented Nov. 8, 1898. <https://russian.rt.com/article/317543-nikola-tesla-zapatentoval-ispolzovanie-voennyh-bes-pilotnikov-v>.
8. Tim Benbow. Naval Warfare 1914-1918: From Coronel To The Atlantic And Zeebrugge (The History of World War I). Hardcover – March 1, 2012. 224 Pages. <https://www.amazon.com/Naval-Warfare-1914-1918-Atlantic-Zeebrugge/dp/1906626162/#>.
9. Боргезе В. Десята флотилія МАС. Переклад з італійської С. В. Славіна та Ю. А. Каруліна. М.: Вид-во іноземної літератури, 1957. 281 с.
10. One platform, one complete view of Defence market data. https://plus.shephardmedia.com/login/?next=https%3A%2F%2Fplus.shephardmedia.com%2Fdetail%2Fprotector-1%2F%3F_ga%3D2.181422951.1561353826.1634494976-2061357576.1634494975.
11. Protector. Unmanned Surface Vehicle RAFAEL. <https://web.archive.org/web/20070503115143/http://www.defense-update.com/products/p/protector.htm>.
12. U.S. Department of the Navy, The Navy Unmanned Surface Vehicle (USV) Master Plan, July 23, 2007. [Электронный ресурс] Дата обращения 27.08.2014. URL : <https://www.hSDL.org/?view&did=479083>.
13. Research in maritime autonomous systems. Project results and technology potentials. <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2016/02/MUNIN-final-brochure.pdf>.

14. Justin E. Manley. Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development. Battelle Applied Coastal and Environmental Services. (2008). Conference: OCEANS 2008. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5152052>. <https://www.ieeeoes.org/history/080515-175.pdf>.
15. Vitor A. M. Jorge, Roger Granada, Renan G. Maidana, Guilherme Heck, Alvaro P. F. Negreiros, Davi H. dos Santos, and Alexandre M. Amory. A Survey on Unmanned Surface Vehicles for Disaster Robotics: Main Challenges and Directions. *Sensors* 2019, 19(3), 702; <https://doi.org/10.3390/s19030702>.
16. Nuno Mathias. Autonomous surface vehicles and the new directions of maritime exploration. *INEGI driving & Innovation*. 01 July 2020. <http://www.inegi.pt/en/news/autonomous-surface-vehicles-and-the-new-directions-of-maritime-exploration/>.
17. Блінцов В. С., Соколов В. В. Сучасні задачі автоматизації керування безкіпажним надводним катером. *Автоматика-2016 : матеріали XXIII Міжнародної конференції з автоматичного управління*. 2016. С. 201–202.
18. Viktor Nadtochii, Andrii Burunin. The tasks of creating an unmanned surface boat for studying the aquatic environment. *Proceedings in ASTI Series (Scopus)*. Mediterranean Geosciences Union. MedGU-23, Istanbul, 25–28 November 2023. 5 pages. <https://2023.medgu.org/>.
19. Rolls Royce : AAWA project introduces the project's first commercial ship operators. <https://www.marketscreener.com/quote/stock/ROLLS-ROYCE-HOLDINGS-PLC-4004084/news/Rolls-Royce-AAWA-project-introduces-the-project-s-first-commercial-ship-operators-22156271/>.
20. Autosea – Sensor fusion and collision avoidance for autonomous surface vehicles. <https://www.ntnu.edu/autosea>.
21. Falco (беспилотный паром). https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Falco_%28%D0%B1%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%BC%29.
22. Berge, Svein P., Hagaseth, Marianne, Kvam, Per Erik, Rinnan, Arne. Hull-to-Hull Concept Supporting Autonomous Navigation. <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2598992>.
23. Autonomous Vessels are Becoming a Commercial Reality. <https://www.maritime-executive.com/editorials/autonomous-vessels-are-becoming-a-commercial-reality>.
24. Zhixiang Liua, Youmin Zhanga, Xiang Yua, Chi Yuana. Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, Volume 41, 2016, Pages 71–93. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>.
25. Caccia M., Bibuli M., Bono R., Bruzzone, Ga., Bruzzone Gi., Spirandelli E. Unmanned Surface Vehicle for Coastal and Protected Waters Applications: the Charlie Project. *Marine Technology Society Journal*, Volume 41, Number 2, Summer 2007, pp. 62–71(10). <https://doi.org/10.4031/002533207787442259>.
26. Koji Wariishi. Maritime Autonomous Surface Ships : Development Trends and Prospects – how Digitalization Drives Changes in Maritime Industry. Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute Monthly Report/ September, 2019. 8 Pages. https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/_icsFiles/afieldfile/2020/01/09/1909t_wariishi_e.pdf.
27. Шпаченко О. Електронні навігаційні досягнення через практичний підхід. – *Вісник Держгідрографії*. – 2011. №2 (34), <https://hydro.gov.ua/dl/vdgg/vd034.002.pdf>.
28. Системи керування промисловими робототехнічними комплексами : навчальний посібник / В. С. Блінцов, Ж. Ю. Буруніна, А. В. Надточий, В. А. Надточій ; за ред. В. С. Блінцова. Миколаїв : Іліон, 2022. 156 с.

REFERENCES

1. Joel Coito (2021). *Maritime Autonomous Surface Ships: New Possibilities – and Challenges – in Ocean Law and Policy*. Published by the Stockton Center for International Law.

Volume 97. 49 Pages. <https://digital-commons.usnwc.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2955&context=ils>.

2. Benedict's Maritime Bulletin (2017). The Future is Now: Unmanned and Autonomous Surface Vessels and Their Impact on the Maritime Industry. <https://www.blankrome.com/publications/future-now-unmanned-and-autonomous-surface-vessels-and-their-impact-maritime-0>.

3. Zhixiang, Liua, Youmin, Zhanga, Xiang, Yua & Chi, Yuana (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, Volume 41, Pages 71–93. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>.

4. R. Glenn Wright (2020). Unmanned and Autonomous Ships. An Overview of MASS. *Routledge*. 288 p.

5. EU-backed Autonomous Shipping Project Moves Forward. (2018). – Marine Linc. Sunday, May 31, 2018. <https://www.marinelink.com/news/eubacked-autonomous-shipping-project-438094>.

6. DEVELOPMENT OF A GOAL-BASED INSTRUMENT FOR MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIPS (MASS). Report of the MSC-LEG-FAL Joint Working Group on Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) on its second session. – International Maritime Organization, 2 May 2023. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/MediaCentre/HotTopics/Documents/MSC%20107-5-1-Report%20of%20the%20MSC-LEG-FAL%20Joint%20Working%20Group.pdf>.

7. Tesla, N. Method of and apparatus for controlling the mechanism of moving vessels or vehicles. Patent USA №613, 809. Patented Nov. 8, 1898. <https://russian.rt.com/article/317543-nikola-tesla-zapatentoval-ispolzovanie-voennyh-bespilotnikov-v>.

8. Benbow, Tim. (2012). Naval Warfare 1914-1918: From Coronel To The Atlantic And Zeebrugge (The History of World War I). Hardcover – March 1, 2012. 224 Pages. <https://www.amazon.com/Naval-Warfare-1914-1918-Atlantic-Zeebrugge/dp/1906626162/#>.

9. Borgeze, V. (1957) Desyataya flotiliya MAS. (S. V. Slavina & Yu. A. Karulina, Trans. in Italian). Moscow: *Izdatel'stvo inostrannoi literaturi*. 281 p.

10. One platform, one complete view of Defence market data. https://plus.shephardmedia.com/login/?next=https%3A%2F%2Fplus.shephardmedia.com%2Fdetail%2Fprotector-1%2F%3F_ga%3D2.181422951.1561353826.1634494976-2061357576.1634494975.

11. Protector. Unmanned Surface Vehicle RAFAEL. <https://web.archive.org/web/20070503115143/http://www.defense-update.com/products/p/protector.htm>.

12. U. S. (2007). Department of the Navy, The Navy Unmanned Surface Vehicle (USV) Master Plan, July 23, URL : <https://www.hsdl.org/?view&did=479083>.

13. Research in maritime autonomous systems. Project results and technology potentials. <http://www.unmanned-ship.org/munin/wp-content/uploads/2016/02/MUNIN-final-brochure.pdf>.

14. Justin E. Manley (2008). Unmanned Surface Vehicles, 15 Years of Development. Battelle Applied Coastal and Environmental Services. Conference: *OCEANS 2008*. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2008.5152052>. <https://www.ieeeoes.org/history/080515-175.pdf>.

15. Vitor A. M. Jorge, Roger Granada, Renan G. Maidana, Guilherme Heck, Alvaro P. F. Negreiros, Davi H. dos Santos, & Alexandre M. Amory (2019). A Survey on Unmanned Surface Vehicles for Disaster Robotics: Main Challenges and Directions. *Sensors*, 19(3), 702; <https://doi.org/10.3390/s19030702>.

16. Nuno, Mathias (2020). Autonomous surface vehicles and the new directions of maritime exploration. *INEGI driving & Innovation*. <http://www.inegi.pt/en/news/autonomous-surface-vehicles-and-the-new-directions-of-maritime-exploration/>.

17. Blintsov, V. S. & Sokolov, V. V. (2016). Suchasni zadachi avtomatyzatsii keruvannia bezekipazhnym nadvodnym katerom. *Avtomatyka-2016 : materialy XXIII Mizhnarodnoi konferentsii z avtomatychnoho upravlinnia*. Pp. 2012007. 202. [in Ukrainian].

18. Nadtochii, V. & Burunin, A. (2023). The tasks of creating an unmanned surface boat for studying the aquatic environment. Proceedings in ASTI Series (Scopus). *Mediterranean Geosciences Union. MedGU-23*, Istanbul, 25–28 November 2023. 5 pages. <https://2023.medgu.org/>.

19. Rolls Royce : AAWA project introduces the project's first commercial ship operators. <https://www.marketscreener.com/quote/stock/ROLLS-ROYCE-HOLDINGS-PLC-4004084/news/Rolls-Royce-AAWA-project-introduces-the-project-s-first-commercial-ship-operators-22156271/>.
20. Autosea – Sensor fusion and collision avoidance for autonomous surface vehicles. <https://www.ntnu.edu/autosea>.
21. Falco (bespilotnii parom). https://www.tadviser.ru/index.php/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%82:Falco_%28%D0%B1%D0%B5%D1%81%D0%BF%D0%B8%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%BC%29.
22. Berge, Svein P., Hagaseth, Marianne, Kvam, Per Erik, Rinnan, Arne. Hull-to-Hull Concept Supporting Autonomous Navigation. <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2598992>.
23. Autonomous Vessels are Becoming a Commercial Reality. <https://www.maritime-executive.com/editorials/autonomous-vessels-are-becoming-a-commercial-reality>.
24. Zhixiang Liua, Youmin Zhanga, Xiang Yua, Chi Yuana (2016). Unmanned surface vehicles: An overview of developments and challenges. *Annual Reviews in Control*, Volume 41, Pages 712007. 93. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2016.04.018>.
25. Caccia, M.; Bibuli, M.; Bono, R.; Bruzzone, Ga.; Bruzzone, Gi. & Spirandelli, E. (2007) Unmanned Surface Vehicle for Coastal and Protected Waters Applications: the Charlie Project. *Marine Technology Society Journal*, Volume 41, Number 2, pp. 62–71(10). <https://doi.org/10.4031/002533207787442259>.
26. Koji Wariishi (2019). Maritime Autonomous Surface Ships : Development Trends and Prospects – how Digitalization Drives Changes in Maritime Industry. *Mitsui & Co. Global Strategic Studies Institute Monthly Report*. 8 Pages. https://www.mitsui.com/mgssi/en/report/detail/___icsFiles/afieldfile/2020/01/09/1909t_wariishi_e.pdf.
27. Shpachenko, O. (2011). Yelektronni navigatsiini dosyagnennya cherez praktichni pidkhid. *Visnik Derzhgidrografii*, 2 (34). <https://hydro.gov.ua/dl/vdgg/vd034.002.pdf> [in Ukrainian].
28. Blintsov, V. S. (Eds.), Burunina, Zh. Yu., Nadtochy, A. V. & Nadtochii, V. A. (2022). Systemy keruvannia promyslovymy robototekhnichnymy kompleksamy. Mykolaiv : *Ilion*. 156 p. [in Ukrainian].

Nadtochii V. A., Burunin A. P. A SYSTEMATIC APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AN UNMANNED PATROL BOAT FOR THE PROTECTION OF A SHALLOW WATER PROTECTED AQUARIUM

Unmanned patrol boats are one of the types of surface vehicles of marine robotics. These buildings implement a wide range of applied security tasks in the shallow water areas that are being protected. The study of scientific problems of their creation relates to the specialty "Automation, computer-integrated technologies and robotics" of the course of study "Electronics, automation and electronic communications". The study is devoted to the development of a general functional diagram of the automatic control system of the main operating modes of an unmanned patrol boat. Such boats are used as carriers of marine robotics equipment designed to illuminate the surface, underwater and wind conditions in protected waters. For the research, the methodology of analysis of scientific and technical literature and the principles of a systematic approach to the development of a range of operating modes for an unmanned patrol boat were used. A set of basic modes of boat operation has been formed, which includes the basic flow of boat operations. The multitude of tasks of the boat control system includes control of the boat's control mechanisms and its useful load, safe electronic navigation and diagnostic tasks. The general functional diagram of the automatic boat control system creates a theoretical basis for the synthesis of algorithmic support for the boat control system and useful equipment.

Key words: *unmanned patrol boat; automatic control system; operating modes; main management tasks; The general functional diagram of the automatic control system is provided.*

© Надточій В. А., Бурунін А. П.

Статтю прийнято до редакції 24.06.2024

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ
ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF THE NAVIGATION COMPLEX AND RECOMMENDATIONS FOR INCREASE OF RELIABILITY

Abramov G. S., Ph.D., associate professor of the ship navigation department, Kherson state maritime academy, Ukraine, e-mail: gennadabra@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0333-8819;

Plotnikov V. I., postgraduate student, Kherson state maritime academy, Ukraine, e-mail: vladplotnikov895@gmail.com, ORCID: 0009-0003-1836-5462.

The article examines the navigation complex as a mass service system and examines the relationship between the complexity of sea conditions and the capabilities of the system. Mathematical modeling and reliability analysis of the ship's navigation complex from the perspective of mass service theory were carried out. The presented work is one of the first in the application of mass service theory in the analysis of safe shipping problems, which ensures its importance and scientific novelty. The developed mathematical model was implemented in numerical experiments, and the obtained results were mathematically processed and visualized by building approximation equations of the second order, which relate the probability of the operating state of the system to the corresponding intensities of failure and maintenance flows. Mathematical modeling was carried out for different conditions of navigation complexity (from coastal to inshore navigation and port maneuvers). This ensures the high practical importance of the model results in the development of relevant maritime regulations and the assessment of the benefits of electronic navigation. A four-factor linear regression was built, which connects the reliability of the navigation complex with the corresponding flows of failures and maintenance in the system. The obtained regression is visualized in a nomogram, which is suitable for solving a number of practical problems.

Keywords: navigation systems; system stability; reliability; technical factor; queuing systems; system failure and recovery; flow of requests; quadratic approximation; nomogram.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.068-078

Introduction. In the period from 2011 to 2018, there were 23073 maritime accidents and incidents in the fleets of European Union member states or in EU maritime administrative waters, as stated in reports by the European maritime safety agency. In relation to this extensive amount of incidents, 699 individuals perished, 7694 individuals sustained injuries, 230 vessels were completely destroyed, and over 566 instances of ocean contamination occurred. Hence, maritime accidents and incidents have caused greater economic and environmental consequences in recent times. It was claimed that maritime disasters could have a lasting impact on the ecosystem and environment of a region. This is why authorizations and international alliances are beginning to thoroughly analyze the underlying reasons of marine accidents and incidents, and then assess them in order to manage the outcomes and seek ways to minimize them. This research project combines a narrative review of pertinent articles with library studies of annual reports from the European Marine Casualty Information Platform to analyze data and effective factors of maritime accidents. It then suggests policies and strategies to decrease accidents and incidents related to those factors [1].

The safety of marine transportation relies entirely on the secure state of a ship's deck and machinery. Having a strong technical knowledge and expertise is required for seafarers, analysts, and researchers to achieve this. Based on the Marine Accident Investigation Branch (MAIB) reports from 1993 to 2012, 6,692 maritime incidents can be traced back to technical causes alone, with 69% of incidents being a result of various factors combined. The technical aspects include main/auxiliary/deck machinery, bridge operations, maneuverability, collision/contact, electrical systems, fire and explosion prevention, flooding and sinking risks, management protocols, ship activities, grounding dangers, hazardous events, navigation and communication devices, design considerations, pollution issues, stability measures, structural strength, safety apparatus, and emergency response procedures, among other things. Throughout the history of mankind, a commonly used strategy has been to learn important lessons from previous negative experiences, which in turn enables people to prevent similar occurrences in the future [2].

Through better maintenance, design standards, training, and monitoring, the maritime sector can lessen accidents' impact and strengthen safety levels at sea. Enhanced maintenance protocols, improved design standards, crew training on new technologies, and continuous monitoring of systems are essential to avoid accidents caused by technical problems [3, 4].

Analysis of recent research and publications. Numerous methods have been found for analyzing the reliability of electronic navigation systems, with a main emphasis on assessing the reliability features of both the system as a whole and its individual subsystems [5]. Certain studies about the reliability of navigation systems mention the definition of reliability as the susceptibility of a navigation device or specific system or component (if present) to errors during a specified timeframe and specific conditions. It indicates the likelihood of carrying out a specific task without any incidents happening. The mean time between failures (MTBF) is a distinctive parameter that is utilized to define reliability. This is the typical length of time between consecutive system or system component failures. Along with reliability, IALA [6] also outlines availability, which is described as the likelihood of an aid or aid system carrying out its designated function under specific conditions at a randomly chosen moment. The mean time to repair (MTTR) parameter is utilized for availability assessment.

In terms of examining the reliability of DGPS systems, Specht [7, 8] discussed the reliability framework of the system and its components with regards to their functions and interconnections. Components and systems were subsequently given two states based on their operation: 0 for failure, 1 for normal function. Additionally, the navigation system's dependability is evaluated over a set period, known as the system's survival probability, taking into account the specified reliability framework. The reliability of the navigation system and its marginal reliability within a specific time frame were calculated based on an exponential lifetime and downtime distribution assumption.

The analysis of AIS system availability, as developed by Jaskólski [9–11], is utilized for Markov chains. Three different states of the system (functioning, interim, and breakdown) were identified based on the availability factor of AIS data transmission being monitored. Afterward, the likelihood matrix of transition probabilities among distinct states of AIS availability was established. The matrix was formed using the intensity of state transitions identified by analyzing AIS base station signals that were recorded. Ultimately, the probability of the system staying in each operating state was established by considering the initial and aggregate distributions of transitions between specific states.

The evaluation of electronic transmission system reliability regarding electromagnetic interference, as outlined by Paś and Rosiński [12, 13], includes three levels: full functionality, security priority, and inadequate security. This was accomplished by differentiating among states. The Chapman-Kolmogorov system of equations was used to describe the analyzed system by defining transitions between certain safe states. The initial conditions were then implemented and the Laplace transform was utilized to calculate the likelihood of the system staying in a specific state. Moreover, the likelihood of the system staying operational was determined by tracking the switch rate between particular states and the likelihood of staying in one state. Applications that assess the dependability of electron transport systems rely on the belief that the transition times between particular safety states follow an exponential distribution.

Sumic et al. [14–16] utilized the Markov model to examine the dependability and accessibility of an ECDIS system with a main (master) and secondary subsystem (backup subsystem). The primary and standby systems create a parallel setup in which, if each subsystem can be in working or non-functioning condition, the system can be in one of four states. By utilizing Markov model characteristics (where the likelihood of future states is based solely on the current state; the subsequent state is determined only by the current state, not by the events leading up to it), the system's reliability was calculated as the probability of not being in a state of failure. The primary finding of the research was that the intended level of reliability was not reached. This led the authors to suggest a different approach, known as the cold standby system, which involves incorporating backup systems connected in series or parallel.

Purpose and objectives of the research. Using queuing systems theory is a widely used way to assess technical systems' effectiveness. This theory enables us to compute the likelihood of various states within a queuing system (QS) and to establish the connection between specific QS parameters and metrics of its efficiency.

If all channels in the system are considered basic channels, the operation QS is currently undergoing can be characterized as a Markov random process. This procedure involves distinct stages and takes place continuously over a period of time. If the ergodicity condition is met, the system reaches the final steady-state state. In this state, probabilities of states and other process parameters do not depend on time. Researchers frequently concentrate on these well-established, enduring traits.

Main body. Inconsistent utilization of QS is caused by irregular application flows and varying processing times. At times, incomplete orders may accumulate at the entrance, causing an overload in quality assurance. On the other hand, in some cases the QS input may have a channel ready but no tasks, causing the QS to be underused and leaving the channel unused. There is an accumulation of orders at the entrance of QS. These orders can result in one of two possible outcomes. Those who cannot wait any longer in the queue will either be added to the queue or leave the QS without service [17].

In case of a channel failure, the recovery process starts right away. This could involve waking up, receiving the necessary treatment for healing, or recovering effectively from the incident.

The birth and death graph represents the state of the system and is shown as:

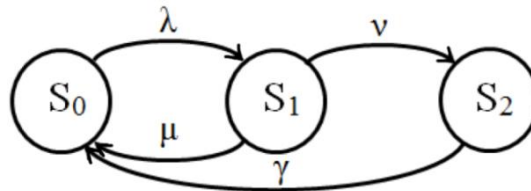


Figure 1 – QS state graph

- where S₀ – channel is free;
- S₁ – channel is busy (working), good;
- S₂ – channel failed, restored.

Let the simplest request flow arrive at its input with an intensity denoted by λ . Service time – exponential with parameter $\mu = \frac{1}{\bar{t}_{обсл}}$, where $\bar{t}_{обсл}$ – average request service time. This means that the service flow is the simplest, i.e., a stationary Poisson process can be described by an intensity parameter denoted by μ . A functioning channel may fail and be rejected. Let us assume that the simplest form of intensity ν is proportional to the error flow. Immediately after a channel failure, the channel restoration process begins. The channel repair time follows an exponential distribution characterized by a parameter called intensity $\gamma = \frac{1}{t_p}$, where t_p – average recovery time (repair). In [18], the problem was expressed in a similar way, focusing on the navigator as a service channel. In this study, the complexity of the problem arises from considering the possibility of the occurrence of channel disturbances and their influence on the resting state, denoted by an intensity ν' . It is reasonable to assume that $\nu' < \nu$ [19].

The graph representing the QS status will exhibit the following appearance:

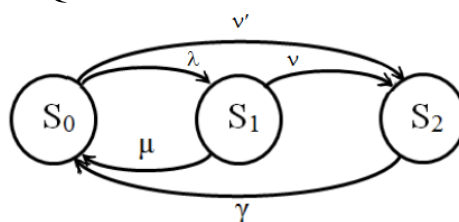


Figure 2 – QS state graph with failure possibility during idle

We will now calculate the ultimate likelihood of the system state and its validation characteristics. A stands for total throughput, while Q stands for throughput as a probability of processing incoming requests successfully.

The state probability in a system of algebraic equations is determined by the Kolmogorov differential equation when the left-hand side is set to zero, resulting in the final probability expression:

$$\begin{aligned}(\lambda + v')p_0 &= \mu p_1 + \gamma p_2 \\(\mu + v)p_1 &= \lambda p_0 \\ \gamma p_2 &= v p_1 + v' p_0\end{aligned}\tag{1}$$

Additionally, conditions for normalization to unity can be integrated into this system:

$$p_0 + p_1 + p_2 = 1\tag{2}$$

The task is to determine the intended final probability:

$$p_0 = \left[1 + \frac{\lambda}{\mu + v} + \frac{\lambda v + \mu v' + v v'}{\gamma(\mu + v)} \right]^{-1}\tag{3}$$

$$p_1 = \frac{\lambda}{\mu + v} p_0\tag{4}$$

$$p_2 = \frac{\lambda v + \mu v' + v v'}{\gamma(\mu + v)} p_0\tag{5}$$

To determine the relative throughput, we apply the principles described in [10] and obtain the following result:

$$Q = p_0 \frac{\mu}{\mu + v}\tag{6}$$

Absolute throughput:

$$A = \lambda Q = p_0 \frac{\lambda \mu}{\mu + v}\tag{7}$$

By simplifying the expression for Q , we can write it into a form suitable for numerical calculations:

$$Q = \frac{\mu \gamma}{(\mu + v)(\gamma + v') + \lambda(\gamma + v)}\tag{8}$$

Results of research. The probability of processing an incoming request Q is determined by five parameters. These parameters are the corresponding flow intensities: λ , μ , γ , v и v' .

The value of Q will be calculated for various combinations of the specified parameters. The calculations of the fulfillment probabilities of incoming requests in different sail conditions and the intensities of incoming request flows, failed flows and return flows are presented in Figures 3–6.

Correlations for sailing in coastal areas are shown in Figures 3–4. In this scenario, the failure flow intensity increases to 1, while the request flow intensity varies from 10 to 20. As a result, the chances of fulfilling requests decrease compared to the previously mentioned information.

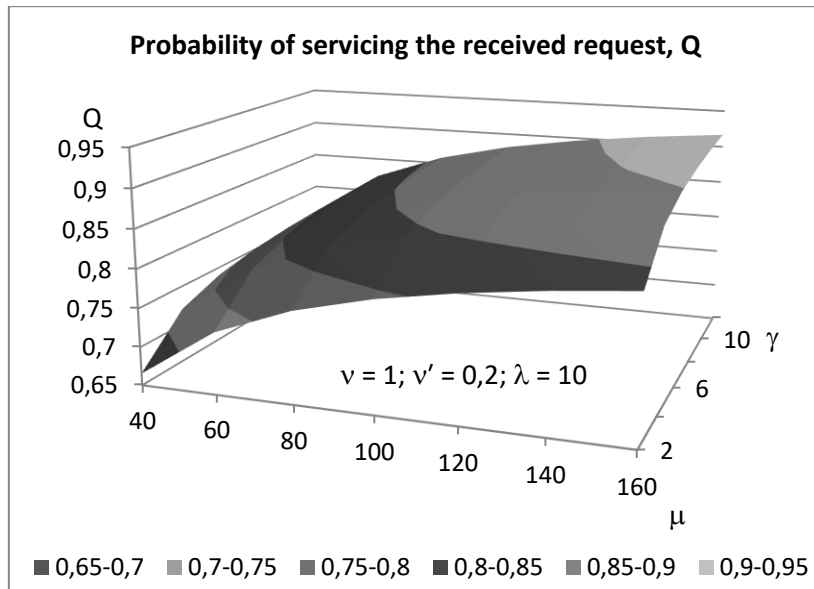


Figure 3 – The correlation between Q and λ, μ, γ, v, v'. The intensities of the corresponding flows are as follows: v = 1 per hour; v' = 0,2 per hour; λ= 10; μ from 40 to 160 per hour; γ from 2 to 12 per hour

$$Q_T = 0,5098 \pm 0,01 + (0,0258 \pm 0,0018)\gamma + (-0,0013 \pm 0,0001)\gamma^2 + (0,0036 \pm 0,0002)\mu + (-1,2002 \times 10^{-5} \pm 0,0912 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (9)$$

$$R^2 = 0,9839; \sigma = 0,0082.$$

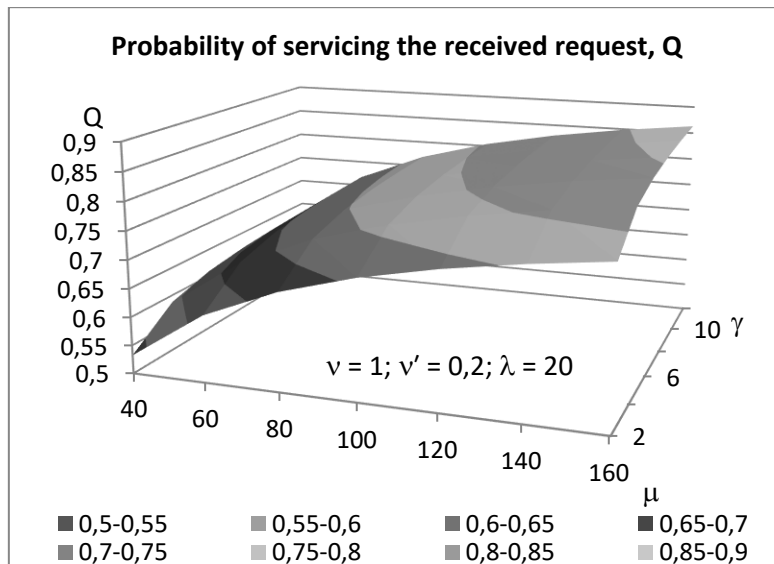


Figure 4 – The correlation between Q and λ, μ, γ, v, v'. The intensities of the corresponding flows are as follows: v = 1 per hour; v' = 0,2 per hour; λ= 20; μ from 40 to 160 per hour; γ from 2 to 12 per hour

$$Q_T = 0,3222 \pm 0,011 + (0,0275 \pm 0,002)\gamma + (-0,0014 \pm 0,0001)\gamma^2 + (0,0051 \pm 0,0002)\mu + (-1,6011 \times 10^{-5} \pm 0,101 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (10)$$

$$R^2 = 0,9897; \sigma = 0,0091.$$

In difficult navigational conditions such as rivers, harbors, heavy traffic and poor visibility, Figure 5–6 illustrates the relationships observed in sailing. The failure flow intensity increases to 5, while the request flow varies from 20 to 40, further reducing the probability of a request being completed compared to previous data.

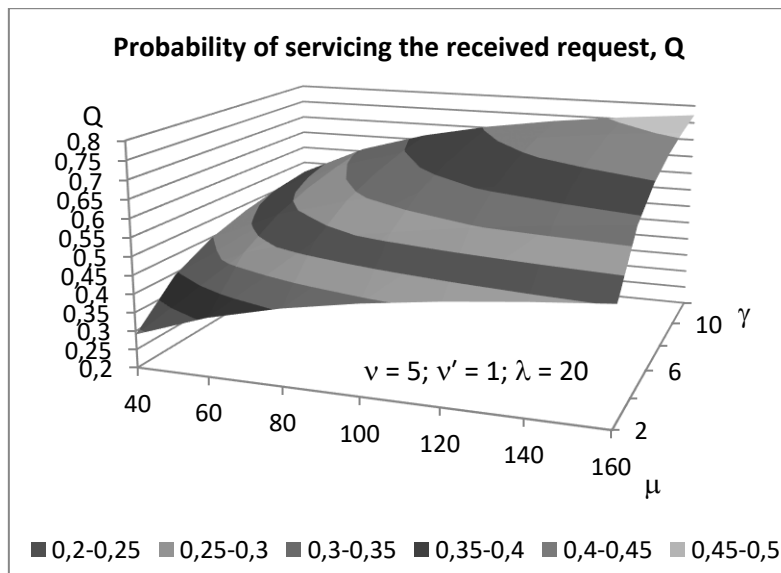


Figure 5 – The correlation between Q and λ , μ , γ , ν , ν' . The intensities of the corresponding flows are as follows: $\nu = 5$ per hour; $\nu' = 1$ per hour; $\lambda = 20$; μ from 40 to 160 per hour; γ from 2 to 12 per hour

$$Q_T = -0,0095 \pm 0,0163 + (0,0667 \pm 0,003)\gamma + (-0,0031 \pm 0,0002)\gamma^2 + (0,0049 \pm 0,0003)\mu + (-1,5023 \times 10^{-5} \pm 0,1487 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (11)$$

$$R^2 = 0,989; \sigma = 0,0134.$$

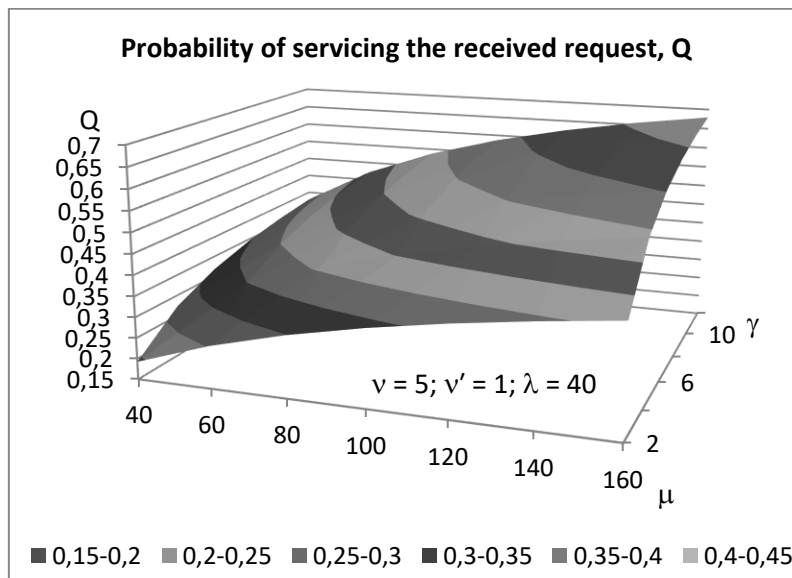


Figure 6 – The correlation between Q and λ , μ , γ , ν , ν' . The intensities of the corresponding flows are as follows: $\nu = 5$ per hour; $\nu' = 1$ per hour; $\lambda = 40$; μ from 40 to 160 per hour; γ from 2 to 12 per hour

$$Q_T = -0,1196 \pm 0,0171 + (0,0604 \pm 0,0031)\gamma + (-0,0027 \pm 0,0002)\gamma^2 + (0,005 \pm 0,0003)\mu + (-1,3831 \times 10^{-5} \pm 0,1561 \times 10^{-5})\mu^2 \quad (12)$$

$$R^2 = 0,9886; \sigma = 0,014.$$

The equations below each graph are derived using a square two-factor approximation method. The high level of the coefficient of determination ($R^2=0,98-0,99$) indicates that the obtained square statistical model is very appropriate. The standard deviation of the quadratic regression is significantly lower ($\sigma=0,006-0,014$), indicating its excellent accuracy. Therefore, these models can be safely used to obtain reliable probability estimates [20, 21].

Analysis of equations (9) and (10), which were obtained with the same values $v=1.0$ and $v'=0.2$, but with different intensity of the flow of requests λ , shows that an increase in λ from 10 to 20 reduces the probability of servicing an incoming request Q (relative throughput ability) by 0.2.

In this case, the coefficients for μ and μ^2 increase by approximately one and a half times, while the coefficients for γ and γ^2 remain practically unchanged. This means that keeping Q high depends largely on μ rather than γ .

At the same time, analysis of equations (11) and (12) shows that an increase in the intensity of the failure flow of channel v from 1 to 5 (v' from 0.2 to 1) with the same intensity of the flow of requests ($\lambda=20$) reduces Q by 0.3. In this case, the coefficient for γ increases by 2.4 times (for γ^2 by 2.2 times), although the coefficients for μ and μ^2 practically do not change.

This means that keeping Q high depends largely on the channel restoration intensity γ rather than on the service flow intensity μ .

Thus, the system responds to an increase in the intensity of the flow of requests λ by increasing the role of the intensity of the service flow μ and, conversely, with an increase in the intensity of the flow of failures v , the system responds by increasing the role of the intensity of the recovery flow γ .

In our opinion, the system in this case acts very physically and logically. The data are also consistent with the following recommendations for the operation of bridges in various difficult navigation conditions [22].

Table 1 – Watch conditions on the bridge as they relate to sailing conditions

	<i>Open Water</i>	<i>Restricted Water, Anchoring, Embarking or Disembarking a Pilot</i>	<i>Entering or Leaving Port</i>
Clear weather, little or no traffic	I	II	III
Clear weather, heavy traffic	II	II or III	III
Restricted visibility, little or no traffic	II	II	III
Restricted visibility, heavy traffic	II or III	II or III	III
Pilotage	I	I or II	II or III

Bridge Watch Condition – I

To fulfill this condition, the bridge must have both an Officer of Watch and a Lookout present on the bridge.

The Watch Officer performs regular watch duties and sometimes acts as the only watch during the day. In conditions requiring manual control, it is important to note that the skipper cannot act as an observer. Therefore, it is necessary to appoint an additional team member as a dedicated monitor. The engine room has the ability to operate in both manned and unmanned modes.

Bridge Watch Condition – II

To fulfill this requirement, the following persons must be on the bridge: the Master or Chief Officer, the Officer of Watch, the Lookout, and the Helmsman.

The safe navigation of the crew and general watch arrangements are supervised by the Master or Chief Officer. A Watch Officer assisting the Master or Chief Officer provides relevant information, steers the ship and supervises the execution of orders. In situations deemed necessary by the crew or in difficult conditions, such as heavy traffic, limited visibility, port maneuvers or pilot embarkation, the helmsman takes over control of the ship manually.

It is important that the engine room is always staffed, but ultimately it is up to the Master to assign personnel there or not.

Bridge Watch Condition – III

To fulfill this condition, the following persons must be on the bridge: the Master, Officer of Watch, Additional Officer, Lookout, and Helmsman.

In condition III, the Watch Officer is relieved of collision monitoring duty and an additional officer assumes that role using AIS/ARPA systems. They provide the Watch Officer with significant navigational information and information about nearby vessels. It is imperative that personnel are present and ready in the engine room.

Also, the statistic modeling of the numerical experiments was performed. To that end, a 4-factor linear regression for the dependence of Q's magnitude on all 4 factors (λ , v , γ , and μ) was built. The multiple regression equation received is included in Fig.7.

Regression analysis was carried out on the basis of 168 dots on 4 variables.

$$Q_T = 0,6377 \pm 0,0138 + (0,0157 \pm 0,001)\gamma + (0,0018 \pm 8,678 \times 10^{-5})\mu + (-0,0412 \pm 0,0024)v + (-0,0063 \pm 0,0004)\lambda \quad (13)$$

$$R^2 = 0,9329; \sigma = 0,045.$$

The received equation is visualized via nomogram, which allows to rapidly perform any necessary calculations and estimations.

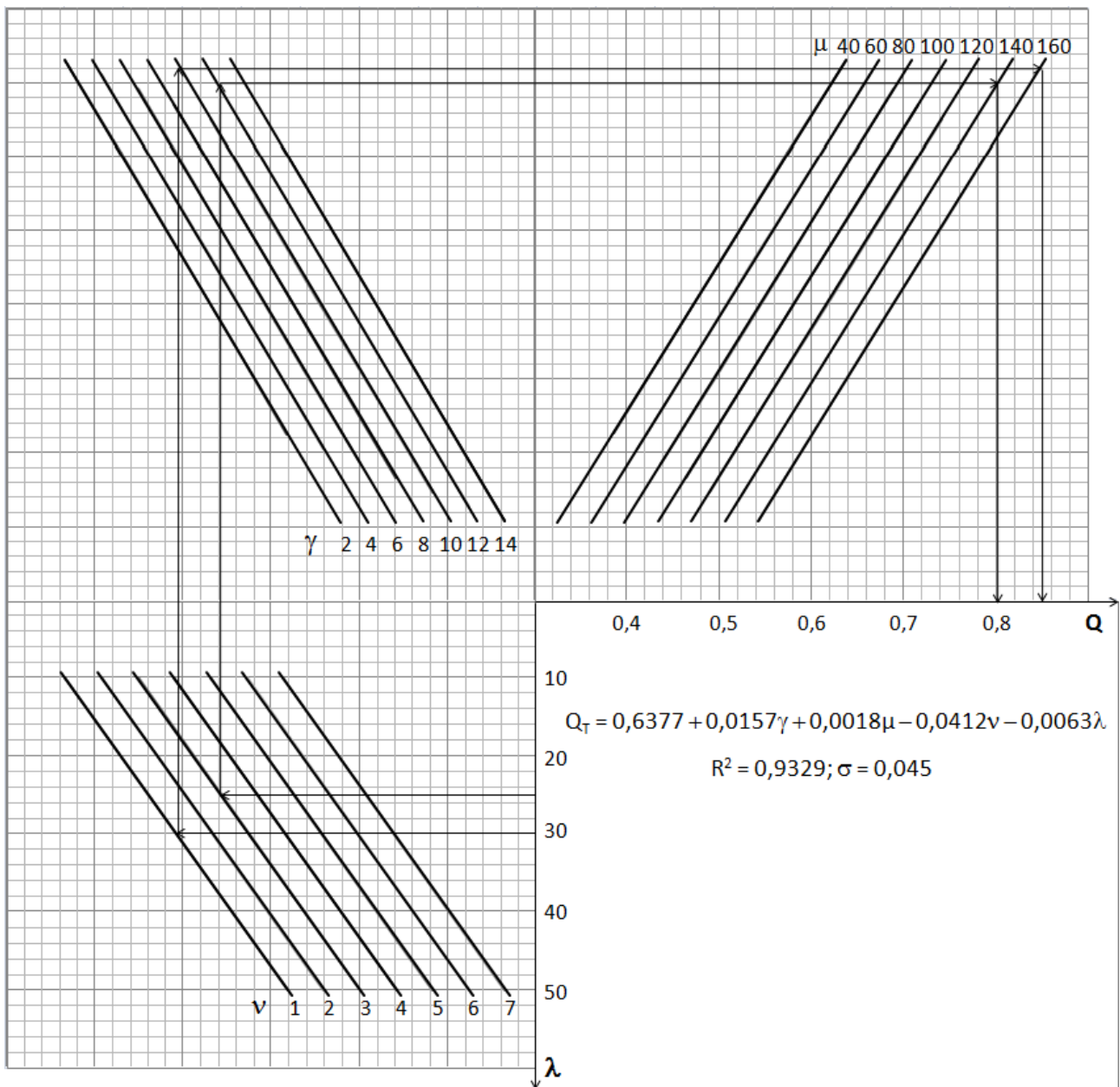


Figure 7 – Nomogram of the four-factor model for evaluation of Q from λ , v , γ and μ

The given model has a high indicator of the coefficient of determination $R^2=0.9329$, which shows the high adequacy of the built model and the standard error of the regression is acceptable for practical use.

We will give several examples of the use of the nomogram.

Example 1. We choose the value of the λ (for example, 30), we move in the direction of the arrow to the left, choosing the value of v (in this case, it is 1), we move up on the arrow to select the value of γ (in the given example it 10), moving along the arrow to the right in the first quadrant we choose the value of μ (in our example it is 160) and at the very end we go down arrows down on the Q axis, we will get its' value.

Example 2. The reverse direction of movement along the nomogram is also possible, i.e. solving the inverse problem: given the desired values and moving along the nomogram against the time arrow step by step, we choose the values of the input parameters of the model that would ensure the given value of Q. This task has many possible solutions and depends on the real possibility of ensuring one or another level of each of the factors, in the end, on the degree of their real reach.

Example 3. The use of the nomogram is not limited to the given example. Oncoming traffic is also possible: according to the given diagram. For example, by setting the desired Q value and the known values of some factors from model, it is possible to find the necessary values of other factors that would ensure the achievement of the selected Q. With such a formulation of the problem, the nomogram makes it possible to determine the existence of a solution and, if it exists, to determine the set of possible values for the factors that are determined, as well as the rate of their substitution (within certain limits, a decrease in the value of one of the factors can be compensated by an increase in the value of another factor).

Example 4. The given nomogram provides wide opportunities for estimating the possible limits of Q values, if the limits in which the input factors of the model can change are known. That is, if the limits in which the values of each of the factors can be found with some confidence are known, it is possible to move along the given nomogram gradually from one factor to another with a "strip" of values, where each "strip" reflects the limits of variation of the possible values of this factor. At the end of this process, we will reach the corresponding "band" of Q values, that is, we will have estimates of possible deviations from the average forecast Q value (pessimistic and optimistic forecast).

Conclusions. Through the examination of the simulation findings, it is possible to identify how the initial parameters impact the likelihood of meeting a request that is incoming. This enables forecasting the stability of navigation system components. The results obtained offer a chance to create suitable suggestions for enhancing the functional stability of navigation systems. The results of the simulation indicate that there is a substantial decrease in the likelihood of fulfilling an incoming request as the failure rate and request rate increase. Therefore, the navigation complex's performance is reduced.

Therefore, creating stability models for navigation systems allows for the simulation of different emergency scenarios, enabling quick calculation and estimation of various possibilities through the nomogram visualization obtained through linear regression. The simulation exposed the connection between the performance of the system and its parameters: λ , μ , γ , v , v' . On the other hand, systems have numerous internal links. Not following these rules could lead to the system not working properly.

This research emphasizes the need to establish the correct level of redundancy for navigation devices in order to guarantee system reliability. Should the Q value drop under 0.7, a critical scenario will take place aboard the vessel. Figures 3–6 demonstrate how the acceptance of a request is influenced by the navigational conditions of the journey. Hence, steps need to be implemented to guarantee the stability of the navigation system even under challenging circumstances.

Research findings can enhance comprehension of the dangers present as well as their associated levels of risk. Even with the increasing attention in the area, as shown by the rise in

publications, it is crucial to recognize the scarcity of literature and highlight the necessity for more research. Conducting a thorough hazard analysis is advised, with a focus on categorizing the hazards in greater detail. This method enables a thorough assessment of impact factors, resulting in improved risk management plans that are more precise and efficient.

REFERENCES

1. Behbood Issa Zadeh. (2022). Analysis of European Union Maritime Casualties Crisis Management Prospective. *The 12th International Conference on Recent Development in Managements and Industrial Engineering: Dusseldorf, Germany*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.8134918>.
2. Yip, Tsz L., Sahin, B. (2020). Technical factor in maritime accidents: an index for systematic failure analysis. *IAME 2020 Conference*, 1–11. <https://doi.org/10.17632/8p9hsvfhm2.2>.
3. Maternová, A., Materna, M., Dávid, A., Török, A., Šváblová, L. (2023). Human Error Analysis and Fatality Prediction in Maritime Accidents. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 2287. <https://doi.org/10.3390/jmse11122287>.
4. IMO. (2002). MEPC/Circ.392. Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. *International Maritime Organization: London*.
5. Blokus, A., Dziula, P. (2020). Reliability analysis of different configurations of master and back-up systems used in maritime navigation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 34; <https://doi.org/10.3390/jmse8010034>.
6. IALA. (1989). Guide to the Availability and Reliability of Aids to Navigation. *International Association of Lighthouse and Aids to Navigation Authorities: Saint-Germain-en-Laye, France*.
7. Specht, C. (2003). Availability, Reliability and Continuity Model of Differential GPS Transmission. *Annu. Navig.* 5, 85.
8. Cydejko, J., Król A. (2002). Analiza wartości poprawek różnicowych z kilku stacji referencyjnych GPS, *Proceedings of XIIth International Scientific and Technical Conference – The Part of Navigation in Support of Human Activity on the Sea, Gdynia, Poland*.
9. Jaskólski, K. (2011). Application of Markov Chains to Analyse the AIS Availability. *Annu. Navig.* 18, 5–16.
10. Felski, A., Jaskólski, K. (2010). The problem of the inquiry unfitness of AIS system (in Polish), *Zeszyty Naukowe AMW, No. 4*.
11. Felski, A., Jaskólski, K. (2011). Analysis of the accessibility of the AIS system (in Polish), *Zeszyty Naukowe AMW, No. 3*.
12. Paś, J., Rosiński, A. (2017). Selected issues regarding the reliability-operational assessment of electronic transport systems with regard to electromagnetic interference. *Ekspluat. Niezawodn. Maint. Reliab.* 19, 375–381.
13. Weintrit, A., Dziula, P., Siergiejczyk, M., Rosiński, A. (2015). Reliability and exploitation analysis of navigational system consisting of ECDIS and ECDIS back-up systems. *The monograph Activities in Navigation - Marine Navigation And Safety Of Sea Transportation*, editors: Weintrit A. London: CRC Press/Balkema, 109-115. <https://doi.org/10.1201/b18513-17>.
14. Sumic, D., Perakovic, D., Jurcevic, M. (2014). Contribution to ECDIS reliability using Markov Model. *Trans. Marit. Sci.* 3, 149–157.
15. Ebeling, C. E. (2014). *An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering*, Long Grove, Illinois: Waveland Press Inc.
16. O'Connor, P., Kleyner, A. (2012). *Practical Reliability Engineering*, fifth edition, West Sussex: John Wiley & Sons.
17. Aubakirov, S.K. & Selivyorstov, P.Y. (2016). System of mass service. Post capacity. *Bulletin of Science and Education*, 6(18), 44–47.

18. Abramov, G. S., Makarchuk, D. V., Nosov, P. S. & Zinchenko, S. M. (2021). The ship officer as a failure-prone single-channel queueing system. *Materials of the 13th international scientific and practical conference "Modern information and innovation technologies in transport (MINTT-2021)"*, 13, 157–162.

19. Abramov, G. S., Makarchuk, D. V. & Plotnikov, V. I. (2023). Analysis of the stability of marine navigation complex systems from the point of view of the QS. *Materials of the 15th international scientific and practical conference "Modern information and innovation technologies in transport (MINTT-2023)"*, 15, 244–249.

20. Abramov, G. S., Plotnikov, V. I. & Zinoviev, V. I. (2023). Analysis of the reliability of the navigation complex and its influence on the functioning of the maritime logistics system. *Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference "Transport, port, logistics, security: modern-day challenges and development prospects"*, 1, 17–29.

21. Plotnikov, V. I., Dudchenko, S. V., Abramov, G. S., Makarchuk, D. V. (2023). Mathematical modeling and analysis of the reliability of the navigation complex. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, № 26–27, 82–95.

22. Columbia Shipmanagement. (2018). *Bridge Operations Manual BOPR-01.2*.

Абрамов Г. С., Плотніков В. І. АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО КОМПЛЕКСУ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ

У статті розглядається навігаційний комплекс як система масового обслуговування та досліджується зв'язок між складністю морських умов і можливостями системи. Проведено математичне моделювання та аналіз надійності суднового навігаційного комплексу з позицій теорії масового обслуговування. Представлена робота є однією з перших у застосуванні теорії масового обслуговування в аналізі проблем безпечного судноплавства, що забезпечує її важливість і наукову новизну. Розроблену математичну модель було реалізовано в чисельних експериментах, а отримані результати математично обробили та візуалізували, побудувавши апроксимаційні рівняння другого порядку, які пов'язують ймовірність робочого стану системи з відповідними інтенсивностями потоків відмов та обслуговування. Проведено математичне моделювання для різних умов навігаційної складності (від берегової до прибережної навігації та портових маневрів). Це забезпечує високу практичну важливість результатів моделі при розробці відповідних морських правил та оцінці переваг електронної навігації. Побудована чотирьохфакторна лінійна регресія, що пов'язує надійність навігаційного комплексу з відповідними потоками відмов і обслуговування в системі. Отримана регресія візуалізована в номограмі, яка придатна для вирішення низки практичних задач.

Ключові слова: системи навігації; стабільність системи; надійність; технічний фактор; системи масового обслуговування; відмова та відновлення системи; потік запитів; квадратична апроксимація; номограма.

© Abramov G. S., Plotnikov V. I.

Статтю прийнято до редакції 13.05.2024

ПРОЄКТНІ ЗАДАЧІ СТВОРЕННЯ ЗАСОБІВ МОРСЬКОЇ РОБОТОТЕХНІКИ ДЛЯ ОХОРОНИ ТА ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ МОРСЬКОЇ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Блінцов В. С., д.т.н., професор, професор кафедри автоматики та електроустаткування Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Херсон, Україна, e-mail: bvs050803@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3912-2174;

Тарчук А. А., аспірант кафедри теорії та конструювання суден Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: tarчук1996@gmail.com, ORCID: 0009-0009-6904-2544;

Трибулькевич В. В., викладач кафедри комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: vika.trybulkevich@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2251-6932.

Сформульовано завдання підвищення ефективності охорони і захисту об'єктів морської критичної інфраструктури шляхом застосування спеціальних засобів морської робототехніки. Сформульовано основні види робіт, які можна виконувати з залученням засобів морської робототехніки. Вони включають надводне та підводне обстеження акваторій, спостереження за виявленими потенційно небезпечними предметами та технічну протидію цим предметам. Запропоновано основні етапи робіт щодо створення нових засобів робототехніки. Вони включають аналіз існуючих типів робіт, формування критеріїв ефективності їх застосування, обґрунтування нового архітектурно-конструктивного типу робота та задач його проектування. Для першого етапу робіт запропоновано множину засобів морської робототехніки та множину змінного начіпного обладнання, які доцільно залучати до охоронних робіт. Для другого етапу робіт запропоновано три критерії ефективності застосування робіт: їх продуктивність, якість робіт та економічна ефективність застосування. Для третього етапу робіт запропоновано удосконалений варіант автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм. Робот поєднує переваги традиційних автономних та прив'язаних ненаселених підводних апаратів. Він має високу продуктивність, постійний двосторонній зв'язок з судном забезпечення та може працювати на великих відстанях від нього. Для четвертого етапу робіт сформульовано задачі конструювання удосконаленого підводного апарата з радіобуєм, проектні задачі його енергетики, інформатики та експлуатації. Результати дослідження утворюють науково-технічне підґрунтя проєкту створення удосконаленого варіанту морської робототехніки для ефективної охорони та захисту об'єктів морської критичної інфраструктури.

Ключові слова: об'єкт морської інфраструктури; засіб морської робототехніки; підводний апарат; буксирований радіобуй.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.079-091

Вступ. До об'єктів морської критичної інфраструктури відносяться (МКІ, в англомовній літературі – Critical Maritime Infrastructure, CMI) об'єкти, які є стратегічно важливими для економіки і національної безпеки держави [1]. Порушення функціонування таких об'єктів може призвести до екологічних катастроф та завдати шкоди життєво важливим національним інтересам держави. Очевидно, що водні транспортні системи морських держав (у першу чергу, морський транспорт, морські та річкові шляхи та порти), видобувні споруди морського шельфу (морські стаціонарні нафтогазові платформи, підводні трубопроводи) та морські системи кабельного зв'язку (підводні кабелі) належать до об'єктів МКІ і повинні мати сучасну систему безпеки [2].

Забезпечення безпечного функціонування таких об'єктів у кризових ситуаціях природного чи антропогенного походження є актуальним науково-технічним завданням. Систему безпеки таких об'єктів доцільно будувати на основі комплексного застосування засобів морської робототехніки (ЗМР, в англомовній літературі – Marine Robotics, MR) – безпілотних літальних апаратів морського застосування, безекіпажних надводних і підводних апаратів, а також стаціонарних підводних апаратів донного базування [3].

Постановка проблеми. Охорона та захист об'єктів МКІ передбачає виконання наступної множини робіт J_{SMI} незалежно від технологій їх виконання:

- надводне обстеження захищених акваторій J_A на предмет виявлення стаціонарних чи рухомих надводних та підводних (підповерхневих) потенційно небезпечних предметів (ПНП), які несанкціоновано знаходяться на цих акваторіях;
- підводне обстеження J_O об'єктів МКІ, розміщених на захищених акваторіях, на предмет виявлення ПНП, які несанкціоновано встановлені на цих об'єктах;
- спостереження J_M за функціонуванням виявлених ПНП на предмет виявлення загроз об'єктам МКІ;
- технічна протидія J_R виявленим ПНП з метою недопущення нанесення шкоди об'єктам МКІ.

Тобто, базова множина робіт J_{SMI} з охорони об'єктів МКІ має вид:

$$J_{SMI} = \{J_A; J_O; J_M; J_R\}. \quad (1)$$

Очевидно, що у загальному випадку для кожного виду робіт множини (1) має бути створено відповідний тип ЗМР, який би максимально повно відповідав технології виконання цієї роботи.

Тому задачу створення ЗМР T_{MR} з необхідними технічними характеристиками, призначених для охорони об'єктів МКІ, доцільно розв'язувати як послідовність наступних етапів:

- етап T_R – огляд і критичний аналіз існуючих типів ЗМР з позицій їх відповідності роботам множини (1);
- етап T_K – формування критеріїв ефективності застосування ЗМР для виконання робіт множини (1);
- етап T_C – обґрунтування вибору архітектурно-конструктивних типів ЗМР, які максимально повно відповідають вимогам критеріїв ефективності застосування ЗМР для виконання робіт множини (1);
- етап T_P – обґрунтування основних проектних задач (внутрішнє проектування), які необхідно розв'язати для створення ЗМР з необхідними та експлуатаційними характеристиками для виконання робіт множини (1).

Множину етапів розв'язку задачі T_{MR} створення ЗМР для виконання робіт множини (1) по охороні об'єктів МКІ позначимо наступним відношенням:

$$T_{MR} = \{T_R; T_K; T_C; T_P\}. \quad (2)$$

Базова множина (1) робіт J_{SMI} з охорони та захисту об'єктів МКІ та множина етапів (2) задачі T_{MR} створення ЗМР для виконання робіт по охороні об'єктів МКІ утворюють план даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання створення і застосування АНПА з радіобуями давно знаходяться у полі зору науковців та інженерів провідних морських країн світу.

За призначенням сучасні АНПА-РБ укрупнено можна розділити на робочі, зв'язкові, інспекційні та розважальні.

Прикладом робочого АНПА-РБ є підводний апарат спільного виробництва італійської компанії «Pluto» та швейцарської компанії «idRobotica» [4]. АНПА-РБ складається з підводного апарата-робота «Pluto Plus ROV» та буксированого радіобуя. Підводний апарат-робот оснащений акумуляторним джерелом живлення і призначений для виконання широкого спектру підводних робіт – від підводної археології до пошуку та знешкодження морських мін. Наявність буксированого радіобуя надає апарату переваги АНПА (відсутність механічного зв'язку з судном забезпечення) та переваги НППА (можливості передачі підводної інформації та оперативного керування апаратом у реальному часі).

Радіобуй, що входить до складу АНПА-РБ, забезпечує зручний бездротовий зв'язок з береговим центром керування (БЦК) і дає змогу виконувати високоточні підводні місії у реальному часі. Радіобуй виконано у формі вертикального крила з мінімальним

гідродинамічним опором буксируванню та високою остійністю за рахунок використання кіля.

У комплект радіобуя входять:

- радіобуй з відповідними водонепроникними контейнерами для електроніки та акумуляторного джерела живлення;
- кабель-буксир (КБ), корінний кінець якого закріплений на барабані малогабаритної автоматичної кабельної лебідки (КЛ), яка встановлена на АНПА «Pluto Plus ROV»;
- антени зв'язку і керування (Wi-Fi, радіо, GPS);
- програмний пакет автоматичної навігації.

Радіобуй відстежує сигнали супутникової навігаційної системи GPS і дає можливість визначати підводне положення АНПА і передавати його на БЦК.

Недоліком цієї підводної системи є її громіздкість та складність експлуатації, особливо на стадіях розгортання/згортання системи.

Підводні радіобуї зв'язкового призначення спершу з'явилися як засоби комунікації підводних човнів (ПЧ) з береговими військово-морськими базами [5, 6]. Вони забезпечували оперативний радіообмін без необхідності спливати на поверхню моря і, таким чином, гарантували прихованість факту перебування ПЧ, який веде операцію у ворожих водах.

Конструктивно такі системи зв'язку склались з розташованих на палубі ПЧ лебідки з кабель-буксиром (КЛ), «гаражу» для зберігання РБ (ГРБ) та механізму утримання та випуску-прийому (МУВП) РБ.

Недоліком таких систем є їх великі масо-габарити та складність експлуатації.

До АНПА-РБ розважального призначення належить підводний апарат «Gladius Advanced Pro» фірми «Chasing Innovation» (КНР) [7]. Завдяки простим у управлінні елементам керування, сенсорам освітлення та вбудованим алгоритмам якості зображення цей вид ЗМР дає змогу непідготовленому оператору знайомитись з підводним світом, знімаючи високоякісні фото- та відеозображення з берегової смуги або з борту будь-якого судна, призначеного для відпочинку та туризму.

Недоліком АНПА-РБ цього типу є відсутність можливості встановлювати будь-яке зовнішнє начіпне обладнання.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка науково-технічного підґрунтя для створення сучасних засобів морської робототехніки, призначених для ефективної охорони і захисту об'єктів морської критичної інфраструктури від підводних загроз.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети у роботі використано методи системного підходу, які передбачають врахування взаємного впливу усіх значущих складових новостворюваного інноваційного технічного об'єкта, метод декомпозиції завдань роботизації на окремі види підводних робіт та метод декомпозиції при формулюванні розв'язку задач множини T_{MR} створення ЗМР для охорони і захисту об'єктів МКІ.

Розглянемо послідовно розв'язок сформульованих вище етапів робіт множини (2).

Етап T_R – огляд і критичний аналіз існуючих типів ЗМР.

Аналіз науково-технічної та виробничої літератури, а також практичний досвід авторів у розробці та впровадженні засобів морської робототехніки свідчить, що для охорони об'єктів морської критичної інфраструктури доцільно залучати наступні види цієї техніки:

– безпілотні літальні апарати (БПЛА, в англійській літературі – Unmanned Aerial Vehicle, UAV) – для оперативного візуально-оптичного обстеження морських акваторій у реальному часі з метою виявлення ознак несанкціонованого проникнення на захищені акваторії надводними плавзасобами [8, 9];

– ненаселені самохідні прив'язні підводні апарати (НППА, в англійській літературі – Remotely Operated Vehicle, ROV) – для виконання інспекційних, картографічних та інструментальних підводних робіт на захищеній акваторії у реальному часі [10, 11];

– ненаселені буксировані підводні апарати (НБПА, в англійській літературі – Towed Unmanned Vehicle, TUV) – для високопродуктивного обстеження у реальному часі невеликих за площею ділянок морського дна з метою виявлення несанкціонованого розміщення технічних засобів, які можуть становити загрозу об'єктам МКІ [12, 13];

– автономні ненаселені підводні апарати (АНПА, в англійській літературі – Autonomous Unmanned Vehicle, AUV) – для високопродуктивного обстеження у реальному часі великих за площею ділянок морського дна з метою виявлення несанкціонованого розміщення технічних засобів, які можуть становити загрозу об'єктам МКІ [14, 15];

– безекіпажні надводні судна (БНС, в англійській літературі – Unmanned Surface Vehicle, USV) – як носії UAV, ROV, TUV та AUV, що реалізують безлюдні технології висвітлення надводної та підводної обстановки на захищеній акваторії [14–16];

– безекіпажні підводні апарати донного базування (в англійській літературі – Unmanned Bottom Vehicles, UBV) – для тривалого спостереження за підводною обстановкою на заданій акваторії [17].

Тоді множина засобів морської робототехніки MR , яку доцільно залучати до робіт щодо забезпечення безпеки захищених акваторій та розташованих на них об'єктів МКІ, буде мати вид:

$$MR = \{MR_{UAV}; MR_{ROV}; MR_{TUV}; MR_{AUV}; MR_{USV}; MR_{ABV}\}. \quad (3)$$

До отриманої множини слід додати множину ME змінного начіпного обладнання, яке можна встановлювати на ті чи інші ЗМР – пошукові прилади та інструментальні засоби, за допомогою яких можна здійснювати пошук ПНП. До такого обладнання відносяться:

– гідроакустичні та магнітометричні прилади ME_D – сонари, профілографи, магнітометри, високоякісні підводні фото- та відеокомплекси [17, 18];

– підводні інструменти ME_T – маніпулятори, різачи тросів, гідромонітори для розмиву ґрунту [19];

– обладнання для забезпечення надводного та підводного протистояння порушникам ME_I – засоби нелетального та летального впливу на порушників [20].

Множину ME запишемо відношенням:

$$ME = \{ME_D; ME_T; ME_I\}. \quad (4)$$

Таким чином, множини (3) і (4) характеризують існуючі можливості застосування конкретних типів ЗМР та їх начіпного обладнання для охорони і захисту об'єктів МКІ.

Етап T_K – формування критеріїв ефективності застосування ЗМР.

Застосування будь-якого типу морського робота для виконання робіт згідно множині (1) необхідно оцінювати за допомогою системи критеріїв ефективності EC . У більшості випадків це дасть змогу кількісно оцінити рівень роботизації інженерного комплексу з видобування енергоносіїв IC .

До основних критеріїв ефективності доцільно віднести:

– продуктивність виконання робіт множини (1) EC_P ;

– якість виконання робіт множини (1) EC_Q ;

– економічна ефективність застосування конкретного засобу морської робототехніки з множин (3) і (4) EC_E .

Практичний досвід авторів у впровадженні засобів морської робототехніки у морську практику свідчить, що на кількісні показники вказаних критеріїв суттєво впливає рівень її автоматизації, який визначається режимами керування (3).

У підсумку, множина критеріїв ефективності EC може бути представлена наступними основними критеріями:

$$EC = \{EC_P; EC_Q; EC_E\}. \quad (5)$$

Вказані критерії у подальшому можуть доповнюватись, виходячи з реального стану морської видобувної галузі та рівня розвитку техніки.

Таким чином, множини (1) та (3)–(5) утворюють інформаційну основу для оцінки доцільності залучення конкретних типів морських роботів (3) та їх начіпного обладнання (4) у роботах, пов'язаних з охороною і захистом об'єктів МКІ.

На практиці це може бути реалізовано у вигляді тривимірної матриці «Робота J_{SMI} – Тип ЗМР MR , оснащений зовнішнім начіпним обладнанням ME – Критерій ефективності ES », яка показує можливість та доцільність застосування конкретного типу засобу морської робототехніки та його зовнішнього начіпного обладнання для охорони і захисту об'єктів МКІ.

Етап T_c – обґрунтування вибору архітектурно-конструктивних типів ЗМР.

Розглянемо тепер можливі архітектурно-конструктивні типи засобів надводної та підводної робототехніки та їх приладове оснащення, яке необхідне для успішного застосування такої техніки за призначенням.

До традиційних архітектурно-конструктивних типів такої техніки, яка здебільшого використовується на цих об'єктах, належать:

– безпілотні літальні апарати – квадрокоптерного типу, оскільки це визначається умовами запуску та повернення після польоту; такі БПЛА оснащені здебільшого фото- і відеоапаратурою; їх перевагою є оперативність передачі інформації про надводну обстановку на захищеній акваторії до БЦК, а недоліком – суттєві обмеження по масогабаритах щодо розміщення зовнішнього начіпного обладнання;

– телекеровані прив'язні ненаселені підводні апарати – класу «міні» з масою до 100 кг, які мають 3–6 рушійних пристроїв, оснащені фото- та відеокамерами, гідроакустичними приладами та магнітометрами, а також приладами для метрологічної інспекції підводних конструкцій, відбірниками проб ґрунту та маніпуляторами для виконання обмеженого переліку технічних робіт під водою [21]; їх перевагою також є оперативність передачі інформації про підводну обстановку на захищеній акваторії до БЦК, а недоліком – обмеження по дальності (дистанція, на яку НППА може відійти від судна забезпечення, обмежена довжиною його кабель-тросу);

– буксировані ненаселені підводні апарати – типу «планер», оснащені фото- та відеокамерами, гідроакустичними приладами та магнітометрами для виконання пошукових і картографічних робіт [21]; перевагою застосування НБПА є висока продуктивність проведення підводних пошукових робіт на великих за площею акваторіях у порівнянні з АНПА, а недоліком – неможливість оперативного обстеження виявлених ПНП;

– автономні ненаселені підводні апарати – малого класу з масою до 100 кг, оснащені фото- та відеокамерами, гідроакустичними приладами та магнітометрами [21]; перевагою АНПА є відсутність кабельного зв'язку з судном забезпечення і, значить, можливість обстежувати великі за площею акваторії, а недоліком – відсутність оперативного контролю з БЦК;

– безекіпажні надводні судна – малорозмірні судна, оснащені відповідними системами автоматичного керування і зв'язку та навігаційним обладнанням, яке забезпечує безаварійну їх експлуатацію; до переваг використання БНС належать висока продуктивність підводних пошукових робіт та наявність оперативного зв'язку з БЦК, а також можливість виконання функцій судна-носія для БПЛА, НППА, НБПА та АНПА, а недоліком – неможливість оперативного обстеження виявлених ПНП;

– безекіпажні підводні апарати донного базування – малого і середнього класів з масою до 500 кг, оснащені гідроакустичною апаратурою активного типу (сонари) та пасивного типу (гідрофони), а також спливаючими радіобуями [21]; перевагами цього типу ЗМР є можливість оперативного радіозв'язку з БЦК, а недоліком – неможливість оперативного обстеження виявлених ПНП.

Попередній аналіз технічних характеристик наведених вище ЗМР свідчить, що надводне обстеження захищених акваторій та протидія надводним порушникам достатньо повно виконується за допомогою БПЛА та БНС. Контроль підводного простору захищених акваторій (водної товщі та донної поверхні) з метою виявлення ПНП є значно складнішим і

вимагає значно більшого типорозмірного ряду ЗМР для обстеження та протидії зловмисникам.

До основних експлуатаційних вимог щодо роботизованих технологій захисту об'єктів МКІ від загроз з-під води належать:

- можливість обстежувати великі за площею акваторії без обмежень щодо дистанції між ЗМР та БЦК (властивість АНПА і недолік НППА та НБПА);
- наявність постійного двохстороннього зв'язку між ЗМР та БЦК (властивість НППА та НБПА і недолік АНПА);
- можливість застосування усього необхідного для таких задач переліку зовнішнього начіпного обладнання згідно множині (4).

Таким чином, оптимальним для застосування у задачах охорони і захисту об'єктів МКІ є такий тип ЗМР, який об'єднує переваги автономних і прив'язних підводних роботів та який має широку номенклатуру зовнішнього начіпного обладнання для виявлення ПНП та протидії ним.

Враховуючи той факт, що більшість об'єктів ЗМР розташовані на прибережних мілководних акваторіях з глибинами до 50–100 метрів, найбільш повно вказаним вище вимогам відповідають автономні ненаселені підводні апарати з радіобуями (АНПА-РБ) [22]. Тому розглянемо їх більш детально.

Пропонований в [22] АНПА має форму прямого паралелепіпеда, округленого по краях для зменшення сил гідродинамічного опору (рис. 1).

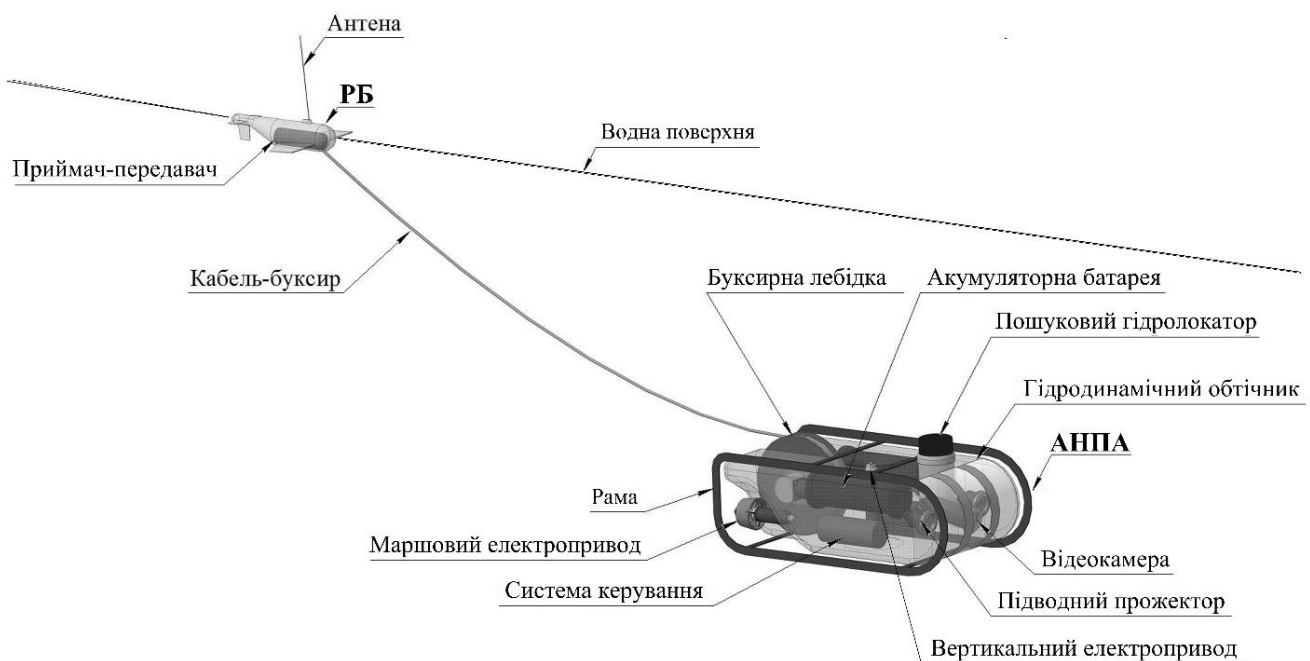


Рисунок 1 – Автономний ненаселений підводний апарат з радіобуєм за [22]

В якості зовнішнього начіпного обладнання підводний апарат має радіобуй (РБ) з відповідною радіоапаратурою, за допомогою якої забезпечується двохсторонній радіозв'язок з БЦК. Горизонтально розташовані несучі поверхні (крила) РБ забезпечують йому утримання на поверхні моря під час буксирування. До складу обладнання АНПА входить автоматична буксирна лебідка кабель-буксиру, що забезпечує необхідну його довжину при різних робочих глибинах і швидкостях руху. Інші складові АНПА та РБ наведені на рис. 1.

Такі підводні апарати-роботи поєднують переваги «класичних» АНПА (незалежність їх роботи від дистанції до судна-носія) з перевагами «класичних» НППА (можливість керування підводним роботом та отримання від нього інформації про підводну обстановку у реальному часі).

До недоліків розглянутої конструкції належать:

– складність експлуатації АНПА-РБ, особливо на початку і в кінці місії, обумовлена необхідністю розгортати і згортати складну морську систему у складі двох твердих тіл, з'єднаних гнучким зв'язком (кабель-буксиром);

– низька продуктивність АНПА-РБ з-за малої швидкості підводного руху, обмеженої швидкістю буксирування РБ.

Пропонується вдосконалення АНПА-РБ (за рис. 1) таким чином, щоб підвищити його продуктивність при виконанні пошукових та обстежувальних робіт на великих за площею акваторіях. Зокрема, доцільною є реалізація режиму традиційного підводного руху АНПА без буксирування РБ. Такий режим вбачається основним при виконанні автоматично керованих підводних пошукових місій на великих за площею акваторіях, коли постійний оперативний радіозв'язок з БЦК не є обов'язковим до моменту виявлення та автоматичної ідентифікації ПНП.

Архітектурно-конструктивний тип пропонованого варіанту АНПА-РБ для виконання задач охорони і захисту об'єктів МКІ наведено на рис. 2.

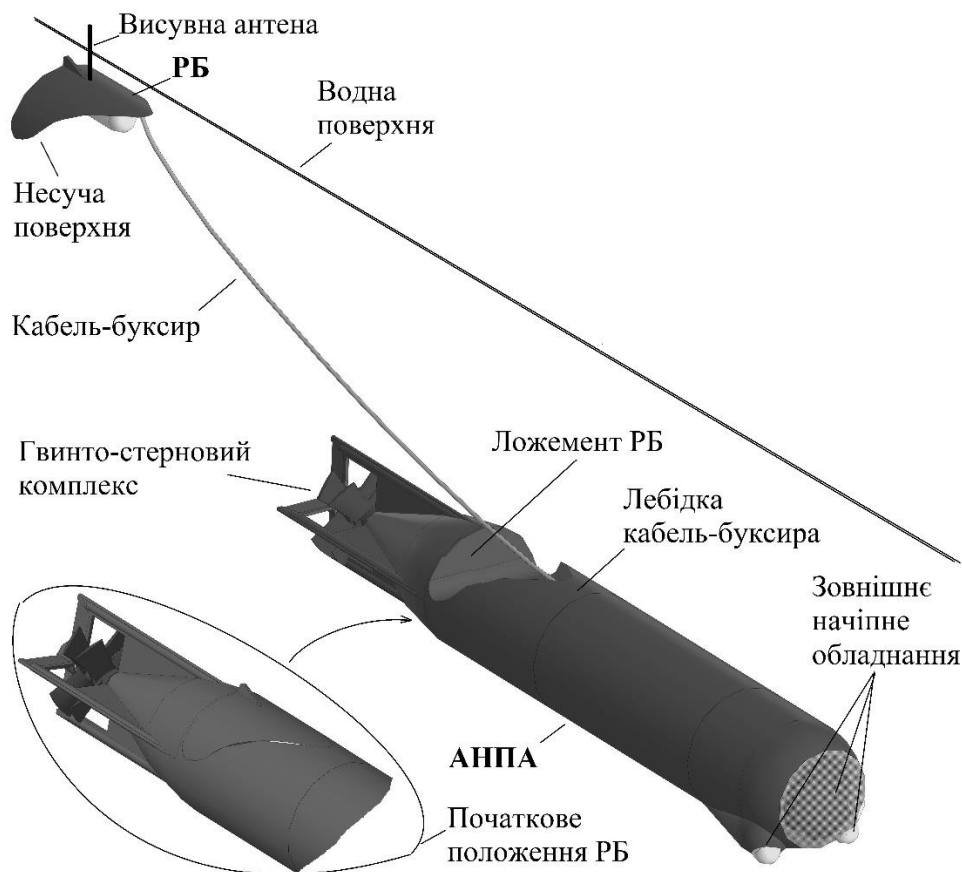


Рисунок 2 – Пропонований архітектурно-конструктивний тип автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм

Пропонований АНПА має торпедоподібну форму корпусу і оснащений гвинто-стерновим комплексом у складі двох гребних гвинтів контрроторного обертання та хвостового оперення у складі рулів напрямку та рулів глибини.

У носовій частині АНПА розташовано змінне начіпне обладнання для виконання підводних робіт згідно множині (4). У кормовій частині АНПА розміщено ложемент з РБ та лебідка кабель-буксира.

Під час виконання пошукових робіт на великих за площею акваторіях РБ знаходиться у ложементі і не створює додаткових гідродинамічних сил при автоматичному швидкісному русі АНПА за складними траєкторіями (початкове положення РБ показано на рис. 2). При виявленні бортовими відеооптичними приладами АНПА підводного предмета, схожого на

ПНП, підводний апарат автоматично проводить його первинну ідентифікацію і, за необхідністю, випускає на поверхню моря РБ і за його допомогою передає фото-, відео- та геолокаційну інформацію про ПНП. Крім того, за допомогою утвореного радіоканалу є можливість перевести роботу АНПА на ручне керування і виконати більш ретельне обстеження знайденого ПНП або виконати дії щодо застосування корисного вантажу АНПА для протидії виявленим ПНП.

Таким чином, застосування АНПА-РБ запропонованої конструкції дає змогу підвищити продуктивність пошукових робіт за рахунок підвищення швидкості підводного руху при знаходженні РБ у ложементі підводного апарата та за рахунок збільшення робочої зони обстеження забезпечує можливість прямого оперативного ручного керування підводним апаратом, а також спрощує експлуатацію всієї системи, оскільки розгортання РБ у робоче положення та повернення його до ложементу здійснюється автоматично.

Тобто, підводні апарати-роботи запропонованого архітектурно-конструктивного типу поєднують переваги «класичних» АНПА (незалежність їх роботи від дистанції до судноносія) з перевагами «класичних» НППА (можливість керування підводним роботом та отримання від нього інформації про підводну обстановку у реальному часі).

Етап T_P – обґрунтування основних проєктних задач зі створення ЗМР.

Аналіз результатів розв'язку етапів T_R , T_K і T_C множин (2), виконаний на основі системного підходу [23] дає змогу сформулювати основні проєктні задачі створення АНПА-РБ:

– задачі DT_D конструювання корпусу АНПА-РБ:

- конструювання АНПА як носія широкого переліку зовнішнього начіпного обладнання, призначеного для охорони та захисту об'єктів МКІ;

- конструювання РБ гідродинамічно обтічної конструкції, ложемента для нього та механізму випуску/впуску РБ до ложемента;

- підбір та обґрунтування конструкційних матеріалів та адитивних технологій виготовлення АНПА та РБ;

– задачі DT_E енергетичного забезпечення АНПА-РБ:

- отримання залежності «Дистанція – Швидкість – Енергоємність джерел енергії» для АНПА як теоретичної основи створення нового типу ЗМР;

- проєктування системи енергозабезпечення АНПА-РБ на базі сучасних джерел енергії;

– задачі DT_I інформаційно-навігаційного забезпечення АНПА-РБ:

- проєктування інтелектуальної системи автоматичного керування АНПА-РБ у нормальних та аварійних режимах роботи;

- проєктування системи зв'язку (радіо-, супутникового тощо) для реалізації дистанційного керування та контролю за функціонуванням АНПА-РБ;

- проєктування БЦК як складової системи ефективного застосування нового типу ЗМР за його призначенням;

– задачі DT_O експлуатації АНПА-РБ:

- удосконалення технології охорони та захисту об'єктів МКІ на базі застосування ЗМР нового типу;

- проєктування берегової інфраструктури для успішного застосування нового типу ЗМР за його призначенням.

Таким чином, множину DT основних проєктних задач зі створення ЗМР можна представити наступним чином:

$$DT = \{DT_D; DT_E; DT_I; DT_O\}. \quad (6)$$

Основні результати та їх обговорення. Охорона об'єктів морської критичної інфраструктури держави та її захист від несанкціонованого проникнення та протиправних дій на захищених акваторіях належить до важливих завдань забезпечення безпеки держави з

морського напрямку. Успішний розв'язок цього завдання можливий на основі широкого залучення сучасних засобів морської робототехніки, оскільки її застосування дає можливість виконувати оборонні заходи цілодобово та виключає суб'єктивний фактор, пов'язаний з помилками людини.

У результаті проведених досліджень сформульовано чотири основних види робіт, які можна виконувати з залученням засобів морської робототехніки: надводне обстеження захищених акваторій, підводне обстеження об'єктів МКІ, спостереження за функціонуванням виявлених потенційно небезпечних предметів, які можуть утворювати загрози об'єктам МКІ, та технічну протидію цим предметам з метою недопущення нанесення шкоди об'єктам МКІ.

З метою розробки ефективних засобів морської робототехніки запропоновано чотири основні етапи робіт: огляд і критичний аналіз існуючих типів ЗМР з позицій їх відповідності основним видам робіт; формування критеріїв ефективності застосування ЗМР для виконання цих робіт; обґрунтування вибору архітектурно-конструктивних типів ЗМР, які максимально повно відповідають вимогам сформованих критеріїв ефективності; обґрунтування основних проектних задач, які необхідно розв'язати для створення ЗМР з необхідними технічними та експлуатаційними характеристиками для виконання основних видів робіт по охороні і захисту об'єктів МКІ.

Для кожного з чотирьох основних етапів робіт запропоновано відповідні множини заходів щодо їх реалізації.

Так, для першого етапу робіт запропоновано множину засобів морської робототехніки та множину змінного начіпного обладнання, які доцільно залучати до робіт щодо забезпечення безпеки захищених акваторій та розташованих на них об'єктів МКІ.

Для другого етапу робіт запропоновано систему з трьох основних критеріїв ефективності застосування ЗМР: продуктивність, якість та економічна ефективність застосування конкретного засобу морської робототехніки для виконання необхідних робіт.

Для третього етапу робіт запропоновано удосконалений варіант автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм, який поєднує переваги «класичних» АНПА (незалежність їх роботи від дистанції до судна-носія та високу продуктивність підводних пошукових робіт) з перевагами «класичних» НППА (можливість керування підводним роботом та отримання від нього інформації про підводну обстановку у реальному часі).

Як результат попередніх досліджень для четвертого етапу робіт сформульовано задачі конструювання удосконаленого варіанту автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм, проектні задачі його енергетики та інформаційно-навігаційного забезпечення та задачі його ефективної експлуатації.

У цілому, отримані результати дослідження утворюють науково-технічне підґрунтя для започаткування проекту створення удосконаленого варіанту морської робототехніки, призначеного для ефективної охорони та захисту об'єктів МКІ від загроз з морського напрямку.

Висновки

1. З системних позицій розглянуто проблему підвищення ефективності систем охорони і захисту об'єктів морської критичної інфраструктури від несанкціонованих дій зловмисників на захищених акваторіях. У результаті аналізу особливостей охорони і захисту таких об'єктів сформульовано чотири основних види робіт, які можна виконувати з залученням засобів морської робототехніки. До них належать: надводне обстеження захищених акваторій, підводне обстеження об'єктів МКІ, спостереження за функціонуванням виявлених потенційно небезпечних предметів, які можуть утворювати загрози об'єктам МКІ та технічна протидія цим предметам з метою недопущення нанесення шкоди об'єктам МКІ.

2. Проблема вдосконалення системи охорони та захисту об'єктів МКІ від загроз з-під води запропоновано розв'язувати шляхом створення відповідних засобів морської робототехніки, для чого пропонується послідовна реалізація чотирьох етапів їх створення:

оцінка існуючого переліку вже існуючих засобів морської робототехніки, формування критеріїв їх ефективності застосування, обґрунтування вибору архітектурно-конструктивних типів нових видів підводних роботів, які максимально повно відповідають вимогам сформованих критеріїв ефективності та обґрунтування основних проєктних задач, які необхідно розв'язати для створення такої робототехніки.

3. Запропоновано удосконалення автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм, який поєднує переваги типових автономних та прив'язних ненаселених підводних апаратів, у результаті чого отримано архітектурно-конструктивний тип підводного апарата, робота якого не обмежена дистанцією до судна забезпечення та який має постійний двохсторонній радіо зв'язок з береговим центром керування.

4. Сформульовано задачі конструювання удосконаленого варіанту автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм, проєктні задачі його енергетики та інформаційно-навігаційного забезпечення та задачі його ефективної експлуатації. Такий підводний апарат є універсальним засобом морської робототехніки для успішного розв'язку завдань охорони і захисту об'єктів МКІ від загроз з-під води.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження автори вбачають за доцільне проводити у напрямках розв'язку основних проєктних задач зі створення удосконаленого варіанту автономного ненаселеного підводного апарата з радіобуєм згідно множині (6).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Diren Doğan, Cdr. (TÜR N) Deniz ÇETİKLİ. Maritime critical infrastructure protection in a changing security environment. Maritime Security Centre of Excellence (MCIP). 54 pages. <https://www.marseccoe.org/wp-content/uploads/2023/10/Maritime-Critical-Infrastructure-Protection-.pdf>.

2. Njall Trausti Fridbertsson. Protecting critical maritime infrastructure – the role of technology. General Report. NATO Parliamentary Assembly. <https://www.nato-pa.int/download-file?filename=/sites/default/files/2023-10/032%20STC%2023%20E%20rev.%202%20fin%20-%20CRITICAL%20MARITIME%20INFRASTRUCTURE%20-%20FRIDBERTSSON%20REPORT1.Pdf>.

3. Artur L. Protection of Critical Maritime Infrastructure with New Technologies. <https://www.linkedin.com/pulse/protection-critical-maritime-infrastructure-new-artur-lucas-da-silva>.

4. Bykanova Yu., Kostenko V. V., Michailov D. N. Development of Towed Radio Buoy for AUV. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 720, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012003>.

5. Timothy Meale Jone, Timothy James Whitten. BUOY. United States Patent Application Publication. Pub. No.: US 2011/0000417 A1. Pub. Date: Jan. 6, 2011. <https://patentimages.storage.googleapis.com/0c/ad/cf/897a41bae61e3e/US20110000417A1.pdf>.

6. AN/BSQ-5 Towed Buoy. <https://man.fas.org/dod-101/sys/ship/weaps/an-bsq-5.htm>.

7. Gladius Submersible Underwater Drone. <https://www.rccorner.ae/gladius-submersible-underwater-drone>.

8. Michael Stein. Integrating Unmanned Vehicles in Port Security Operations: An Introductory Analysis and First Applicable Frameworks. June 2018. Ocean Yearbook Online 32(1):556-583. <https://doi.org/10.1163/22116001-03201022>.

9. Suwaid Al Abkal Risto Talas Sarah Shaw Tom Ellis. The application of unmanned aerial vehicles in managing port and border security in the US and Kuwait: Reflections on best practice for the UK. *International Journal of Maritime Crime & Security*, Volume 01 Issue 01, 01 Feb 2020. <https://doi.org/10.24052/IJMCS/V01IS01/ART-3>. <https://ijmcs.co.uk/details&cid=5>.

10. Rachel Doornekamp. How ROVs Improve Port Security. October 10th, 2019. <https://www.deeptrekker.com/news/how-rovs-improve-port-security>.

11. Zygmunt Kitowski. Selection of UUV Type ROV Equipment and Cooperation System with USV "Edredon" in Protection Tasks of Ports and Critical Objects. *Trans. marit. sci.* 2019; 02:

198-204 pages. <https://doi.org/10.7225/toms.v08n02.004> https://www.researchgate.net/publication/336726635_Selection_of_UUV_Type_ROV_Equipment_and_Cooperation_System_with_USV_Edredon_in_Protection_Tasks_of_Ports_and_Critical_Objects.

12. Sakai H., Tanaka T. Underwater observation system using Autonomous Towed Vehicle. *OCEANS '04. MT-TS/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, Volume 2, 2004. P. 822–827.

13. Блинцов А. В., Чан Т. Д. Система автоматического управления специализированным морским комплексом с буксируемым подводным аппаратом. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков : ЧП «Технологический Центр», 2013. № 5/4 (65). С. 23–27. <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-avtomaticheskogo-upravleniya-spetsializirovannym-morskim-kompleksom-s-buksiruемым-podvodnym-apparatom/pdf>.

14. Miętkiewicz Rafał. Autonomous systems in maritime operations. Polish Naval Academy of the Heroes of Westerplatte. Gdynia 2023. 99 pages. https://www.researchgate.net/publication/371990284_AUTONOMOUS_SYSTEMS_IN_MARITIME_OPERATIONS.

15. Inyeong Bae, Jungpyo Hong. Survey on the Developments of Unmanned Marine Vehicles: Intelligence and Cooperation. *Sensors* 2023, 23(10), 4643; <https://doi.org/10.3390/s23104643>.

16. Massimo Caccia, Marco Bibuli. (2007). Unmanned Surface Vehicle for Coastal and Protected Waters Applications: the Charlie Project. *Marine Technology Society Journal*, 41(2). Pages 62–71.

17. Mariusz Kastek, Marek Życzkowski, Mieczysław Szustakowski, Rafał Dulski. Multisensor system for the protection of critical infrastructure of seaport. Proceedings of SPIE. *The International Society for Optical Engineering*. <https://doi.org/10.1117/12.918595>.

18. Terracciano D. S., Bazzarello L., Caiti A., Costanzi R., Manzari V. Marine Robots for Underwater Surveillance. *Current Robotics Reports*, 2020. №1. Pages 159–167.

19. Satja Sivčeva, Joseph Coleman, Edin Omerdića, Gerard Dooly, Daniel Toal. Underwater manipulators: A review. *Ocean Engineering*. Volume 163, 1 September 2018, Pages 431–450.

20. Ronald Kessel, Christopher Strode. Modifications of non-lethal equipment for maritime infrastructure protection. Conference: 5th European Symposium on Non-lethal Weapons, May 11–13, 2009. At: Karlsruhe, Germany. https://www.researchgate.net/publication/340844807_AN_ASSESSMENT_OF_NON-LETHAL_WEAPONS_TECHNOLOGY_AND_TACTICS_FOR_MARITIME_ASSET_PROTECTION.

21. Підводні апарати. Рекламно-інформаційне видання. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. Миколаїв : *НУК*, 2023. 37 с.

22. Blintsov V., Maidaniuk P., Sirivchuk A. 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>.

23. Pahl G., Beitz W., Feldhusen J. Engineering Design: A Systematic Approach – Springer; 2007. 617 pages. file:///C:/Users/SLpro/Downloads/Engineering%20Design%20-%20Parte%201-1.pdf.

REFERENCES

1. Diren DOĞAN, Cdr. (TÜR N) Deniz ÇETİKLİ. (2023). Maritime critical infrastructure protection in a changing security environment. Maritime Security Centre of Excellence (MCIP). 54 pages. <https://www.marseccoe.org/wp-content/uploads/2023/10/Maritime-Critical-Infrastructure-Protection-.pdf>.

2. Njall Trausti FRIDBERTSSON. (2023). Protecting critical maritime infrastructure – the role of technology. General Report. NATO Parliamentary Assembly. <https://www.nato-pa.int/download-file?filename=/sites/default/files/2023-10/032%20STC%2023%20E%20rev.%20%20fin%20-%20CRITICAL%20MARITIME%20INFRASTRUCTURE%20-%20FRIDBERTSSON%20REPORT1.pdf>.

3. Artur, L. (2023). Protection of Critical Maritime Infrastructure with New Technologies. <https://www.linkedin.com/pulse/protection-critical-maritime-infrastructure-new-artur-lucas-da-silva>.
4. Bykanova, Yu., Kostenko, V. V., Michailov, D. N. (2021). Development of Towed Radio Buoy for AUV. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 720, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/720/1/012003>.
5. Timothy Meale Jone, Timothy James Whitten. (2011). BUOY. United States Patent Application Publication. Pub. No.: US 2011/0000417 A1. Pub. Date: Jan. 6, 2011. <https://patentimages.storage.googleapis.com/0c/ad/cf/897a41bae61e3e/US20110000417A1.pdf>.
6. AN/BSQ-5 Towed Buoy. <https://man.fas.org/dod-101/sys/ship/weaps/an-bsq-5.htm>.
7. Gladius Submersible Underwater Drone. <https://www.rccorner.ae/gladius-submersible-underwater-drone>.
8. Michael Stein. (2018). Integrating Unmanned Vehicles in Port Security Operations: An Introductory Analysis and First Applicable Frameworks. June 2018. Ocean Yearbook Online 32(1):556-583. <https://doi.org/10.1163/22116001-03201022>.
9. Suwaid Al Abkal Risto Talas Sarah Shaw Tom Ellis. (2020). The application of unmanned aerial vehicles in managing port and border security in the US and Kuwait: Reflections on best practice for the UK. *International Journal of Maritime Crime & Security*, Volume 01 Issue 01, 01 Feb 2020. <https://doi.org/10.24052/IJMCS/V01IS01/ART-3>. <https://ijmcs.co.uk/details&cid=5>.
10. Doornekamp Rachel. (2019). How ROVs Improve Port Security. October 10th, 2019. <https://www.deeptrekker.com/news/how-rovs-improve-port-security>.
11. Zygmunt Kitowski. (2019). Selection of UUV Type ROV Equipment and Cooperation System with USV "Edredon" in Protection Tasks of Ports and Critical Objects. *Trans. marit. sci.* 2019; 02: 198-204 pages. <https://doi.org/10.7225/toms.v08n02.004>. https://www.researchgate.net/publication/336726635Selection_of_UUV_Type_ROV_Equipment_and_Cooperation_System_wit_h_USV_Edredon_in_Protection_Tasks_of_Ports_and_Critical_Objects.
12. Sakai, H., Tanaka, T. (2004). Underwater observation system using Autonomous Towed Vehicle. *OCEANS '04. MT-TS/IEEE TECHNO-OCEAN '04*, Volume 2, 2004. P. 822–827.
13. Blincov, A. V., CHan, T. D. (2013). Sistema avtomaticheskogo upravleniya specializirovannym morskim kompleksom s buksiruemym podvodnym apparatom. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*. Harkov : *Tehnologicheskij Centr*. № 5/4 (65). P. 23–27. <https://cyberleninka.ru/article/n/sistema-avtomaticheskogo-upravleniya-spetsializirovannym-morskim-kompleksom-s-buksiruemym-podvodnym-apparatom/pdf>.
14. Miętkiewicz, Rafał. (2023). Autonomous systems in maritime operations. Polish Naval Academy of the Heroes of Westerplatte. Gdynia 2023. 99 pages. https://www.researchgate.net/publication/371990284_AUTONOMOUS_SYSTEMS_IN_MARITIME_OPERATIONS.
15. Inyeong, Bae, Jungpyo, Hong. (2023). Survey on the Developments of Unmanned Marine Vehicles: Intelligence and Cooperation. *Sensors* 2023, 23(10), 4643; <https://doi.org/10.3390/s23104643>.
16. Massimo, Caccia, Marco, Bibuli (2007). Unmanned Surface Vehicle for Coastal and Protected Waters Applications: the Charlie Project. *Marine Technology Society Journal*, 41(2). Pages 62–71.
17. Mariusz Kastek, Marek Życzkowski, Mieczysław Szustakowski, Rafał Dulski. (2012). Multisensor system for the protection of critical infrastructure of seaport. Proceedings of SPIE. *The International Society for Optical Engineering*. <https://doi.org/10.1117/12.918595>.
18. Terracciano, D. S., Bazzarello, L., Caiti, A., Costanzi, R., Manzari, V. (2020). Marine Robots for Underwater Surveillance. *Current Robotics Reports*, 2020. №1. Pages 159–167.
19. Satja Sivčeva, Joseph Coleman, Edin Omerdića, Gerard Dooly, Daniel Toal. (2018). Underwater manipulators: A review. *Ocean Engineering*. Volume 163, 1 September 2018, Pages 431–450.
20. Ronald Kessel, Christopher Strode. (2009). Modifications of non-lethal equipment for maritime infrastructure protection. Conference: 5th European Symposium on Non-lethal Weapons,

May 11–13, 2009. At: Karlsruhe, Germany. https://www.researchgate.net/publication/340844807_AN_ASSESSMENT_OF_NON-LETHAL_WEAPONS_TECHNOLOGY_AND_TACTICS_FOR_MARITIME_ASSET_PROTECTION.

21. Pidvodni aparaty. Reklamno-informatsiine vydannia. Natsionalnyi universytet korablebuduvannia imeni admirala Makarova. (2023). Mykolaiv : NUOS, 37 p.

22. Blintsov, V., Maidaniuk, P., Sirivchuk, A. (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>.

23. Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J. (2007). Engineering Design: A Systematic Approach – Springer; 2007. 617 pages. file:///C:/Users/SLpro/Downloads/Engineering%20Design%20-%20Parte%201-1.pdf.

Blintsov V. S., Tarchuk A. A., Trybulkevych V. V. PROJECT TASKS OF CREATING MARINE ROBOTICS FOR PROTECTION AND PROTECTION OF MARINE CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

The protection of objects of maritime critical infrastructure of the state belongs to the important tasks of ensuring the security of the state from the sea direction. A successful solution to this task is possible based on the broad involvement of modern means of marine robotics. This makes it possible to perform defensive measures around the clock and eliminates the subjective factor associated with human error. The article formulates the task of increasing effectiveness of the protection and security of marine critical infrastructure objects by using special means of marine robotics. The main types of works to protect water areas that can be performed with the involvement of marine robotics are given. Many such works include surface and underwater survey of water areas, observation of discovered potentially dangerous objects and technical countermeasures against these objects. The main stages of work on the creation of new means of underwater robotics are proposed. They include the analysis of existing types of robots, the formation of criteria for the effectiveness of their application, the justification of a new architectural and constructive type of robot and the tasks of its design. The first stage of the work includes a set of marine robotics and a set of variable attachment equipment, which should be involved in security work. The second stage of the work includes three criteria for the effectiveness of the use of robots: their productivity, quality of work and economic efficiency of use. The third stage of the work includes an improved version of an autonomous unmanned underwater vehicle with a radio buoy. The robot combines the advantages of traditional autonomous and tethered unsalted underwater vehicles. It has high performance, constant two-way communication with the supply ship and can operate at long distances from it. The fourth stage of the work includes the tasks of designing an improved underwater vehicle with a radio buoy, design tasks of its energy, informatics and operation. The results of the research form the scientific and technical basis of the project to create an improved version of marine robotics for effective protection and security of marine critical infrastructure facilities.

Key words: marine infrastructure facility; marine robotics tool; underwater vehicle; towed radio buoy.

© Блінцов В. С., Тарчук А. А., Трибулькевич В. В.

Статтю прийнято до редакції 14.06.2024

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО
MATERIALS SCIENCE

УДК 531.782,620.17

СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ПРИ РЕНОВАЦІЇ ВИПРОБУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

Алексенко В. Л., старший викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: aleksenko.vl.1944@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4472-0934;

Юренин К. Ю., старший викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: kirr_87@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3687-6023;

Татарінцева Ю. Г., старший викладач кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: tatarintseva.yuliiia@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8865-4126;

Фостик П. П., стажер-дослідник кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: defold.fp@gmail.com, ORCID: 0009-0000-8418-0827;

Васильченко Г. Ю., к.п.н., доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: vasilchenkogenadii@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8320-4441;

Знамеровська Н. П., к.п.н., доцент кафедри транспортних технологій та механічної інженерії, Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: znamer0499995@gmail.com, ORCID: 0000-0002-5444-6556;

Онишко Д. М., старший викладач кафедри інноваційних технологій та технічних засобів судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: onushkodn@gmail.com, ORCID: 0009-0005-8394-3091.

У статті відмічається, що за останні півтора століття у галузі створення приладів для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів сформовано основні конструктивні схеми машин для випробування зразків матеріалів. Силова частина цих машин не зазнала принципових змін, проте застосовуваний суто механічний спосіб реєстрації зусиль і деформацій в даний час замінюється на електричні методи вимірювання неелектричних величин. Значна частина обладнання у виробничих, дослідницьких та навчальних лабораторіях випущена у другій половині 20 століття і робота їх механізмів цілком задовольняє сучасні вимоги. Останнє створює умови економічної доцільності щодо його модернізації з урахуванням сучасних засобів вимірів і комп'ютерної обробки даних.

Дослідно-конструкторська робота, що розглядається, вирішує завдання схемотехнічної модернізації обладнання науково-дослідної лабораторії Полімерних композитних матеріалів у суднобудуванні Херсонської державної морської академії та створення програмного забезпечення для попередньої обробки даних з використанням комп'ютерної та інженерної графіки. Механічний ресурс випробувальних машин лабораторії виробництва 60-х років добре зберігся і доробок потребують лише вимірювальні системи. Враховуючи зростання вимог національних та міжнародних стандартів щодо контролю якості продукції та відтак точності засобів вимірювань, на сучасній елементній базі розроблено схемотехнічні рішення: тензометричного силовимірювача; вимірювача деформацій; електричного приводу пристрою, що навантажує. Створено комплекс програм для обробки та графічної інтерпретації результатів вимірювань, у тому числі спеціалізоване програмне забезпечення для обробки результатів випробування зразків матеріалів на чистий вигин, що дозволяє компенсувати систематичну похибку нуля силовимірювача навантажувального пристрою.

Ключові слова: опір матеріалів; випробувальні машини; зразки матеріалів; засоби вимірювання; реновація; модернізація; економічна доцільність; програмне забезпечення; комп'ютерна та інженерна графіка.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.093-103

Вступ. У процесі науково-технічного прогресу окремі напрями технічної механіки досягли певної міри завершеності та, у межах своїх можливостей, продовжують успішно застосовуватися інженерами. Зокрема, рішення одновірної задачі теорії пружності методами опору матеріалів цінуються та успішно використовуються конструкторами і технологами

незважаючи на розвиток сучасних чисельних методів та необхідність перед запуском виробу в серію проводити великий обсяг робіт з експериментального доведення [1].

У галузі створення приладів для визначення фізико-механічних властивостей матеріалів також сформовано основні конструктивні схеми машин для випробування зразків матеріалів на розтягування-стискання, кручення та вигин.



Рисунок 1 – Еволюція випробувальних машин

На рис. 1а представлена розривна машина останньої третини 19 століття конструкції О. Мора, що «жорстко задає деформацію» зразка за допомогою одного силового гвинта і пасового приводу від валу трансмісії [2].

На малюнках 1б і 1в зображені сучасні одностійкові та двостійкові електромеханічні розривні машини китайського виробництва [3].

Силова частина цих машин за останні півтора століття не зазнала принципових змін, проте суто механічний спосіб реєстрації зусиль та деформацій при випробуванні зразків у першому випадку, нині замінений на електричні методи вимірювання неелектричних величин. Аналогічна ситуація склалася із гідравлічними випробувальними машинами. Слід також враховувати, що більшу частину витрат на виробництво електромеханічних і гідравлічних випробувальних машин припадає саме на їх механічну частину. Крім того, значна частина такого обладнання у виробничих, дослідницьких та навчальних лабораторіях випущена у другій половині 20 століття і робота їх механізмів цілком задовольняє сучасні вимоги. Останнє створило умови економічної доцільності модернізації цього устаткування з урахуванням сучасних засобів вимірювання та комп'ютерної обробки даних [4].

Постановка проблеми. У даний час багато видів випробувального обладнання, що експлуатується на підприємствах та в науково-дослідних лабораторіях, втрачають експлуатаційні властивості внаслідок фізичного та морального зносу [5]. Крім того, зростають вимоги національних та міжнародних стандартів до контролю якості продукції та відповідно до точності засобів вимірювань (табл. 1).

Таблиця 1 – Вимоги до випробувального обладнання

Стандарт	Гранична похибка виміру не більш, %	
	зусилля	деформації
ГОСТ 28840	±1	±2
ISO 6892-1	±1	±1
ASTM E4 ASTM E8/E8M	±1	±0,5

Вимоги стандартів можуть бути задоволені шляхом закупівлі відповідного обладнання. Однак такий варіант є дуже витратним, а можливість придбання потрібного обладнання найчастіше відсутня. В останньому випадку модернізація існуючого обладнання

є оптимальним та ефективним рішенням. Оскільки механічний ресурс вітчизняних випробувальних машин з часом добре зберігається, то доопрацювання потребують лише вимірвальні системи.

Такі доопрацювання базуються здебільшого на електричних методах вимірювання неелектричних величин з подальшою комп'ютерною обробкою, доповненою графічним представленням результатів.

Тому основною проблемою, що вирішується у цій статті, є модернізація обладнання лабораторії з використанням схмотехнічних рішень на сучасній елементній базі, а також спеціалізованого програмного забезпечення та механічних пристроїв.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зазначена вище проблема модернізації існуючого парку обладнання для дослідження фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів та захисних покриттів, а також програмного забезпечення для обробки результатів вимірювань широко обговорюється у відповідному інформаційному секторі. Робиться висновок про економічну доцільність такої модернізації та надаються комерційні пропозиції на виконання відповідних дослідно-конструкторських та виробничих робіт [5–9].

Мета дослідження – вирішення схмотехнічних завдань модернізації обладнання науково-дослідної лабораторії полімерних композитних матеріалів у суднобудуванні Херсонської державної морської академії (далі лабораторія ПКМС ХДМА) та створення програмного забезпечення для попередньої обробки даних з використанням комп'ютерної та інженерної графіки.

Основний зміст. Нижче розглядаються деякі схмотехнічні рішення, розроблені та впроваджені при реновації обладнання лабораторії ПКМС ХДМА.

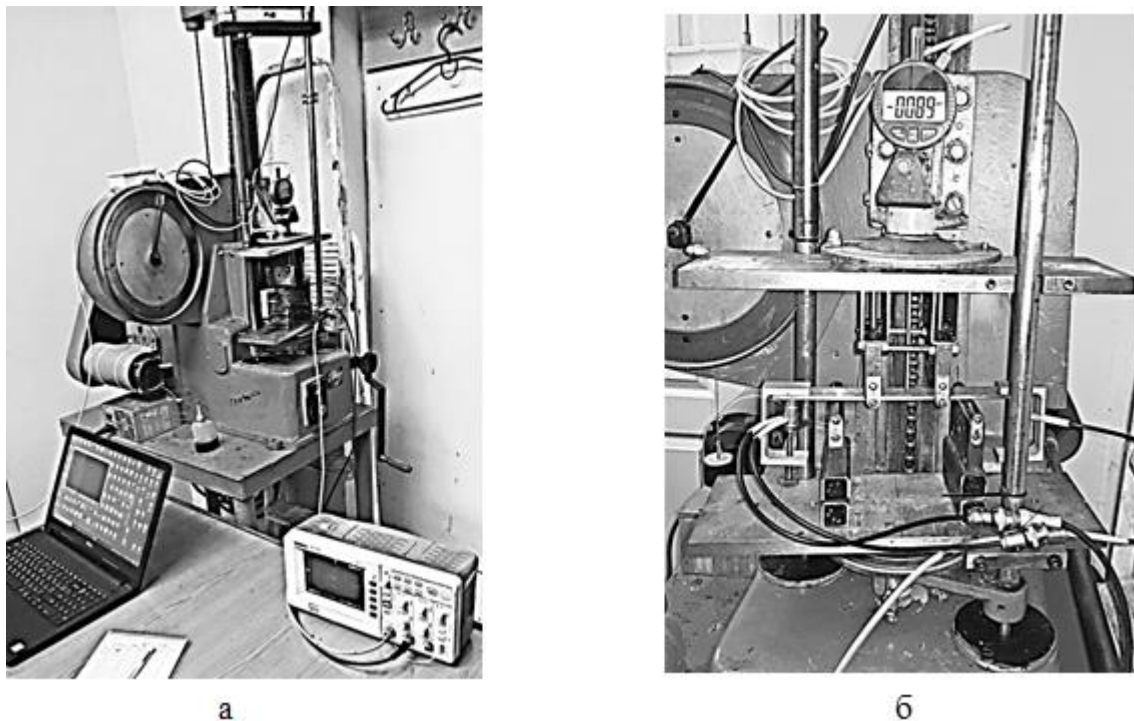


Рисунок 2 – Машина МИП-100 із пристосуванням для випробування зразків на чистий згин (патент на корисну модель UA 140422 від 25.02.2020): а) загальний вигляд; б) із встановленим зразком

Зокрема, машина для випробування пружин МИП-100 (рис. 2), дообладнана для механічних випробувань зразків матеріалів на чистий (чотирьохточковий) вигин навантажуючою рухомою та опорною нерухою траверсами. Кожна траверса має пару пересувних шарнірних опор. Механізм приводу рухомої траверси містить додатковий імпульсний блок живлення, кроковий двигун та планетарний редуктор. Цей пристрій забезпечує широкий діапазон швидкостей навантаження.

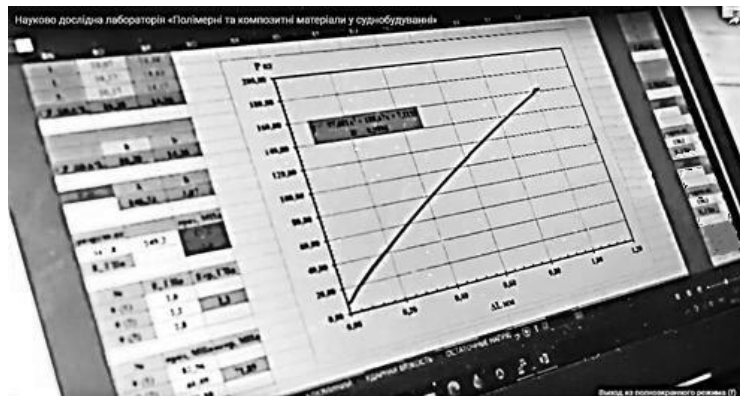


Рисунок 3 – Графічне відображення результатів випробування зразка

Вимірювальна система обладнана автоматизованим патентованим [10] пристроєм для визначення механічних характеристик зразків матеріалів і містить: тензометричний силовимірювач; таймер відліку часу; цифровий індикатор прогину; інформаційний блок; блок обробки аналогових сигналів, а також канали відображення та аналізу інформації із застосуванням комп'ютерної й інженерної графіки (рис. 3).

Для підвищення точності механічних випробувань конструкційних матеріалів розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для обробки методом найменших квадратів результатів випробування зразків на чистий вигин, що має такі переваги:

- програма, написана поширеною мовою високого рівня Pascal ABC, пропонується у вихідних кодах, забезпечена вичерпними коментарями і дозволяє рядовим користувачам проводити її подальші модифікації;
- алгоритм забезпечує компенсацію систематичної похибки установки нуля силовимірювача пристрою, що навантажує [11].

На рис. 4 представлена підсумкова блок-схема додаткового обладнання для реновації машини МИП-100.

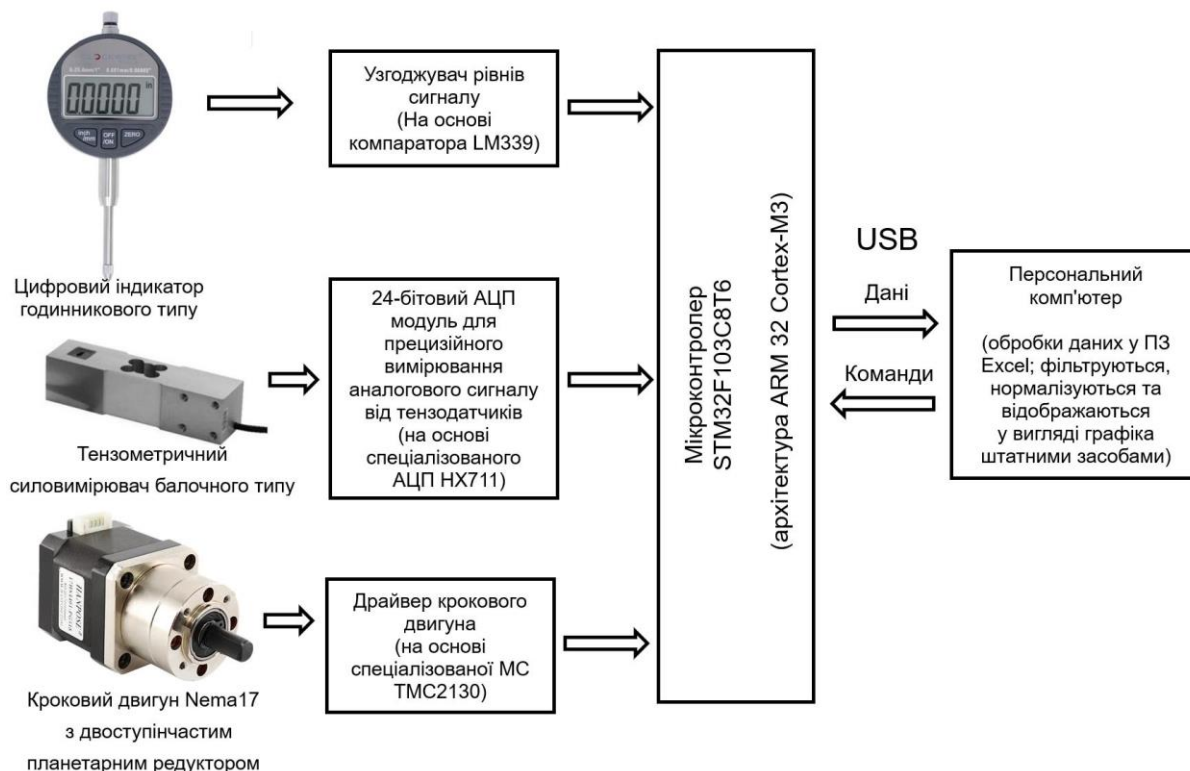


Рисунок 4 – Блок-схема реновації машини МИП-100 для випробування зразків на чистий згин

Нижче наведено схемотехнічні рішення для компонентів, що забезпечують процес вимірювань.

1. На рисунку 5 представлено підключення за 4-х провідною схемою силовимірювача на базі консольного тензодатчика SP5 [12].

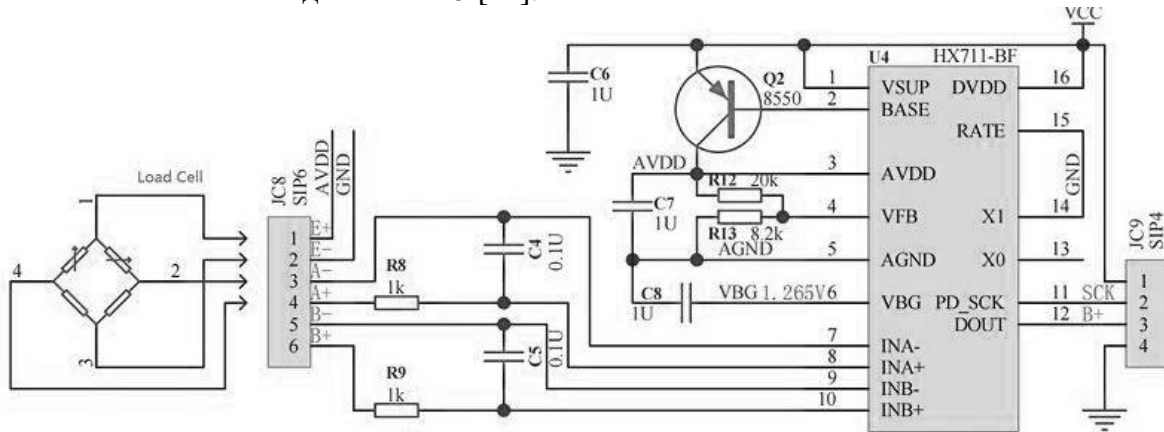


Рисунок 5 – Підключення тензодатчика SP5 з межею зважування – 250 кгс, класу точності – С3 через АЦП

2. Для вимірювання деформацій використано цифровий індикатор годинникового типу (ІЛТ) ClockwiseTools DITR-0105 [13], показаний на рис. 4. Прилад має РКІ для відображення результатів вимірювання та послідовний інтерфейс для виведення даних. У процесі роботи з'ясувалося, що вихідний порт має три лінії – землю GRND, лінію даних DT та лінію синхронізації CLK. Стало зрозуміло, що для передачі цієї інформації в мікроконтролер (МК) необхідно перетворити нестандартні рівні вихідних сигналів індикатора (низький – 0 В, високий – 1.5 В) на рівні ТТЛ (Транзисторно-транзисторної логіки). Проблема була вирішена за допомогою перетворювача рівнів, який формує сигнали ТТЛ для подачі їх на цифрові входи МК.

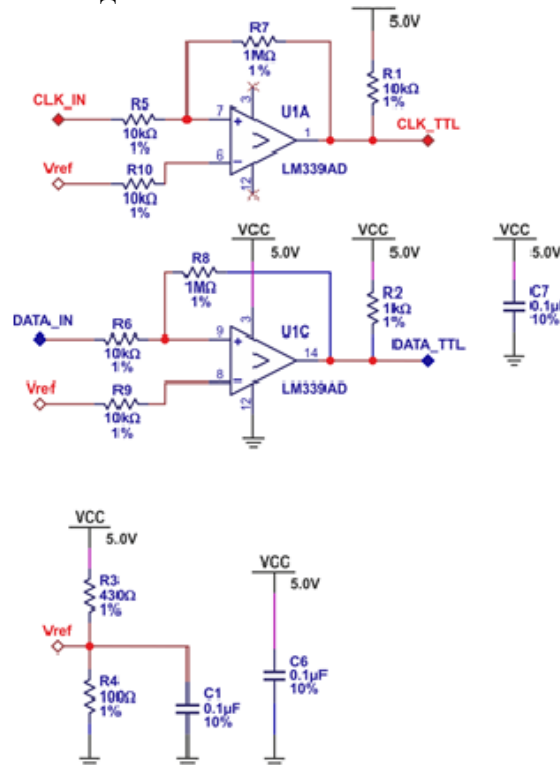


Рисунок 6 – Схема аналогової частини

Зупинимося докладніше на перетворювачі рівнів. Як зазначалося вище, вхідні сигнали мають рівні 0 і 1.5 В. Для формування сигналів ТТЛ рівня була застосована схема на основі компаратора LM339 (використовувалися два канали з чотирьох) (рис. 6). Один канал обробляє сигнал DT, другий – CLK. Принцип роботи схеми простий – на негативні входи

обох компараторів подається опорне напруження величиною приблизно +1 В. На позитивні входи надходять сигнали з ІЧТ. Виходи компаратора повторюють зміни входних сигналів, але з рівнями ТТЛ. Ці вихідні сигнали ТТЛ подаються на цифрові входи МК [14].

3. Електромеханічний привід навантажувального пристрою включає імпульсний блок живлення та кроковий двигун Nema17 [15] з двоступінчастим планетарним редуктором (рис. 4), що замінює штатний трифазний.

4. Програмне забезпечення обробки та графічної інтерпретації результатів вимірювань.

Дані передаються для подальшої обробки у комп'ютерну програму Excel, де фільтруються, нормалізуються та відображаються у вигляді графіка штатними засобами (рис. 3). Остаточна обробка результатів вимірів ведеться з використанням програми [4].

Особливості реновації універсальної випробувальної машини УМ-5.

Однією з основних проблем при випробуванні зразків матеріалів на стиск є забезпечення стійкості форми пружної рівноваги, що обмежує їхню відносну довжину.

При випробуванні на розтяг виникає проблема закріплення кінців зразка. Великі обсяги випробувань в умовах лабораторії ПКМС зажадали розробки нових взаємодоповнюючих конструктивних рішень для захватів, що самоцентруються, і заплечиками зразків, що забезпечують просту і надійну фіксацію в них.

На рис. 7 представлена модернізована випробувальна машина УМ-5, оснащена патентованими захватами, що самоцентруються [16].

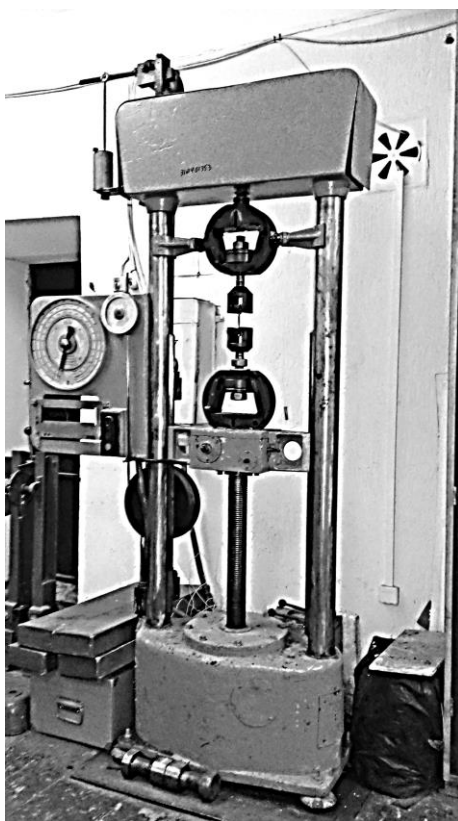


Рисунок 7 – Випробувальна машина УМ-5 з захватами, що само центруються, патент на корисну модель UA 143840 від 10.08.2020

Конструкція зразків значною мірою визначається властивостями матеріалів та відповідною технологією їх виготовлення.

На рис. 10 представлений зразок з патентованими знімними заплечиками [17] багаторазового використання для випробування на розтягування переважно полікристалічних матеріалів у захопленнях [16] встановлених замість зношених штатних. Кожне заплечико включає зовнішнє бандажне і внутрішнє кільце, що клинить, сполучене по конічній поверхні з головками циліндричного зразка і розділене на частини для забезпечення

складання. На зовнішній поверхні внутрішнього кільця, що клинить, можуть бути виконані одна або більше проточок для встановлення в них, з метою зручності складання, кільцевої скріплюючої розрізної пружини або суцільного кільця з еластичного матеріалу.



Рисунок 10 – Зразок зі знімними заплечиками, що багаторазово використовуються

На рис. 11 зображено призматичний зразок для випробування композитних матеріалів на основі реактопластів [18]. Партії зразків отримують методом спільної виливки в розбірну форму (опалубку), розраховану на одночасне отримання кількох зразків.

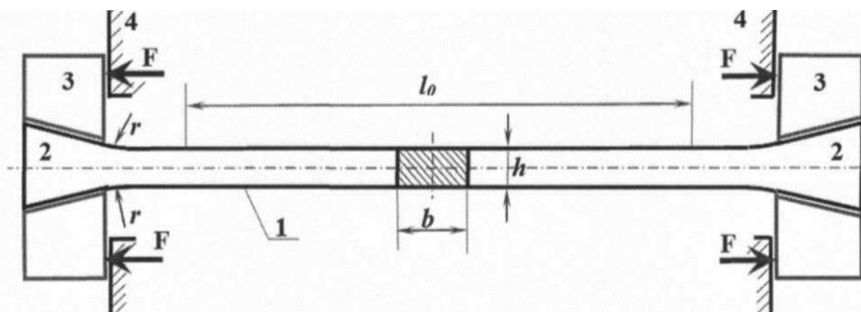


Рисунок 11 – Зразок для випробування композитів на розтяг: 1 – базова частина зразка завдовжки l_0 , 2 – заплечики у формі клина, 3 – вилки захоплення, 4 – контактна поверхня захоптів

Слід зазначити, що механічні силовимірювальні пристрої, передбачені виробниками випробувальних машин МІП-100 та УМ-5, забезпечують точність, що регламентується сучасними стандартами (табл. 1). Модернізація цих машин у лабораторії ПКМС виконувалася так, щоб зберегти:

- основні конструкції навантажувальних пристроїв та діапазони навантажень;
- працездатність механічних засобів вимірювань, передбачених виробником як резервні;
- можливість їх повірки з використанням зразкових динамометрів та лінійного вимірювального інструменту.

При цьому зручніші та ефективніші електричні засоби вимірювань неелектричних величин, впроваджені у представлені вимірювальні комплекси, працюють паралельно з механічними. Для них розроблено відповідні методики повірки. Докладніше питання метрологічного забезпечення лабораторії ПКМС та узгодження методик повірки нестандартних засобів вимірювань з державними органами контролю будуть розглянуті у наступних публікаціях.

Висновки та рекомендації. Відмічається опрацьованість конструкцій та високий ресурс їх механічної частини для основних типів випробувальних машин.

Робиться висновок щодо економічної доцільності модернізації вітчизняного парку машин для випробування механічних властивостей конструкційних матеріалів.

Наведено схемотехнічні рішення, розроблені в лабораторії ПКМС:

- тензометричного силовимірювача;
- вимірювача деформацій;
- електричного приводу пристрою, що навантажує.

Розроблено:

- пристрої для випробування зразків на чистий вигин;
- технологічні конструкції захоплень та зразків, що прискорюють роботу персоналу лабораторій;
- комплекс програм для обробки та графічної інтерпретації результатів вимірювань [10].

Знайдені технічні рішення можуть бути корисними організаціям, підприємствам та лабораторіям при модернізації обладнання.

Перспективи подальших досліджень. З урахуванням економічної ситуації та виробничих можливостей планується:

- створення нових технологічних методів та засобів вимірювань;
- продовження модернізації існуючого обладнання лабораторії;
- дослідно-конструкторські роботи зі створення та підготовки виробництва спеціального обладнання необхідного для досліджень при розробці композитів із заздалегідь заданими властивостями [19–21].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Алексенко В. Л., Сметанкін С. О., Фостик П. П., Букетов О. А. Чисельний розрахунок напружено-деформованого стану композитних матеріалів з урахуванням фізичної та геометричної нелінійності Проблеми тертя та зношування, Вісник Національного Авіаційного Університету, 2022. № 3(96), с. 99–109 ISSN 03702197.
2. Енциклопедичний словник Ф. А. Брокгауза та І. А. Єфрона. Машини для дослідження опору матеріалів. URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/brokgauz_efron/140987/%D0%A1%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5 (дата звернення: 15.04.2024).
3. Універсальність випробувальних машин. URL: <https://www.globaltest.uz/news/stati/universalnost-universalnykh-ispytatelnykh-mashin-uim/> (дата звернення: 15.04.2024).
4. Алексенко В. Л., Букетов А. В., Браило Н. В., Белошицкий С. А. Компенсація систематичної помилки під час обробки результатів випробувань конструкційних матеріалів. Науковий вісник Херсонської державної морської академії № 2 (11), 2014, с. 132–136.
5. Нове життя випробувального обладнання. Капітальний ремонт та модернізація. URL: <https://ukrintech.com.ua/ru/novaya-zhizn-ispytatelnogo-oborudovaniya-kapitalnyj-remont-i-modernizatsiya> (дата звернення: 15.04.2024).
6. Модернізація Р/М усіх типів. URL: <http://asma.com.ua/content/razryvnye-mashiny/modernizatsiya-r-m-vsekh-tipov> (дата звернення: 15.04.2024).
7. Successful modernization of materials testing machines. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/zwickroell-gmbh-co-kg/successful-modernization-materials-testing-machines/15660-343231.html> (дата звернення: 15.04.2024).
8. Modernization of materials testing machines. URL: <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-nacional-de-rio-cuarto/plastica/99-269-testing-of-plastics-and-rubber-e-en/29883021> (дата звернення: 15.04.2024).
9. Podnebennaya, S. K., Burlaka, V. V., Gulakov, S. V., & Kysliak, V. G. Модернізація розривної машини 2167P-50 для дослідження міцності зварних з'єднань. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (36), 113–119. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.36.2018.142532>.

10. Автоматизований пристрій для визначення механічних характеристик металів при чотириточковому згині: пат. 140422 Україна: МПК G01N 3/20, G01N 29/14. № 2019 08236; заяв. 15.07.2019; опубл. 25.02.20, Бюл. № 4.
11. Алексенко В. Л., Букетов А. В., Браило Н. В., Белошицкий С. А. Повышение точности механических испытаний конструкционных материалов. Матеріали 5-ї Всеукраїнської науково-практичної конференції СЕУТТОО-2014 с.233–236.
12. Тензодатчик SP5 консольний 50 ~ 300Kg. URL: <https://kobastar.com/ru/product-details/%d1%82%d0%b5%d0%bd%d0%b7%d0%be%d0%b4%d0%b0%d1%82%d1%87%d0%b8%d0%ba-sp5-%d0%ba%d0%be%d0%bd%d1%81%d0%be%d0%bb%d1%8c%d0%bd%d1%8b%d0%b9/> (дата звернення: 15.04.2024).
13. ClockwiseTools DITR-0105 <https://clockwisetools.com/products/clockwise-tools-ditr-0015-digital-indicator-0-0-5-12-7mm-resolution-0-00005> (дата звернення: 15.04.2024).
14. Узгодження логічних рівнів сигналів ИЧТ і МК <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=599237> (дата звернення: 15.04.2024).
15. Кроковий двигун NEMA 17 з планетарним редуктором 139. URL: <https://stack.in.ua/ua/p1537978113-shagovuj-dvigatel-nema.html> (дата звернення: 15.04.2024).
16. Затискний пристрій, що самоцентрується, для випробування зразків матеріалів на розтяг: пат. 143840 Україна: МПК G01N 3/00, G01N 3/08. № 2020 02002; заяв. 23.03.2020; опубл. 10.08.2020, Бюл. № 15.
17. Пристрій для випробування конструкційних матеріалів на розтяг: пат. 141344 Україна: МПК G01N 3/08, G01N 3/10, G01N 3/32. № 2019 07669; заяв. 08.07.2019; опубл. 10.04.2020, Бюл. № 7.
- 18 Зразок для випробування композитних матеріалів на розтяг: пат. 144176 Україна: МПК G01N 3/08, № 2020 01975; заяв. 23.03.2020; опубл. 10.09.2020, Бюл. № 17.
19. Buketov A., Smetankin, S., Maruschak P., Yurenin K., Sapronov O., Matvyeyev V., Menou A. New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport*. 2020. Vol. 35. № 6. 679-690. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14286>.
20. Buketov A. V., Husiev V. M., Kulinich A. G., Yakushchenko S. V., Smetankin S. O., Sotsenko V. V., Yurenin K. Yu. Epoxy Nanocomposites with Increased Hydroabrasive Wear Resistance for Use in Vehicles. *Journal of nano- and electronic physics*. 2021. Vol. 13. No. 5. pp. 05026-1–05026-5. [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(5\).05026](https://doi.org/10.21272/jnep.13(5).05026).
21. Buketov A., Smetankin S., Yakushchenko S. Yurenin K., Sotsenko V., Brailo M., Kulinich V., Sapronov O., Kulinich A., Vrublevskiy R. & Bezbakh O. Physical/mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. 2021. Vol. 12 no 2. pp. 1-12. [10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544](https://doi.org/10.1615/CompMechComputApplIntJ.2021037544).

REFERENCES

1. Aleksenko, V. L., Smetankin, S. O., Fostyk, P. P., Buketov, O. A. (2022). Chysel'nyy rozrakhunok napruzhenno-deformovanoho stanu kompozytnykh materialiv z urakhuvannyam fizychnoyi ta heometrychnoyi neliniynosti Problemy tertya ta znoshuvannya, Kyiv [in Ukrainian].
2. Entsyklopedychnyy slovnyk, F. A. Brok·hauza, ta I. A. Yefrona. Mashyny dlya doslidzhennya oporu materialiv. URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/brokgauz_efron/140987/%D0%A1%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5 (data zvernennya: 15.04.2024).
3. Universal'nist' vyprobuval'nykh mashyn. URL: <https://www.globaltest.uz/news/stati/universalnost-universalnykh-ispytatelnykh-mashin-uim/> (data zvernennya: 15.04.2024).
4. Aleksenko, V. L., Buketov, A. V., Braylo, N. V., Beloshytsky, S. A. (2014). Kompensatsiya systematichnoyi pomylyky pid chas obrobky rezul'tativ vyprobuvan' konstruktsiy nykh materialiv. *Kherson* [in Ukrainian].

5. Nove zhyttya vyprobuval'noho obladnannya. Kapital'nyy remont ta modernizatsiya. URL: <https://ukrintech.com.ua/ru/novaya-zhizn-ispytatelnogo-oborudovaniya-kapitalnyj-remont-i-modernizatsiya> (data zvernennya: 15.04.2024).
6. Modernizatsiya R/M usikh typiv. URL: <http://asma.com.ua/content/razryvnye-mashyny/modernizatsiya-r-m-vsekh-tipov> (data zvernennya: 15.04.2024).
7. Successful modernization of materials testing machines. URL: <https://pdf.directindustry.com/pdf/zwickroell-gmbh-co-kg/successful-modernization-materials-testing-machines/15660-343231.html> (data zvernennya: 15.04.2024).
8. Modernization of materials testing machines. URL: <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-nacional-de-rio-cuarto/plastica/99-269-testing-of-plastics-and-rubber-en/29883021> (data zvernennya: 15.04.2024).
9. Podnebennaya, S. K., Burlaka, V. V., Gulakov, S. V., & Kysliak, V. G. (2018). Modernizatsiya rozryvnoyi mashyny 2167R-50 dlya doslidzhennya mitsnosti zvarnykh z'yednan'. Dnipro [in Ukrainian].
10. Tenzodatchyk SP5 konsol'nyy 50 ~ 300Kg. URL: <https://kobastar.com/ru/product-details/%d1%82%d0%b5%d0%bd%d0%b7%d0%be%d0%b4%d0%b0%d1%82%d1%87%d0%b8%d0%ba-sp5-%d0%ba%d0%be%d0%bd%d1%81%d0%be%d0%bb%d1%8c%d0%bd%d1%8b%d0%b9/> (data zvernennya: 15.04.2024).
11. ClockwiseTools DITR-0105 <https://clockwisetools.com/products/clockwise-tools-ditr-0015-digital-indicator-0-0-5-12-7mm-resolution-0-00005> (data zvernennya: 15.04.2024).
12. Uzhodzhennya lohichnykh rivniv syhnaliv YCHT i MK. <https://www.rlocman.ru/shem/schematics.html?di=599237> (data zvernennya: 15.04.2024).
13. Krovovyy dvyhun NEMA 17 z planetarnym reduktorom 139. URL: <https://stack.in.ua/ua/p1537978113-shagovyj-dvigatel-nema.html> (data zvernennya: 15.04.2024).
14. Buketov, A., Smetankin, S., Maruschak, P., Yurenin, K., Sapronov, O., Matvyeyev, V., Menou, A. (2020). New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport*. Vol. 35. № 6. 679-690. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14286>.
15. Buketov, A. V., Husiev, V. M., Kulinich, A. G., Yakushchenko, S. V., Smetankin, S. O., Sotsenko, V. V., Yurenin, K. Yu. (2021). Epoxy Nanocomposites with Increased Hydroabrasive Wear Resistance for Use in Vehicles. *Journal of nano- and electronic physics*. Vol. 13. No. 5. pp. 05026-1–05026-5. [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(5\).05026](https://doi.org/10.21272/jnep.13(5).05026).
16. Zatytskyy prystryy, shcho samotsentruyet'sya, dlya vyprovuvannya zrazkiv materialiv na roztyah: pat. 143840 Ukrayina: MPK G01N 3/00, G01N 3/08. № 2020 02002; zayav. 23.03.2020; opubl. 10.08.2020, Byul. № 15.
17. Prystryy dlya vyprovuvannya konstruktsiynykh materialiv na roztyah: pat. 141344 Ukrayina: MPK G01N 3/08, G01N 3/10, G01N 3/32. № 2019 07669; zayav. 08.07.2019; opubl. 10.04.2020, Byul. № 7.
18. Zrazok dlya vyprovuvannya kompozytnykh materialiv na roztyah: pat. 144176 Ukrayina: MPK G01N 3/08, № 2020 01975; zayav. 23.03.2020; opubl. 10.09.2020, Byul. № 17.
19. Buketov, A., Smetankin, S., Maruschak, P., Yurenin, K., Sapronov, O., Matvyeyev, V., Menou, A. (2020). New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. *Transport*. Vol. 35. № 6. 679-690. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.14286>.
20. Buketov, A. V., Husiev, V. M., Kulinich, A. G., Yakushchenko, S. V., Smetankin, S. O., Sotsenko, V. V., Yurenin, K. Yu. (2021). Epoxy Nanocomposites with Increased Hydroabrasive Wear Resistance for Use in Vehicles. *Journal of nano- and electronic physics*. Vol. 13. No. 5. pp. 05026-1–05026-5. [https://doi.org/10.21272/jnep.13\(5\).05026](https://doi.org/10.21272/jnep.13(5).05026).
21. Buketov, A., Smetankin, S., Yakushchenko, S., Yurenin, K., Sotsenko, V., Brailo, M., Kulinich, V., Sapronov, O., Kulinich, A., Vrublevskiy, R. & Bezbakh, O. (2021). Physical/mechanical properties of epoxy composites filled with carbon black nano-dispersed powder for protection of transport vehicles. *Composites: Mechanics, Computations, Applications: An International Journal*. 2021. Vol. 12 no 2. pp. 1–12. 10.1615/CompMechComput ApplIntJ.2021037544.

Aleksenko V. L., Yurenin K. Yu., Tatarintseva Yu. G., Fostyk P. P., Vasylichenko G. Yu., Znamerovska N. P., Onyshko D. M. SCHEMATIC SOLUTIONS IN RENOVATION OF TEST

The article briefly examines the construction process as an activity of creating a material image of an object, which is developed in the form of a full-scale model and its graphic representation: drawings, computer models.

The article considers the main ways of ensuring strength: empirical; experimental, which includes planning and certain amount of calculations, and calculation, in which the empirical component is minimized due to the appropriate theoretical apparatus, and with the development of science and technology, its role increases.

It is noted that when calculating strength, it is necessary to solve the following problems consistently and in mutual agreement: the problem of external forces; the stress determination problem and the allowable stress problem.

Solving the problem of calculating the stress-strain state requires knowledge of the mechanical constants of the construction material, and the normalization of stresses - its strength characteristics.

The main content of the article includes the presentation of some methods and means of measurement developed in the laboratory of polymer composite materials of the Kherson State Maritime Academy to ensure research work on the creation of composite materials for shipbuilding with increased operational characteristics.

These studies include experimental determination of physical and mechanical properties of the materials being created, which requires special testing equipment. This task was largely solved by the laboratory team by renovating the existing equipment, automating its operation and analyzing information using computer and engineering graphics, as well as developing new methods and means of measurement. Technological designs of samples and methods of determining the mechanical constants of polycrystalline and composite materials are proposed.

The developed technical solutions are protected by patents, the implementation of which provided a significant positive effect.

Key words: *resistance of materials; testing machines; material samples; means of measurement; renovation; modernization; economic feasibility, computer and engineering graphics.*

© Алексенко В. Л., Юренин К. Ю., Васильченко Г. Ю., Знамеровська Н. П., Татарінцева Ю. Г., Фостик П. П., Онишко Д. М.

Статтю прийнято до редакції 01.05.2024

ВПЛИВ РОЗТЯГУВАННЯ З ОДНОЧАСНИМ КРУТІННЯМ НА ОТРИМАННЯ СТРУКТУРИ ЗЕРНИСТОГО ПЕРЛІТУ ПРИ СФЕРОІДІЗУЮЧОМУ ВІДПАЛІ

Пашинська О. Г., д.т.н., старший науковий співробітник, професор ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»», м. Запоріжжя, провідний науковий співробітник ДОНФПІ ім. О. О. Галкіна НАН України, м. Київ, Україна, e-mail: elena.pashinska@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7102-1544;

Пашинський В. В., д.т.н., доцент, професор ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: v.v.pashinskiy@nipolytech.education, ORCID: 0000-0003-0118-4748;

Бойко І. А., к.т.н., доцент, ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: igor.boiko@nipolytech.education, ORCID: 0000-0001-7742-4694.

У роботі розглянуто шляхи створення ультрадрібнозернистого високоміцного дроту для забезпечення його надійності при використанні у елементах конструкцій мостів, кранів та при виробництві шинного корду. У роботі було встановлено закономірності впливу складного навантаження крученням та розтягуванням на отримання структури зернистого перлиту при сфероїдизуючому відпалі. Як матеріал для досліджень використовували катанку з високовуглецевої сталі 75. У результаті крутіння та розтягування перлітні колонії деформовано, міжпластиночна відстань зростає, також збільшується частка цементитних пластин меншої довжини. Цей ефект пов'язаний з впливом дотичних напружень при крутінні та розтягуванні на тверді цементитні пластини, які крихко руйнуються під їх впливом. Встановлено, що крутіння з розтягуванням, виконане перед волочінням, приводить до подрібнення цементиту, що в свою чергу інтенсифікує процес сфероїдизації та допомагає створити оптимальну структуру для проведення подальшого волочіння. Показано, що для отримання структури зернистого перлиту для успішного проведення волочіння найкращою обробкою є обробка за варіантом – (гарячекатаний стан + деформація (розтяг з крутінням) + сфероїдизуючий відпал).

Ключові слова: високовуглецеві сталі; ферит; перліт; цементит; зернистий перліт; сфероїдизація; дотичні напруження; мікротвердість; неоднорідність; режим обробки.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.104-116

Вступ. В останні десятиліття зростає інтерес до методів інтенсивної пластичної деформації (ІПД), оскільки вони дозволяють виробляти об'ємні матеріали із підвищеними механічними та функціональними властивостями [1]. У звичайних процесах обробки металів тиском, таких як прокатка, кування та екструзія, прикладена пластична деформація зазвичай становить менше 2,0 [2, 3]. Коли багатопрохідна прокатка, волочіння та екструзія виконуються до пластичної деформації більше 2,0, товщина та діаметр стають дуже тонкими та непридатними для використання у конструкційних деталях. За допомогою ІПД отримують дрібнозернисту структуру сплавів, яку не можна отримати традиційними способами деформації. Щоб докласти надзвичайно велику деформацію до об'ємного металу без зміни форми, було розроблено велику кількість процесів ІПД. Такі схеми використовують складне навантаження зі зсувом, для отримання більших ступенів деформації [2–6].

Дрібне зерно, сформоване за такої обробки, призводить до зростання фізичних і механічних властивостей сталі за рахунок особливостей як самого зерна, так і його границь. Однак через механічно викликану міграцію границь зерен досягне зменшення розміру зерна має поріг, після чого його розмір вже не зменшується незважаючи на ріст деформації. Отже, додавання розчинених елементів або частинок другої фази дозволяє досягти інтенсивнішого зменшення розміру зерен. Завдяки своїй низькій розчинності та високій рухливості вони надзвичайно ефективно пригнічують приграничну міграцію. Найбільш широко використовуваним таким елементом є вуглець. Але дуже мало інформації щодо впливу вуглецю на подрібнення зерна і механічні властивості, що отримуються в результаті ІПД. Було б доцільно обговорити відповідні переваги та проблеми, пов'язані з дією вуглецю у

сталях при ПД. Незалежно від використовуваної стратегії можна отримати рівні міцності, які важко досягти при використанні інших легуючих елементів. Оскільки ми можемо керувати перерозподілом вуглецю між твердим розчином впровадження та карбідною фазою, а також впливати на її морфологію, то можливо формування високоміцного стану при збереженні пластичності матеріалу.

Постановка проблеми. Таким чином, попри велику кількість робіт, існує чимало питань щодо отримання оптимальної структури при застосуванні ПД. З цих причин актуально розширити знання про структурну еволюцію та механізми деформації, задіяні в процесі волочіння дроту, у зв'язку з його критичними застосуваннями, такими як елементи конструкцій мостів, кранів та у шинному корді. Зазвичай для отримання дроту з високовуглецевої сталі з кращими властивостями катанку піддають сфероїдізуючому відпалу та волочінню після нього. Це призводить до підвищення ціни дроту, додаткових витрат часу та енергоресурсів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У літературі можна знайти різні схеми ПД та їх комбінації з традиційними схемами деформування: прокатка зі зсувом [7], рівноканально-кутове пресування [6] та кручення з розтягуванням [8–9]. У [7, 10–12] показано, що комбінування ПД з подальшою прокаткою чи волочінням дозволяє отримати більший ступінь деформації та формує дисперсну структуру не тільки з підвищеним рівнем міцнісних характеристик, але і з підвищеним рівнем пластичності.

У [12] процеси ПД визначаються як процеси обробки металів тиском, при яких до об'ємного процесу додається інтенсивна пластична деформація з метою отримання ультрадрібнозернистого металу. Метою цих процесів при створенні ультрадрібнозернистого металу є виробництво деталей з використанням високоміцного металу для забезпечення безпеки та надійності. Також, у [12] обговорюються галузі застосування ультрадрібнозернистих (УДЗ) металів, та представлені технологічні процеси виготовлення, а саме рівноканальне кутове пресування (РККП), накопичувальна прокатка (НП), кручення під високим тиском (КВТ) та інші, а також показано властивості металів, оброблених процесами ПД. Крім того, розглянуто і комбіновані процеси, розроблені останнім часом. Однак у [12] не сформульовані критерії вибору типу деформації для досягнення певних властивостей сплавів.

У [13] було проведено всебічний огляд сучасної літератури по високоміцним дрібнозернистим сталям. Хоча в даний огляд включені відповідні технології проектування, обробки та термообробки сплавів, акцент робиться на технологію обробки дроту з високовуглецевої сталі, яка може бути досягнута за допомогою «традиційних» процесів прокатки та волочіння дроту. Термомеханічна обробка перлітної мікроструктури з наступною холодною витяжкою рекомендується як кращий процес для ефективного отримання ультрадрібнозернистої феритно-цементитної мікроструктури для надвисокоміцних дротів із надвисоковуглецевих сталей. Така схема дуже ефективна, але має обмеження при формуванні дрібнозернистої структури за рахунок зменшення технологічної пластичності.

У [14] показано, що у сталевих дротах при холодному волоченні формується висока міцність (5–6 ГПа) та зберігається достатня пластичність. У цій роботі представлено порівняльне дослідження сталевих дротів з вмістом вуглецю 0,84% на різних стадіях деформації. Виріб демонструє нормальну поведінку під час випробування на кручення. Зазначене випробування зазвичай використовується для підтвердження придатності дроту. Основна мета цього дослідження – розширити знання про структурну еволюцію після холодної витяжки з урахуванням механізмів деформації, розчинення цементиту після крутіння. Структурне дослідження підтвердило наявність явища скручування у дротах зі зміною відстаней та товщини цементитних пластин. Але в цій роботі не зроблено висновок, який режим обробки є найбільш ефективним з точки зору зміни стану цементитних пластин.

Огляд [15] стосується висвітлення сучасних поглядів на еволюцію мікроструктури в конструкційних та інструментальних вуглецевих сталях під час поверхневої інтенсивної

пластичної деформації (ПД). Основну увагу приділено ефектам нанокристалізації в приповерхневій зоні низьковуглецевих сталей з вмістом вуглецю 0,05–0,2%, середньовуглецевих сталей (вміст вуглецю 0,35–0,65%) і високовуглецевих сталей (вміст вуглецю 1,0–1,5%). Проаналізовано вплив параметрів ПД на нанокристалічну модифікацію таких основних фазових компонентів вуглецевих сталей, як ферит, перліт і цементит. Перевагою роботи є фактичне отримання великого зменшення фериту, перліту та цементиту у поверхневій зоні, що дозволяє зробити висновок про принципову можливість таких змін при великій деформації зі зсувом. Однак, з роботи не ясно: як отримати таку структуру в об'ємних зразках.

Удослідженні [16] дріт із надвисоковуглецевої сталі, що містить 1,8–2,1% вуглецю, може досягати дуже високої міцності після інтенсивної пластичної деформації завдяки отриманій тонкій структурі. У [16] обговорюється мікроструктурна еволюція під час волочіння дроту, а також міцність, що отримується в результаті, а також механізми зміцнення, що діють у цьому матеріалі. Інтенсивна деформація забезпечує значне вирівнювання перлітних пластин. Дислокаційні осередки розвиваються всередині феритних прошарків, і зі зростанням деформації їх розміри зменшуються. Ці дислокаційні осередки чинять опір динамічній рекристалізації під час волочіння дроту, тому можуть утворюватися надзвичайно дрібні субструктури ($d < 10$ нм). Обговорюється вплив обробки та складу на досягнення високої міцності цих дротів за рахунок ПД. Однак такі сталі не мають широкого застосування у світовій промисловості та в дослідженні недостатньо висвітлено механізми формування високоміцного стану на звичайних високовуглецевих сталях.

Ідея роботи полягає в тому, що крутіння з розтягуванням, виконане перед волочінням, має призвести до подрібнення цементиту, що своєю чергою може інтенсифікувати процес сфероїдизації та створити оптимальну структуру для проведення подальшого волочіння. Цей спосіб крутіння з розтягуванням може бути використано, коли є задача отримання дроту з високовуглецевої сталі для подальшого волочіння.

Метою досліджень було встановлення закономірностей складного навантаження крученням та розтягуванням на отримання структури зернистого перліту при сфероїдизуючому відпалі. Сфероїдизуючий відпал виконується для одержання структури до складу якої входять сфероїдизований цементит, рівномірно розподілений у феритній матриці. Така структура має забезпечити піддатливість матеріалу деформації у процесі волочіння при волочінні до дроту малого діаметра, залишаючись у пластичному стані досить довго. Мета дослідження може бути досягнута при експериментальних модельних дослідженнях, які дозволили ретельно вивчити вплив видів деформації на розмір, форму цементитних пластин та їх розташування у мікроструктурі дроту.

Задачею дослідження було вивчити змінення структури та властивостей високовуглецевої сталі 75 після різних варіантів термодереформаційної обробки.

Матеріал та методика досліджень. У якості матеріалу для досліджень використовували катанку діаметром 6,24 мм і довжиною 100 мм. Хімічний склад досліджуваної сталі в %: С – 0,72–0,8, Si – 0,17–0,37, Mn – 0,5–0,8, Ni – до 0,25, S – до 0,035, P – до 0,035, Cr – до 0,25, Cu – до 0,2. Виконувалися різні варіанти термодереформаційної обробки (табл. 1). Для деяких режимів перед деформацією проводився повний відпал при температурі 800°C з витримкою 10 хвилин та охолодженням у печі. Деформація полягала в одночасному крученні зі швидкістю 30 об/хв і розтягуванням напруженням 20 МПа до руйнування (рис. 1). Досліджувані зразки (1) були закріплені одним кінцем у нерухомий захват (2), іншим – у рухомий (3), який обертався з частотою 30 хв⁻¹. До цього захвату була прикладена сила F, яка розтягує зразок за допомогою навантаження (4). Для досліджень створювали напруження розтягування 20 МПа.

Таблиця 1 – Види деформаційної та термічної обробки зразків

Номер зразка	Деформаційна та термічна обробка
I	вихідний стан
II	вихідний стан + повний відпал
III	вихідний стан + деформація (розтяг з одночасним крученням)
IV	вихідний стан + повний відпал + деформація (розтягування з одночасним крученням)
V	вихідний стан + сфероїдізуючий відпал
VI	вихідний стан + деформація (розтягування з одночасним крученням) + сфероїдізуючий відпал
VII	вихідний стан+повний відпал + деформація (розтягування з одночасним крученням) сфероїдізуючий відпал

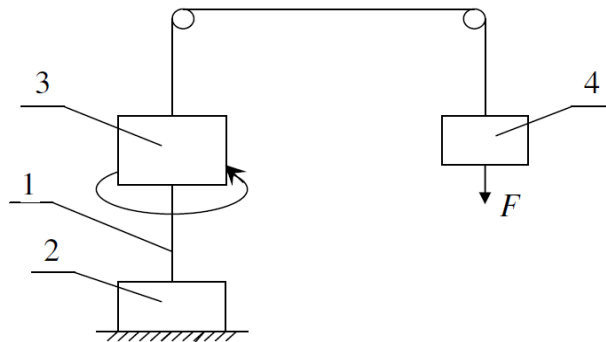


Рисунок 1 – Схема установки для одночасного крутіння з розтягуванням:
1 – зразок, 2 – нерухоме захоплення, 3 – рухоме захоплення, 4 – вантаж

Наступним етапом було проведення сфероїдізуючого відпалу протягом 2,5 години при температурі 680°C з охолодженням у печі. Мікроструктуру отриманих зразків було досліджено на оптичному мікроскопі фірми Olympus GX41.

Вимірювання інтегрованої мікротвердості проводилися методом Віккерса на напівавтоматичному твердомірі V-700 фірми FUTURE-TECH з навантаженням 4,90 Н (5 кгс). Розподіл мікротвердості перерізу було проведено на напівавтоматичному мікротвердомірі FM7 фірми FUTURE-TECH з навантаженням 1961 мкН (приблизно 200 гс).

Результати досліджень. Структура сталі у вихідному стані характеризувалася шістьма різними областями рис. 2. На рис. 3 представлені мікроструктури досліджуваних зразків у вихідному стані та після відпалу перед деформацією. Мікроструктура зразка у вихідному стані в зоні 1 (рис. 3 а) характеризувалася мартенситною структурою, яка могла з'явитися у процесі виробництва дроту.

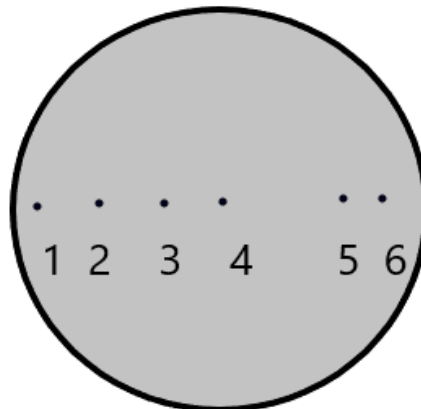


Рисунок 2 – Схема розташування зон для досліджень мікроструктури катанки

Ширина цієї зони становила ~ 225 мкм. У зоні 2 була виявлена область грубозернистої перлітної структури шириною ~ 300 мкм, причому пластинки цементиту було чітко видно. У зоні 3 (рис. 3 б) спостерігалася перлітна структура з феритною сіткою, із зерном більшим, ніж у центрі катанки в зоні 4 (рис. 3 в). Саме ця структура займає найбільшу зону досліджуваного зразка. У зоні 5 структура змінюється на ферито-перлітну, де ферит має вигляд деформованих зерен за межами перліту. Ширина цієї зони 165 мкм. У зоні 6 сформована феритна структура, вона займає ширину ~ 8 мкм. Слід зазначити, що розмір перліт-феритної суміші збільшується при переміщенні від краю зразка до центра.

Таким чином, показано, що у вихідному стані катанка має неоднорідну будову з кількома типами характерної структури. Тому для подальших досліджень найбільш показовими областями є зони 1, 3, 4, які було обрано для досліджень у деформаційно- та термічно оброблених зразках.

Катанка після повного відпалу (рис. 3 г, д, е) по всьому перерізу має перлітно-феритну структуру. Це дозволяє зробити висновок про сприятливий вплив відпалу на однорідність структури катанки в поперечному перерізі. Слід зазначити, що розмір зерен збільшується при переміщенні від краю зразка до центра, що обумовлено успадкуванням вихідної структури сформованої катанки при прокатці.

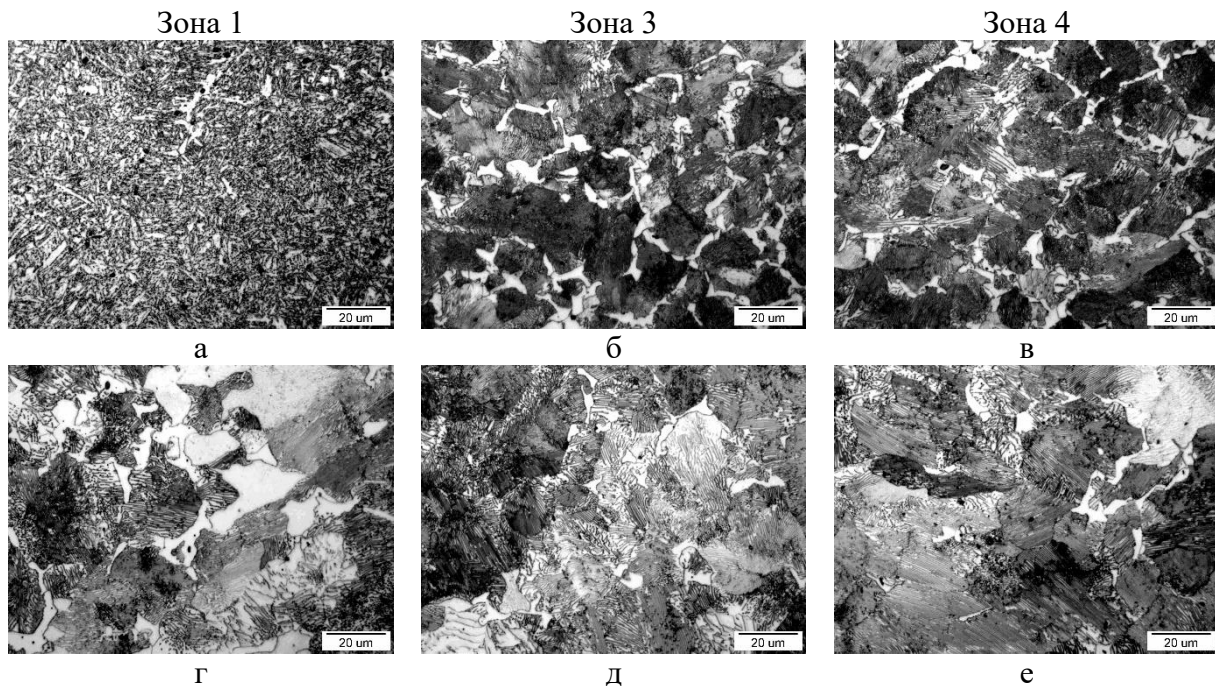


Рисунок 3 – Мікроструктури катанки: а, б, в – зразки № I у вихідному стані та г, д, е – зразки № II після повного відпалу

У процесі кручення з одночасним розтягуванням зразки поведилися по-різному. Руйнування зразка у вихідному стані настало після 2,5 обертів ($\epsilon=1,63\%$), а зразка після повного відпалу після 4 обертів ($\epsilon=2,61\%$). Різну поведінку матеріалу можна пояснити тим, що після повного відпалу матеріал характеризується більшою пластичністю. До того ж, як було показано вище, це може бути пов'язане з однорідністю структури після відпалу.

На рис. 4 представлена структура сталі після деформації крученням та одночасним розтягуванням. У мікроструктурі сталі зразків після деформації у вихідному стані (рис. 4 а) у зоні 1 збереглася мартенситна структура, проте при наближенні до центра зразка мартенситна структура змінюється на ферито-перлітну і зерно збільшується при переміщенні до центра зразка (рис. 4 б).

Структура деформованого зразка після повного відпалу та крутіння з одночасним розтягуванням (рис. 4 г) у зоні 1 характеризується наявністю нерівномірної сітки фериту. У результаті крутіння та розтягування зерна фериту деформовано. При переміщенні від краю

зразка до центра зразка сітка фериту стає тоншою (рис. 4 д, е), а перліт добре розділяється. Добре видно, що збільшується частка цементитних пластин меншої довжини (з порівняння рис. 3 і 4 д). Цей ефект може бути пов'язаний з впливом дотичних напружень при крученні та розтягуванні на тверді цементитні пластини, які крихко руйнуються під їх впливом, подібно до того, як це спостерігалось при волочінні зі зсувом [8].

Розглянемо, як така різна структура впливає на процес сфероїдизації сталі. Структура катанки після сфероїдизуючого відпалу представлена на рис. 5. У мікроструктурі катанки у вихідному стані (рис. 5 а) у зоні 1 найбільш дрібнозерниста структура, бо у цій зоні перед сфероїдизацією була мартенситна структура.

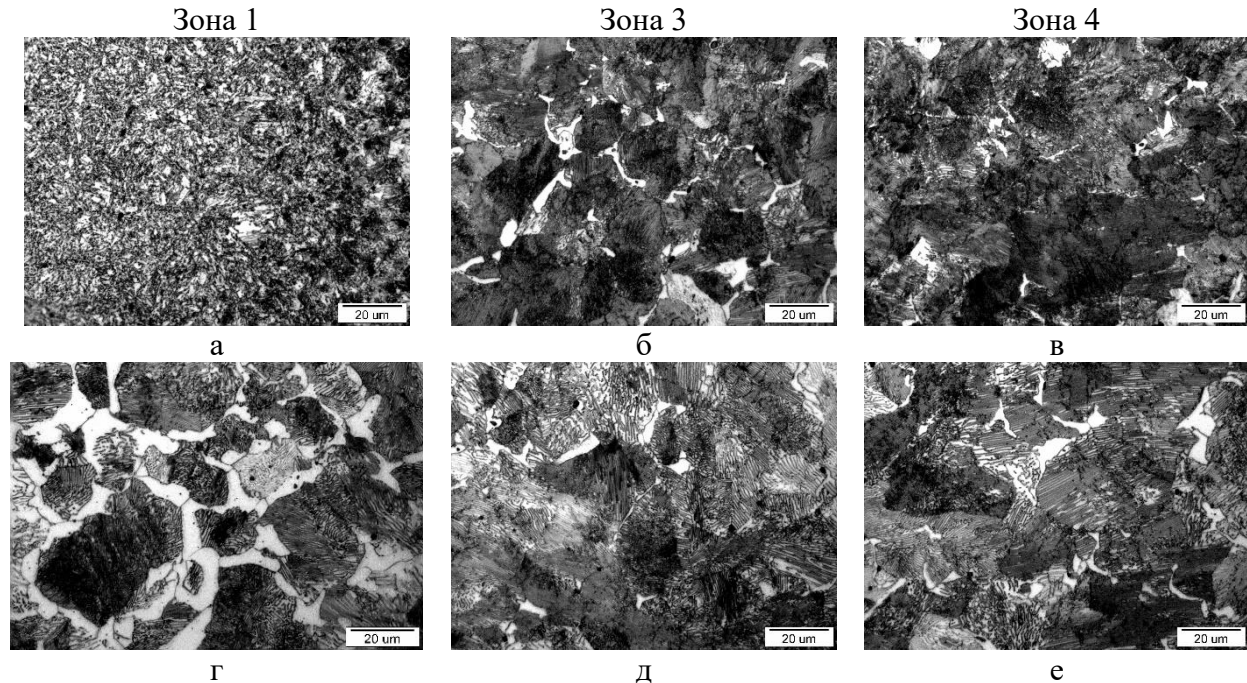
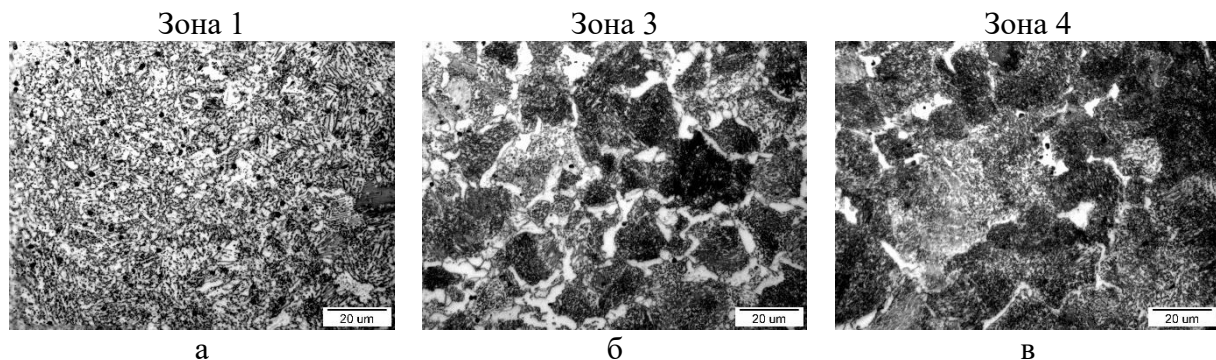


Рисунок 4 – Мікроструктура катанки після крутіння з одночасним розтягуванням:
а, б, в – зразки № III у вихідному стані і г, д, е – зразки № IV після повного відпалу

Сфероїдизований цементит рівномірно розташований у феритній матриці. У зоні 3 видно феритна сітка, яка стає набагато менш вираженою в зоні 4. Крім структури зернистого перліту, можна побачити колонії пластинчастого перліту (рис. 5 в). В цілому при переміщенні від поверхні до центра зразків спостерігається укрупнення зерен перліту, що спостерігалось в структурі катанки після прокатки (рис. 3 в). Загалом, структуру не можна назвати гарною в сенсі подальшого волочіння з декількох причин:

- різка відмінність між поверхневою зоною та центром зразків;
- наявність феритної сітки;
- різнозернистість за перерізом.



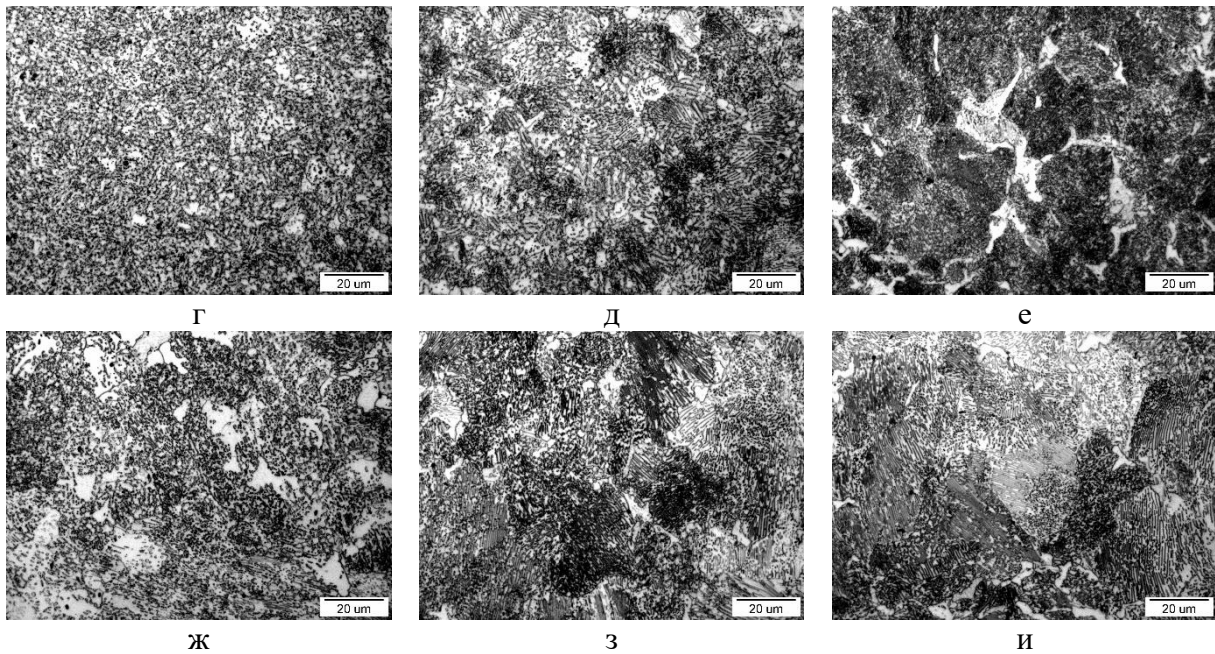
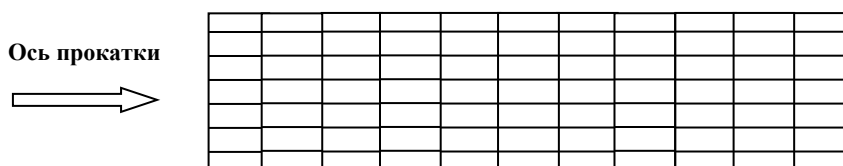


Рисунок 5 – Мікроструктури сталі після сфероїдизуючого відпалу: а, б, в – зразки № V у вихідному стані, г, д, е – зразки №VI після деформації крутінням з одночасним розтягуванням, ж, з, і – зразки № VII після повного відпалу деформації крутінням з розтягуванням

Сфероїдизація сталі після деформації (рис. 5 г, д, е) дозволила отримати структуру зернистого перліту на більшій площі зразка. Так як і в ділянках №1 та №3 зразка №V спостерігається дрібна рівномірна структура сфероїдизованого цементиту в феритній основі, але в зоні 3 спостерігається також невелика кількість пластинчастого перліту. У зоні 4 досліджуваного зразка №VI видно сфероїдизовану структуру, проте є місця сегрегації фериту. Така структура може бути надзвичайно перспективною з погляду підвищення технологічної волочимості металу при подальшій обробці.

Сфероїдизуючий відпал зразка після повного відпалу та деформації (рис. 5 ж, з, і) також дозволив отримати сфероїдизовану структуру, але ця структура грубіша. У зоні 1 має місце сегрегації фериту, у зоні 3 і 4 спостерігаються фрагменти пластин цементиту більшого розміру (порівняно з рис. 5 д), до того ж вони сфероїдизовані набагато меншою мірою, ніж у зразку №VI. Позитивною рисою цієї обробки є те, що вона дозволяє отримати однорідну структуру по усьому перерізу зразка.

Результати вимірювання твердості по Віккерсу HV5 у п'яти точках на середині радіусу катанки (таблиця 2) показали, що найбільшу твердість має зразок у вихідному стані (близько 370 HV). Повний відпал знизив твердість приблизно на 100 HV. Але кручення з одночасним розтягуванням знизило мікротвердість на 40 HV. Це може бути пов'язане з поворотом цементитних пластин під дією дотичних напружень при крученні на кут 35–45° як це було показано в роботі [7]. Пояснимо цю думку схемою розташування зерен до осі прокатки (рис. 6 а) і осі кручення з розтягуванням (рис. 6 б). Оскільки гаряча прокатка катанки відноситься до одноосної деформації, то спостерігається деяка структурна анізотропія вздовж осі деформації, але вона змінюється при подальшому розтягуванні.



а

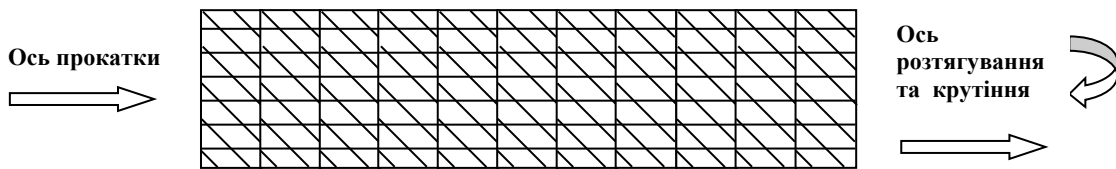

б

Рисунок 6 – Схема розташування зерен вздовж осі прокатки (а) і після прокатки та подальшого кручення та розтягування (б)

Деформація крученням з одночасним розтягуванням після повного відпалу підвищила мікротвердість до 300 HV, що є очікуваним ефектом. Сфероїдизуючий відпал значно знизив твердість. Після такої обробки найменша твердість спостерігалася у зразка після повного відпалу та деформації (205 HV).

Таблиця 2 – Результати вимірювань мікротвердості

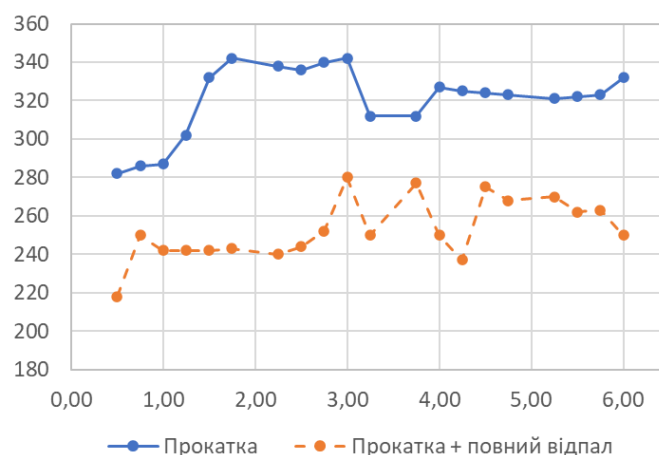
Вид обробки	Мікротвердість, HV _{0,2}	
	Перед сфероїдизуючим відпалом	Після сфероїдизуючого відпалу
Вихідний стан	373 ± 11	239 ± 7
Вихідний стан + повний відпал	276 ± 12	284 ± 14
Вихідний стан + кручення з розтягуванням	331 ± 16	234 ± 4
Вихідний стан + повний відпал + кручення з розтягуванням	301 ± 13	205 ± 1

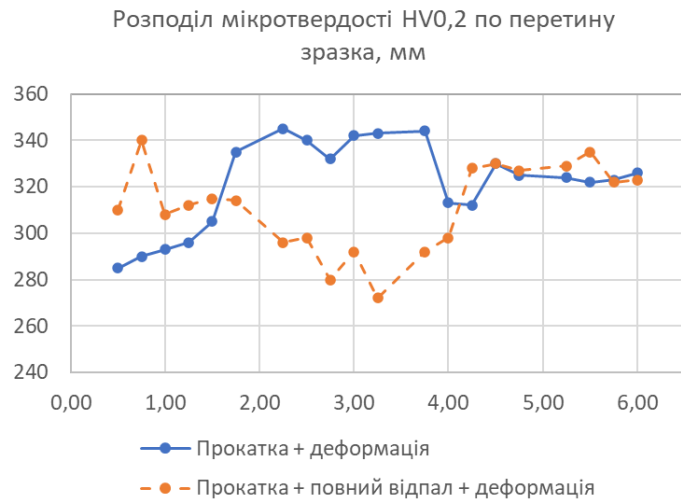
На рис. 6 а представлено розподіл мікротвердості HV_{0,2} по перерізу зразків у вихідному стані і після повного відпалу. Так як структура зразка у вихідному стані була нерівномірною (рис. 3 а – в), то крива розподілу мікротвердості теж виглядає нерівномірною.

Повний відпал знизив мікротвердість по всьому перетину на 50–70 одиниць (з 300 HV у вихідному стані до 250 HV). Велике зниження мікротвердості спостерігається на поверхні в районі шару зі знизеним вмістом вуглецю, а також у зоні 3, що може бути пов'язане з потраплянням індентора мікротвердоміра в ферит, який успадковується від початкового стану катанки (рис. 3 б).

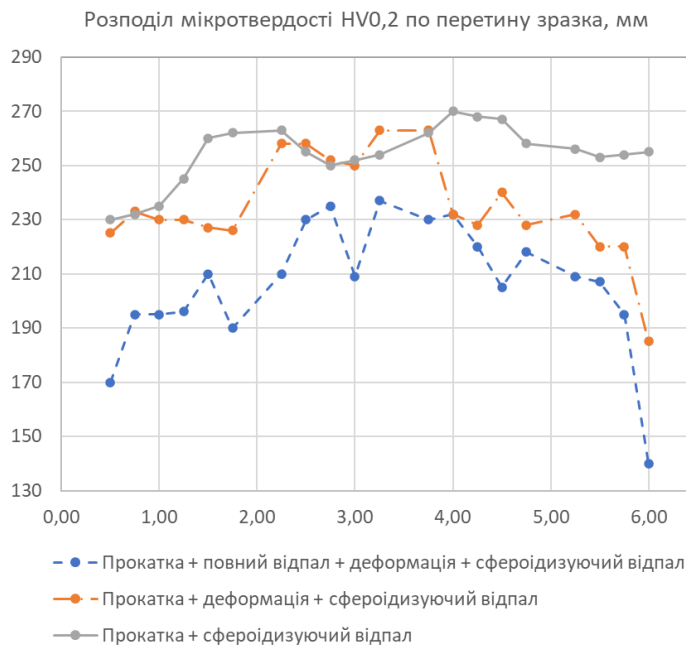
На рис. 6 б представлено розподіл мікротвердості по перерізу зразків після кручення з одночасним розтягуванням. Загальне зниження рівня мікротвердості, що спостерігається, як було сказано вище, може бути пов'язане з поворотом зерен. Саме цим може бути також пояснено той факт, що в цих зразках не спостерігається зниження твердості при переході від мартенситного шару до ферито-перлітного (від зони 1 до зони 3).

Розподіл мікротвердості HV_{0,2} по перетину зразка, мм


а



б



в

Рисунок 6 – Розподіл мікротвердості HV_{0,2} за перерізом зразків у вихідному стані після прокатки (а), після прокатки та кручення з одночасним розтягуванням (б) та після додаткового сфероїдизуючого відпалу (в)

Ефект крутіння з розтягуванням добре видно на зразках попередньо відпалених. Зростання середніх значень твердості з 284 HV до 331 HV показує, що деформація призводить до зміцнення в цілому, проте якщо після відпалу до кручення з розтягуванням спостерігалось зменшення концентрації вуглецю та пов'язане з ним зниження мікротвердості на поверхні, то після деформації такий ефект не спостерігається. Слід звернути увагу, що зниження значень мікротвердості в зоні 3 успадковуються від вихідного стану після повного відпалу і після кручення з одночасним розтягуванням.

Розподіл мікротвердості зразків після сфероїдизуючого відпалу представлено на рис. 6 в. У всіх випадках цей вид термообробки значно знизив мікротвердість перерізу для всіх зразків. Найбільш рівномірний розподіл у зразка після термообробки у вихідному стані. Мікротвердість у середньому знизилася з 373 HV до 239 HV після сфероїдизуючого відпалу. Однак при сфероїдизуючому відпалі на всіх зразках спостерігається зниження мікротвердості до поверхні зразка, що пов'язане зі зменшенням вмісту вуглецю.

Сфероїдізуючий відпал зразка деформованого крученням з розтягуванням майже не змінив рівень мікротвердості порівняно з вихідним станом після прокатки (відповідно 239 та 243 HV). Розподіл мікротвердості менш однорідний, ніж у разі відпалу недеформованого вихідного зразка. Позитивним є той факт, що на поверхні зразка в деяких зонах спостерігаються значення мікротвердості, які можна порівняти зі зразками № VII після повного відпалу. Це явище пов'язане з неоднорідністю деформації при крученні з розтягуванням, і це є позитивним фактом з точки зору підвищення деформованості металу при подальшому волочінні.

Найменші значення мікротвердості були отримані на деформованому зразку після повного відпалу: від 239 HV вони знизилися до 205 HV. Крива розподілу нерівномірна, це можна пояснити тим, що у структурі металу спостерігаються області з пластинчастого перліту, які чергуються з областями зі сфероїдізованого перліту.

Висновки

У результаті проведених досліджень можна сформулювати такі твердження:

1. Повний відпал дозволив отримати перліто-феритну структуру по всьому перерізу з великим зерном, порівняно зі зразком у вихідному стані та знизити твердість на 90–100 HV.

2. Кручення з одночасним розтягуванням у невеликій мірі вплинуло на структуру, з'являються деформовані зерна, але твердість знизилася на 40 HV. Це може бути пов'язане з поворотом цементитних пластин під дією дотичних напружень при крученні на кут $35\text{--}45^\circ$. У результаті кручення та розтягування перлітні колонії деформовано, міжпластиночна відстань зростає, а також збільшується частка цементитних пластин меншої довжини. Цей ефект пов'язаний з впливом дотичних напружень при крученні та розтягуванні на тверді цементитні пластини, які крихко руйнуються під їх впливом.

3. Найкраща структура (рівномірний зернистий перліт) отримана в результаті сфероїдізуючого відпалу зразка деформованого крученням з розтягуванням у вихідному стані. Структура рівномірна, феритна сітка спостерігається лише у центрі зразка (зона 4).

4. Сфероїдізуючий відпал дозволив значно знизити твердість (у середньому на 100 HV), що має позитивний вплив на процес подальшого волочіння. Найбільше зниження твердості спостерігалось у зразка сфероїдізованого після повного відпалу та деформації крученням з розтягуванням, хоча у структурі не вдалося отримати зернистого перліту. Незважаючи на те, що крива розподілу мікротвердості зразка після сфероїдізованого відпалу деформованого у вихідному стані нерівномірна, середні значення мікротвердості нижче, ніж середнє значення мікротвердості сфероїдізованого зразка у вихідному стані.

5. Аналізуючи вище сказане, можна зробити висновок про те, що для досягнення мети отримання структури зернистого перліту з низькими значеннями мікротвердості для успішного проведення волочіння найкращою обробкою є обробка за варіантом VI (вихідний стан + деформація (розтяг з крученням) + сфероїдізуючий відпал).

Перспективи досліджень полягають у тому, щоб провести практичне підтвердження фактів впливу комбінованої пластичної деформації на процеси формування зернистого перліту при сфероїдізуючому відпалі. Це може відбутися на реальному виробництві при реалізації схеми кручення з розтягуванням при волочінні дроту та подальшому його сфероїдізуючому відпалі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Bachmaier A., Pippan R., Renk O. Effect of Carbon in Severe Plastically Deformed Metals. *Advanced Engineering Materials*. 2020. Vol. 22, Is. 12. (2000879). P. 1–20. <https://doi.org/10.1002/adem.202000879>.
2. Огородников В. А., Деревенько І. А., Алієва Л. І. Ресурс пластичності металів при холодній об'ємній формозміні: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2016. 176 с.
3. Хоменко А. В. Висока пластична деформація: методи та математичні моделі формування наноматеріалів. *Журнал фізичних досліджень*. 2020. Т. 24 (2). С. 2001–1 – 2001–20 [20 страниц]. <https://doi.org/10.30970/jps.24.2001>.

4. Horita Z., Edalati K. Severe Plastic Deformation for Nanostructure Controls. *Materials transactions*. 2020. Vol. 61, Iss. 11. P. 2241–2247. <https://doi.org/10.2320/matertrans>.
5. Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D. Y., Micari F., Lahoti G. D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals*. 2008. Vol. 57(2). P.716–735. – <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.
6. Sha G., Wang Y. B., Liao X. Z., Duan Z. C., Ringer S. P., Langdon T. G. Influence of Equal-Channel Angular Pressing on Precipitation in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy. *Acta Materialia*. 2009. Vol. 57 (10). P. 3123–3132. – <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.03.017>.
7. Пашинська О. Г. Фізико-механічні основи подрібнення структури при комбінованій пластичній деформації: монографія. Донецьк: Вебер, 2009. 352 с.
8. Zavdoveev A., Baudin T., Rogante M., Pashinska E., Skoryk M. Shear impact during steel wire drawing on grain bound, aries and mechanical properties. *Letters on materials*. 2020, 10(4s). P. 558–565. <https://lettersonmaterials.com/en/Readers/Article.aspx?aid=35968>.
9. Pashynska O., Pashynskiy V., Kraliuk M., Boyko I. Forming of properties complex of copper wire by the method of combined deformation by torsion and tension. *Technology Audit and Production Reserves*, 1(1(63)), pp. 16–22. 2022. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252282>.
10. Pashinska E., Varyukhin V., Myshlaev M. and Zavdoveev A. Formation of structure and properties of low-carbon steel under rolling with shear and cold drawing. *Advanced Engineering Materials*. 2013. Vol. 16(1). P.26–32. <http://dx.doi.org/10.1002/adem.201300197>.
11. Pashynska, Skulskiy V. Yu., Boyko I. O. Structure and properties of a low-carbon steel wire after combined cold deformation. *International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education”*: conference proceedings. 2023. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”. 2023. Vol. 1. P. 99–102. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-30>.
12. Azushima A., Kopp R., Korhonen A., Yang D. Y., Micari F., Lahoti G. D., Groche P., Yanagimoto J., Tsuji N., Rosochowski A., Yanagida A. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals*. 2008. Vol. 57(2). P. 583–772. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.
13. Li L., Virta J. Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure. *Materials Science and Technology*. (2011). Vol. 27(5). 845–862. <https://doi.org/10.1179/026708310X12677993662087>.
14. Brandaleze E. High deformation effects on the plasticity of ultra-high carbon steel wires. June 2018. *Advanced Materials Proceedings*. Vol. 3(6). P. 414–418. <https://doi.org/10.5185/amp.2018/930>.
15. Vasylyev M. O., Mordyuk B. M., Voloshko S. M., Lesyk D. A. Microstructure Evolution of the Carbon Steels during Surface Severe Plastic Deformation. *Progress in Physics of Metals*. Vol. 22(4). P. 562–618 (2021); <https://doi.org/10.15407/ufm.22.04.562>.
16. Lesuer D. R., Syn C. K., Sherby O. D. Influence of Severe Plastic Deformation on the Structure and Properties of Ultrahigh-Carbon Steel Wire. *HATO Science Series (ASHT)*. V. 80. P. 357–366. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4062-1_46.

REFERENCES

1. Bachmaier, A., Pippan, R., Renk, O. (2020). Effect of Carbon in Severe Plastically Deformed Metals. *Advanced Engineering Materials*. Vol. 22, Is. 12. (2000879). P. 1–20. <https://doi.org/10.1002/adem.202000879>.
2. Ohorodnykov, V. A., Derevenko, Y. A., Alyeva, L. Y. (2016). Resurs plastychnosti metalliv pry kholodnom ob'ємnom formoyzmenenyy: monohrafiya. Vynnytsa: VNTU, 176 s.
3. Khomenko, A. V. (2020). Visokaia plastycheskaia deformatsiia: metody y matematycheskye modely formyrovaniia nanomaterialov. *Zhurnal fizychnykh doslidzhen*. T. 24 (2). С. 2001–1 – 2001–20 [20 stranys]. <https://doi.org/10.30970/jps.24.2001>.
4. Horita, Z., Edalati, K. (2020). Severe Plastic Deformation for Nanostructure Controls. *Materials transactions*. Vol. 61, Iss. 11. P. 2241–2247. <https://doi.org/10.2320/matertrans>.

5. Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A., Yanagida, A. (2008). Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals*. Vol. 57(2). P. 716–735. – <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.
6. Sha, G., Wang, Y. B., Liao, X. Z., Duan, Z. C., Ringer, S. P., Langdon, T. G. (2009). Influence of Equal-Channel Angular Pressing on Precipitation in an Al-Zn-Mg-Cu Alloy. *Acta Materialia*. Vol. 57 (10). P. 3123–3132. – <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2009.03.017>.
7. Pashynska, O. H. (2009). Fyzyko-mekhanichni osnovy podribnennia struktury pry kombinovanoi plastychnoi deformatsii: monohrafiia. Donetsk: Veber. 352 s.
8. Zavdoveev, A., Baudin, T., Rogante, M., Pashynska, E., Skoryk, M. (2020). Shear impact during steel wire drawing on grain bound, aries and mechanical properties. *Letters on materials*, 10(4s). P. 558–565. <https://lettersonmaterials.com/en/Readers/Article.aspx?aid=35968>.
9. Pashynska, O., Pashynskiy, V., Kraliuk, M., Boyko, I. (2013). Forming of properties complex of copper wire by the method of combined deformation by torsion and tension. *Technology Audit and Production Reserves*, 1(1(63)), rr. 16–22. 2022. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.252282>.
10. Pashynska, E., Varyukhin, V., Myshlaev, M. and Zavdoveev, A. (2013). Formation of structure and properties of low-carbon steel under rolling with shear and cold drawing. *Advanced Engineering Materials*. Vol. 16(1). P. 26–32. <http://dx.doi.org/10.1002/adem.201300197>.
11. Pashynska, Skulskiy, V. Yu., Boyko, I. O. (2023). Structure and properties of a low-carbon steel wire after combined cold deformation. *International scientific conference “MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education”*: conference proceedings. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”. Vol. 1. P. 99–102. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-30>.
12. Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A., Yanagida, A. (2008). Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Annals*. 2008. Vol. 57(2). P. 583–772. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.005>.
13. Li, L., Virta, J. (2011). Ultrahigh strength steel wires processed by severe plastic deformation for ultrafine grained microstructure. *Materials Science and Technology*. Vol. 27(5). 845–862. <https://doi.org/10.1179/026708310X12677993662087>.
14. Brandaleze, E. (2018). High deformation effects on the plasticity of ultra-high carbon steel wires. *Advanced Materials Proceedings*. Vol. 3(6). P. 414–418. <https://doi.org/10.5185/amp.2018/930>.
15. Vasylyev, M. O., Mordyuk, B. M., Voloshko, S. M., Lesyk, D. A. (2021). Microstructure Evolution of the Carbon Steels during Surface Severe Plastic Deformation. *Progress in Physics of Metals*. Vol. 22(4). P. 562–618; <https://doi.org/10.15407/ufm.22.04.562>.
16. Lesuer, D. R., Syn, C. K., Sherby, O. D. Influence of Severe Plastic Deformation on the Structure and Properties of Ultrahigh-Carbon Steel Wire. *NATO Science Series (ASHT)*. V. 80. P. 357–366. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4062-1_46.

Pashynska O., Pashynskiy V., Boiko I. THE INFLUENCE OF TENSION WITH SIMULTANEOUS ROTATION ON OBTAINING THE STRUCTURE OF GLOBULAR PEARLITE DURING SPHEROIDIZING ANNEALING

Abstract. The development of new technologies of severe plastic deformation to form strengthened ultrafine-grained state in materials is a promising way of properties increasing. Such materials demonstrate not only a high level of strength properties, but also a sufficient level of technological plasticity. In current work, ways to form an ultrafine-grained high-strength state in wire by its intensive combined deformation and heat treatment are discussed. The goal of the work was to establish the fundamentals of the influence of intensive combined plastic deformation by torsion and tension on the formation of the structure of globular pearlite during spheroidizing annealing. The wire rod made of high-carbon steel grade 75 was used for investigation. The wire from this steel is used to produce reinforced concrete parts, for manufacturing of steel ropes, and as material for metal cord. It has been shown that as a result of torsion and tension treatment, pearlite colonies are deformed, the interlamellar distance increases, and the proportion of cementite plates of shorter length

also increases. This effect deals with the influence of shear stresses during treatment on brittle cementite plates, which fragment under the influence of deformation. It has been established that torsion with tension, fulfilled before drawing, activates the cementite particles refinement, which intensifies the spheroidization process and provides formation of optimal structure for further drawing. It has been shown that to obtain the structure of globular pearlite for successful drawing, the best way is wire rod processing after hot rolling according to the scheme: deformation with tension and torsion and subsequent spheroidizing annealing. In this work the results of such scheme realization were considered. Positive influence of preliminary combined plastic deformation on the formation of the structure of globular pearlite during spheroidizing annealing can be used at industry for producing spheroidized wire. The effect of proposed technology on the spheroidization process can reduce the duration of the spheroidizing annealing, and this will decrease the energy consumption and oxidative decarburization of the wire surface.

Key words: *high-carbon steels; ferrite; perlite; cementite; globular pearlite; spheroidization; tangential stresses; microhardness; heterogeneity; processing mode.*

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

Статтю прийнято до редакції 20.12.2023

УДК 620:178.3

ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СУДНОРЕМОНТІ ТА ТРАНСПОРТНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ

Шарко О., д.т.н., професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: mvsharko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9025-7990;

Степанчиков Д., к.т.н., доцент, Херсонський національний технічний університет, м. Херсон, Україна e-mail: dmitro_step75@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5027-2213;

Шарко А., Ph.D., Технічний університет м. Ліберець, Чеська Республіка, e-mail: artem.sharko@tul.cz, ORCID: 0000-0002-6350-7189;

Яненко А., Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: yanenko9494@gmail.com; ORCID: 0009-0004-7992-8369;

Мовчан П., Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: trpv01121988@gmail.com; ORCID: 0009-0003-1004-6651.

Запропоновано систему багатокритеріального аналізу визначення основних характеристик бетонної суміші для судноремонту і транспортної інфраструктури в реальному часі. Її переваги полягають у масштабованості та адаптивності до робочих навантажень. Обчислювальною основою розрахунків стала цифровізація технології дослідження та аналізу фізико-механічних властивостей бетонних сумішей. Розроблено алгоритм багатокритеріального аналізу при дослідженні термодинамічних процесів у судноремонті. Визначено оптимальний склад структурних елементів сумішей для заданої технології їх виробництва. Проведені експерименти та обчислення показали, що використання результатів дослідження у поєднанні з критеріями оптимізації є основою підвищення достовірності оцінювання параметрів термодинамічних процесів та оптимізації міцнісних властивостей бетонної суміші, визначення складу та структури матеріалів за зміни технології їх виробництва. Моделювання параметрів цільової функції для судноремонту та транспортної інфраструктури засвідчило перевагу цифровізації технологій під час аналізу властивостей бетонних сумішей, де кінцевий результат найкраще поєднує в собі результати експериментальних досліджень та їхнього математичного опрацювання. Представлена система застосування багатокритеріального аналізу при дослідженні термодинамічних процесів у судноремонті та транспортній інфраструктурі являє собою набір статистичної експертної інформації, в якій якісна слабоструктурована сторона визначається через вагове зміст аналізованих термодинамічних властивостей, що підлягають експертній оцінці, а критеріальні методи використовуються для одержання остаточного висновку. Кінцевий результат є адаптацією обох додатків.

Ключові слова: багатокритеріальний аналіз; склад; оптимізація; термодинамічні процеси; судноремонт; транспортна інфраструктура.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.117-132

Вступ. Залізобетонний судноремонт – один із напрямів розвитку суднобудування, що займається використанням бетону і залізобетону як основного матеріалу для виробництва корпусів морських і річкових плавзасобів різних призначень. Зведення бетонних плавучих споруд, доків, дебаркадерів тощо має високу економічність порівняно з металевими конструкціями. Судноремонтні підприємства мають свою специфіку, розташовуючись акваторіями для відстою суден, причальними лініями, обслуговуючими господарствами, суднопідйомним обладнанням. Піонером у будівництві залізобетонних суден були Туреччина і Китай. У зв'язку із загостренням дефіциту тоннажу чинного флоту і нестачею промислових запасів сталі займалися будівництвом кораблів і суден, морських буксирів, самохідних поромів і моторних баркасів такі розвинуті країни, як США, Великобританія, Італія, Німеччина, Франція, Норвегія, Швеція, Данія із загальним тоннажем понад 600 тис. тонн. У повоєнний час у Німеччині було спущено на воду п'ятсот 300-тонних суховантажів для суден у Північному морі, на Балтиці та вздовж Норвезького узбережжя.

Корпуси таких суховантажів продемонстрували високу стійкість до динамічних навантажень (рис. 1).

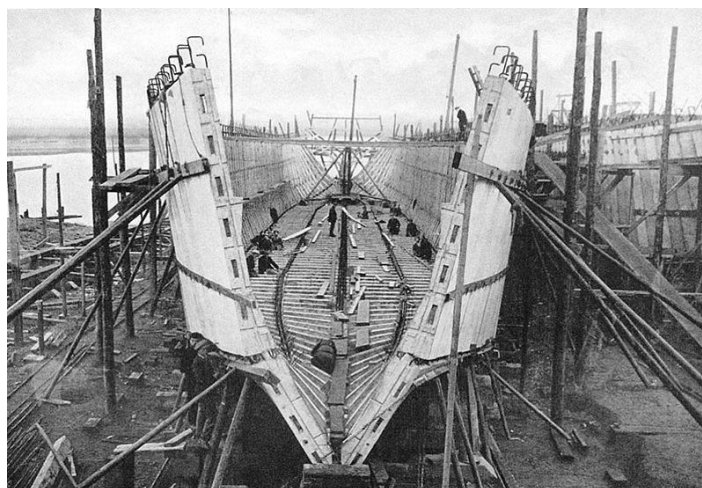


Рисунок 1 – Споруда корабля з бетону США erasvite.org

Найефективнішими в сучасному світі залишаються плавучі засоби із залізобетону та їхнє використання при перевезенні різноманітних вантажів як величезних плавучих понтонів у гаванях, у наведенні переправ і понтонів дає змогу існувати їм у сучасному світі (рис. 2).



Рисунок 2 – Плавучі споруди з бетону: а) бетонне річкове судно б) баржа на Рейні

Бетонні та залізобетонні конструкції морського і водного транспорту складаються зі шлюзів, гребель, насосних станцій, причалів, набережних, гідротехнічних споруд і судноремонтних підприємств, а також будівель і споруд з транспортною інфраструктурою (рис. 3).

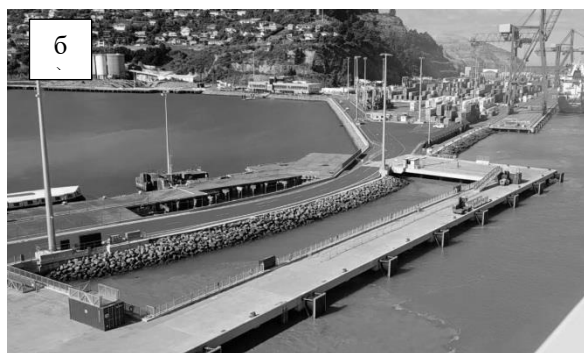
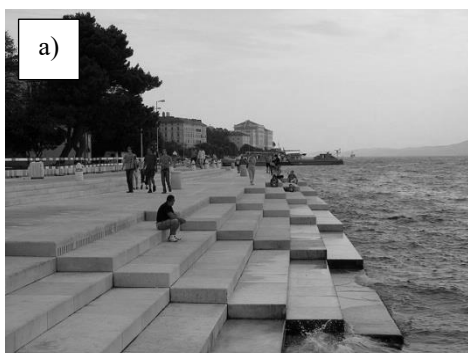


Рисунок 3 – Морська транспортна інфраструктура: а) набережна, б) причал

Досвід будівництва та експлуатації морських портових споруд показує, що обґрунтоване визначення параметрів на етапі виготовлення конструкцій дає змогу забезпечити практично безремонтний термін експлуатації [1, 2].

Зведені плавучі споруди із залізобетону (доки, дебаркадери) володіють вищою ефективністю порівняно з металевими конструкціями з бетонних будівельних елементів, їхньою підвищеною довговічністю і спрощеною технологічною базою.

Економія ресурсів у залізобетонному суднобудуванні особливо загострилася через постійне зростання цін на цемент. Стає актуальним застосування сировини різного походження, що узгоджується як з економічними, так і з екологічними вимогами. Відомі публікації щодо використання як в'язучого сірки. Використання сірки як будівельного матеріалу знаходить своє застосування в конструкціях різного призначення, що експлуатуються у важких умовах впливу поперемінного заморожування та відтавання, зволоження та висушування, агресивних сольових розчинах під час дії статичних і знакозмінних навантажень. Виділяється як самостійне наукове завдання вибір оптимального складу придатного для використання в суднобудуванні з урахуванням природно-сировинної бази [3, 4]. Різновидом бетонних сумішей, які застосовують у транспортному суднобудуванні та судноремонті, є сіркобетон – штучний композиційний матеріал, який складається з інертних заповнювачів, які виконують роль каркасу, та сіркоцементу, який є сполучним матеріалом для всієї композиції. Як інертні заповнювачі сіркобетону використовують щільні гірські породи, штучні та природні пористі матеріали, відсів дроблення гірських і осадових порід.

Перехід до збірного залізобетонного суднобудування ґрунтувався на технології побудови суден із плоских секцій. При цьому ліквідувалися сезонні роботи на верфях залізобетонного суднобудування і зменшувався стапельний період. Світовий досвід використання залізобетону характеризується крім удосконалення конструктивних рішень роботами, пов'язаними із застосуванням нових перспективних матеріалів на основі легких керамічних заповнювачів, фібробетонів [5], самоущільнювальних бетонів [6, 7], полімербетонів.

Інтерес до транспортного бетонного суднобудування пов'язаний з появою нових конструкційних матеріалів, таких як композитні матеріали, і розвитком технології бетонних суднобудівних робіт. Плавучий композиційний док "Паллада 5000TLC" (рис. 4) може забезпечувати докування всіх типів цивільних суден з доковою масою до 5000 т., довжиною 120 метрів, а також військових кораблів типу корвет і легкий фрегат, дизель-електричних підводних човнів.



Рисунок 4 – Плавучий композиційний док Паллада 5000TLC

Понтон дока виготовлений із залізобетону із застосуванням сульфатостійкого портландцементу і спеціальних добавок. Керування баластними операціями забезпечує комп'ютерна система, що здійснює постійний контроль за станом судна на доці. Такий стан матеріалів дає змогу знизити витрати на обслуговування в 2–2,5 рази порівняно з аналогічними сталевими спорудами і виключає необхідність ставити їх періодично в сухий док під час усього терміну експлуатації, який становить понад 50 років.

Постановка проблеми. Досягнення екстремуму однієї з властивостей супроводжується зменшенням інших властивостей на певну величину. Однак навіть у цьому випадку точка оптимальної постановки визначається з великою похибкою. Перспективним напрямком використання бетонних сумішей є матеріали, що мають практичну

безусадковість, пластичність, підвищену адгезію, низький коефіцієнт температурного розширення. Застосування таких спеціальних бетонів забезпечує довговічність і значне збільшення міжремонтних термінів. Пошук оптимального складу бетонів з високими характеристиками міцності та експлуатаційними властивостями стає актуальною проблемою. Оброблення інформації пов'язано з кількісними параметрами, використовуваними як вхідні змінні, і параметрами, що мають тільки якісний опис. В основу цієї роботи покладено поєднання експериментальних результатів з їхньою обробкою методами багатокритеріальної оптимізації.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є моделювання фізичних і технологічних параметрів бетонних сумішей за допомогою багатокритеріальної оптимізації.

Завданнями роботи є:

- складення апріорної експертної інформації про зміну фізико-механічних властивостей у функції від часу затвердіння;
- встановлення критеріїв оптимізацію та необхідних згорток;
- побудова системи багатокритеріальної оптимізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ідентифікацію структурних особливостей механізмів деформування під час вигину представлено в [8, 9]. Оптимізацію складів цементних дисперсійно-армованих дрібнозернистих бетонів, які містять вуглецеві наномодифікатори, запропоновано в [10, 11]. Недоліком представлених робіт є ігнорування багатокритеріального підходу до оцінки складу бетонних сумішей.

Технологію та рецептуру отримання пористих структур армованих композитів описано в [12]. Методику оптимізації матричного складу, що впливає на механічні властивості композитів з вуглецевими волокнами, представлено в [13]. Багатокритеріальні оцінки складу і властивостей дерев'яних конструкцій даються в роботі [14]. Багаторівневу комплексну ієрархічну комплексну систему структурної оптимізації для нафтової та хімічної індустрії з урахуванням ризику і невизначеності представлено в [15]. Зазначається серйозна обчислювальна складність отримання результатів та їх ідентифікації. Використання методу дискретних елементів для оцінки складу і властивостей асфальтобетонних сумішей описано в [16]. У [17] представлено структуру мультидисциплінарного оптимізаційного алгоритму для визначення структури ламінованих композитів. У [18] виконано оцінку змін структури решіток композитів під час навантаження. У [19, 20] наведено методику оптимізації складу композитних матеріалів з використанням багатокритеріального аналізу.

Основними методами багатокритеріальної оптимізації, використовуваними в цитованих джерелах, є згортка критеріїв, оптимізація за основними критеріями і метод послідовних поступок. Практичне застосування критеріальних методів широке й різноманітне. Основним недоліком глобальної оптимізації всіх параметрів геополімера є висока обчислювальна складність цільових функцій. Для більшості практичних задач оптимізації аналітичні вирази граничних функцій невідомі. Нерозв'язаною частиною загальної проблеми побудови систем багатокритеріальної оптимізації є їхня еквівалентність у разі заміни початкових критеріїв загальними агрегованими критеріями.

Виклад основного матеріалу. Матеріал і метод. Від правильності вибору складу бетону, призначеного для суднобудування, залежать технологічні показники сумішей: міцність, щільність, непроникність, морозостійкість, а також корозійна стійкість бетону. Звичайні пропорції цементу 10...15% води і наповнювачів 85–90% всієї маси. Наповнювачами виступають пісок, гравій, щебінь, керамзит, подрібнені гірські породи.

Цементи, які використовують для суднобудівного бетону, мають забезпечувати можливість отримання необхідних властивостей. Використовуються: сульфатостійкий портландцемент, пластифікований портландцемент, гідрофобний портландцемент. Після виготовлення міцність бетону зростає особливо швидко протягом 7–14 діб. За температури 15...25°C і відносної вологості навколишнього повітря 90–100% суднобудівний бетон досягає необхідної водонепроникності через 28 діб. Склад бетонної суміші встановлюють виходячи із заданих показників пластичності, статистичної та динамічної міцності затверділої

композиції, непроникності для рідкої фази, стійкості до впливу морської та прісної води. Особливість суднобудівного бетону для плавучих споруд полягає в тому, що під час тривалих будівництв він піддається навантаженням через 90 і 180 діб і більше. За цей час його міцність продовжує збільшуватися.

Склади бетонних сумішей встановлюють у лабораторних верфях з урахуванням місцевих виробничих умов і матеріалів, що застосовуються для виготовлення бетону. Під час виготовлення конструкції якість бетону контролюють перевіркою відповідності матеріалів, що застосовуються, технічним вимогам стандартам і нормативам. Вони встановлюють вимоги до компонентів бетону і методу їх випробувань. Рухливість сумішей визначають за допомогою стандартного усіченого конуса, у якого діаметр нижньої основи 200 мм, верхньої 100 мм, висота 300 мм, конус відкритий зверху і знизу. Для визначення рухливості бетонної суміші конус встановлюють на гладкому металевому листі. Після того, як конус знято, бетонна суміш вивільняється з форми. Величина розтікання суміші характеризують легкоукладальність. Якісною характеристикою бетонної суміші є її усадка. Величина річної усадки бетону становить 0,2–0,4 мм на один погонний метр. Вона залежить від характеристик цементу, заповнювачів водоцементного відношення. Ці значення характеристик бетону забезпечуються ретельністю дотримання технологій виготовлення. Характеристикою бетонної суміші є зв'язність і рухливість. Склад бетонної суміші підбирають таким чином, щоб вона була однорідною і не розшарувалася під час транспортування та укладання. Вона зростає при збільшенні витрати цементу і зменшенні водоцементного відношення. Рухливість бетонної суміші характеризують здатність розтікатися під дією власної ваги зберігаючи однорідність. Вона зростає при збільшенні кількості води і пластифікуючих добавок.

Представлено зведену таблицю фізико-механічних властивостей і технологічних параметрів термодинамічних процесів отримання суднобудівних бетонів (табл. 1).

Таблиця 1 – Фізико-механічні властивості та технологічні параметри термодинамічних процесів отримання суднобудівних бетонів

<i>Склад</i>	<i>Фізико-механічні властивості</i>	<i>Технологічні властивості</i>	<i>Регульовальні способи</i>	<i>Діагностичні операції</i>
Цемент, вода, наповнювачі: гравій, щебінь, керамзит, кварцовий пісок	Статистична та динамічна міцність (15...20 МПа)	Затвердіння	Витримка в часі: Різка зміна 7...14 діб Остаточна 28 діб	Експерименти в лабораторних верфях, врахування місцевих виробничих умов
	Міцність на стиск і вигин (10...50 МПа)	Утворення навантаженої суміші	Готовність до експлуатації 90...180 діб	Відповідність технічним вимогам і стандартам
Сульфатостійкий портландцемент, пластифікований портландцемент, гідрофобний портландцемент	Пластичність	Удобоукладальність	Введення пластифікуючих добавок та їх варіювання	Визначення рухливості методом усіченого конуса
	Непроникність для рідкої фази	Усадка	Збільшення витрати цементу	Контроль розтікання
	Щільність	Зв'язаність	Зменшення водоцементного відношення	Контроль розшарування
	Теплопровідність 2,04 Вт/мс	Теплопроникність	Регулювання вологості	Теплотехнічні розрахунки
	Трещиностійкість	Стиранність	Регулювання пористості та щільності	Варіювання добавок в'язучої речовини

Як методи дослідження використовували експериментальну інформацію в поєднанні з кількісними оцінками багатокритеріальної оптимізації.

Розв'язання задач для забезпечення досягнення поставленої мети. На стадії виготовлення залежно від фаз твердіння бетону змінюються параметри теплоємності та теплопровідності бетонної суміші. Змінюється також рівномірність розподілу температурних параметрів у бетонованому об'ємі. Виникаючі напруги створюють мікродфекти, які знижують міцнісні властивості бетонної суміші. Від вибору оптимальних термодинамічних процесів отримання бетонних сумішей залежно від їхнього складу залежать властивості міцності: межі міцності на вигин і стиск, ударна в'язкість і густина матеріалу. Дослідження термодинамічних процесів, що застосовуються в судноремонті та транспортній інфраструктурі, обмежується емпіричним добором складу компонентів і встановленням діапазонів їх зміни. Алгоритм наявних технологій вибору оптимальної рецептури бетонних сумішей представлений на рис. 5.



Рисунок 5 – Алгоритм наявних технологій вибору оптимальної рецептури бетонних сумішей

Існуючі методи оцінки складу бетонних сумішей не враховують додаткові значення, знайдені шляхом емпіричного спостереження. Це істотно знижує ефективність методів оптимізації за множинними критеріями, оскільки ухвалення рішень відбувається в умовах невизначеності та ризику. Тому необхідна модернізація методів багатокритеріальної оптимізації, що полягає в переході від векторної оптимізації до скалярної. Ця операція перетворює функції згортки якісних критеріїв на єдину узагальнюючу. Ухвалення рішень щодо складу суміші за невизначених вхідних даних починається з побудови матриці виграшів R . Методологічною основою алгоритму побудови операцій визначення складу бетонних сумішей є побудова платіжної матриці або матриці виграшів R .

$$R = \begin{pmatrix} & P_1 & P_2 & \dots & P_n \\ q_1 & \delta y_{11} & \delta y_{12} & \dots & \delta y_{1n} \\ q_2 & \delta y_{21} & \delta y_{22} & \dots & \delta y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_m & \delta y_{m1} & \delta y_{m2} & \dots & \delta y_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

де $q_1, \dots, q_i, \dots, q_m$ – ваговий склад компонентів проби, $P_1, \dots, P_i, \dots, P_n$ – аналізовані експлуатаційні параметри, що аналізуються, δy_{ij} – відносне відхилення j -го параметра від оптимального значення.

При визначенні елементів матриці необхідний перехід від векторних до скалярних оцінок. Для цього використовують функції згортки векторних аргументів [21]. Для визначення елемента матриці використовують оцінку скалярного вектора. У цьому разі необхідний перехід від оцінки вектора до скаляра об'єктів. Функції, які використовують під час розв'язання багатокритеріальної задачі, являють собою функції згортки векторних аргументів $y_i = (y_{i1}, \dots, y_{ij}, \dots, y_{in})$ у скаляри $\delta y_{ij} = f(y_i)$. Згортка векторного аргументу слугує для зменшення кількості критеріїв. Її мета – замінити вихідні критерії загальними критеріями. Обов'язковою умовою використання агрегації критеріїв є встановлення їх ранжування. При цьому слід використовувати операцію нормалізації, яка необхідна для компенсації малих значень одних критеріїв більшими значеннями інших критеріїв

$$f_u(y_i) = \sum_{j=1}^n \Delta y_{ij} \quad (2)$$

Найпростішою скалярною функцією, що забезпечує лінійний порядок об'єктів, яка формується за граничною важливістю ознак.

$$\delta y_{ij} = \begin{cases} \frac{|y_{ij} - c_j|}{y_{j,\max} - c_j}; & y_{ij} > c_j; \\ \frac{|y_{ij} - c_j|}{c_j - y_{j,\max}}; & y_{ij} < c_j. \end{cases} \quad (3)$$

де i – номер рядка; j – номер стовпця матриці.

Як цільові параметри оптимізації слід вибирати найкращі значення, які можуть бути досягнуті в експериментальній вибірці. Вони визначаються з фізичного змісту розв'язуваної задачі оптимізації – це можуть бути максимальні, мінімальні або середні значення з експериментальної вибірки. За такого підходу формула змістить цілі величини щодо шкали $(0,1)$. Водночас слід зазначити, що за такого підбору елементів матриці виникає їхній збіг зі спостережуваними експериментальними значеннями. Однак за такого добору параметрів відповідні елементи матриці збігаються з обов'язково спостережуваними значеннями. Використання суми згортки призводить до втрати відповідної ознаки із загальної оцінки об'єкта, а використання добутку згортки призведе до зменшення до 0. Далі слідує розширення верхньої максимальної та нижньої мінімальної межі кожної ознаки на цей самий відсоток. Така скалярна оптимізація потребує використання відповідних знань про масштаби вагових коефіцієнтів та їхній вплив на результати оптимізацій.

Оскільки ці знання залежать від предметної області, порядок об'єктів у n -вимірному просторі не може бути явно визначений. Тому актуальним є вивчення впливу властивостей узагальнених цільових функцій, характеристичних масштабів і вагових коефіцієнтів на результати оптимізації. У теоретичному аналізі використано такі узагальнювальні багатокритеріальні функції корисності, які є узагальнювальними.

Аддитивна згортка

$$\delta y_i = \sum_{j=1}^n \omega_j \delta y_{ij} \quad (4)$$

де ω_j – важливість (ваговий коефіцієнт) j -ї ознаки, $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$.

Степенева мультиплікативна згортка

$$\delta y_i = \prod_{j=1}^n (\delta y_{ij})^{\omega_j} \quad (5)$$

Додаткова мультиплікативна згортка

$$\delta y_i = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \omega_j \delta y_{ij}) \quad (6)$$

Найкращим об'єктом вважається той, що має мінімальні значення функцій.

Критерій Севіджа (Вальда) (мінімум-максимум)

$$Z_v = \min_i \max_j \delta y_{ij} \quad (7)$$

Критерій Лапласа (мінімум-мінімум)

$$Z_L = \min_i \min_j \delta y_{ij} \quad (8)$$

Критерій Гурвіца

$$Z_{hw} = \min_i \left\{ \rho \min_j \delta y_{ij} + (1 - \rho) \max_j \delta y_{ij} \right\} \quad (9)$$

де $0 \leq \rho \leq 1$ – індикатор песимізму в розрахунках приймався рівним 0,5.

Аддитивна згортка (4) синтезує сумарну величину приватних показників з урахуванням важливості. Пряма мультиплікативна функція (5) відображає рівномірність приватних показників. Додаткова мультиплікативна згортка (6) має зворотну властивість. Критерій Севіджа забезпечує одержання гарантованого результату в найбільш невідгідній ситуації. Розглядається найнесприятливіша ситуація, при цьому виключається як надмірний виграш, так і програш. Його доцільно використовувати в екстремальних ситуаціях, коли рішення ухвалюють тільки один раз, без можливості коригувати ситуацію і виправити первісне рішення. Критерій Лапласа має назву критерію нестримного оптимізму. Він не враховує можливі негативні шляхи розвитку ситуації та виключає можливість крайнього програшу. Прагнення до максимального виграшу є визначальним, хоча величини різання при його використанні великі.

Критерій Гурвіца є основою ухвалення стратегічних рішень при встановленні діапазону результатів досліджень від значень крайнього оптимізму до значень крайнього песимізму. Критерій Гурвіца пов'язаний із введенням вагового параметра $0 \leq \rho \leq 1$, який називають індексом песимізму. Для будь-якої альтернативи вибір найгіршого визначається з імовірністю ρ , а найкращий вибір робиться з імовірністю $(1 - \rho)$. За $\rho = 0$ критерій Гурвіца в максимумі збігається з критерієм Лапласа, а за $\rho = 1$ – з критерієм Вальда в максимумі. Недоліком цього критерію є те, що він враховує тільки два результати – найгірший і найкращий.

Крім того, існують труднощі з визначенням індексу песимізму ρ . Передбачається, що кожна раціональна людина, яка ухвалює рішення, повинна вибрати відповідні максимальні або мінімальні стратегії. Основними етапами побудови системи оптимізації складу суміші стали: експериментальні вимірювання, математичні розрахунки, зберігання та обмін інформацією, інтерпретація результатів. Алгоритм багатокритеріального аналізу під час дослідження термодинамічних процесів у судноремонті та транспортних технологіях наведено на рис. 6.



Рисунок 6 – Алгоритм багатокритеріального аналізу під час дослідження термодинамічних процесів у судноремонті та транспортних технологіях

Метод згортки критеріїв полягає в перетворенні векторного критерію на скалярний і проявляється в заданні коефіцієнтів початкових критеріїв та їх подальшій екстремізації на множині допустимих варіантів. Згортка являє собою середньозважене значення вихідних критеріїв. Умовою її використання є приведення до єдиної шкали, тобто нормалізація. За однокритеріальної або скалярної оптимізації одна цільова функція визначається для набору варіантів рішення. У багатокритеріальній оптимізації таких функцій кілька. Вони утворюють векторний критерій.

Експеримент. Випробування на стиск проводять відповідно до стандарту AS 1012.9 з використанням циліндричних форм діаметром (Ø46 x 92) мм (рис. 7).

Щільність матеріалів вимірюється шляхом ділення маси зразка на його об'єм. Навантаження контролюється зміщенням із постійною швидкістю 2,4 мм/хв для всіх випробувань. Для отримання різних механічних властивостей, необхідних для багатокритеріальної оптимізації складу, змінювали умови затвердіння від початку процесу формування структури суміші через 7, 14, 28, 60, 90 діб. Отримані результати представлені в таблиці 2.



Рисунок 7 – Установка для стрес-тестування: а) випробувальна машина Instron моделі 4202, б) установка для випробувань на вигин, в) установка для випробування на стиск

Таблиця 2 – Механічні властивості бетонних сумішей

Кіль-ть днів	Щільність, ρ , кг/м ³	Межа міцності на стиск, σ_c , МПа	Міцність на вигин, σ_b , МПа	Модуль Юнга, ГПа	Межа міцності на розрив, МПа
7	2301	38.17	51.2	33.14	3.0
	2302	42.14	50.3	31.01	3.1
	2317	45.13	52.6	30.04	3.2
	2361	44.15	50.9	34.19	3.4
	2401	46.12	53.0	35.19	3.3
14	2450	47.14	52.1	35.17	3.3
	2420	46.12	52.9	36.01	3.2
	2400	49.14	51.4	36.90	3.3
	2380	48.16	50.3	35.17	3.3
	2358	50.14	53.1	37.00	3.2
28	2360	52.18	57.1	34.12	3.3
	2400	54.21	56.6	35.01	3.2
	2315	56.24	56.4	37.18	3.4
	2320	56.28	57.4	38.01	3.2
	2305	58.30	58.8	38.00	3.4
60	2302	60.01	54.1	39.02	3.2
	2340	61.12	53.2	38.01	3.3
	2305	58.14	52.1	38.87	3.4
	2300	56.19	54.6	39.19	3.3
	2280	58.35	55.1	41.01	3.5
90	2260	55.11	56.0	38.01	3.5
	2212	57.15	54.1	37.16	3.5
	2230	54.17	52.3	36.18	3.4
	2215	56.15	54.1	37.13	3.6
	2205	57.13	55.2	36.12	3.6

Представлена експериментальна інформація зібрана для суднобудівного бетону марки М500. Діапазони зміни механічних характеристик і тренди їх зміни в різний час затвердіння визначалися з урахуванням вимог ГОСТів і Міжнародних стандартів ISO 3893, ГОСТ 25192, ДСТУБ.В.2.7-176-2008, (EN206-1.2000NEQ). Як нормативні документи використовувалися дані Ост 5.9267-87 "Бетон суднобудівний важкий, загальні вимоги". Згідно з цими документами марку бетону характеризують межа міцності на стиск, на осьове розтягнення, вигин, модуль Юнга і щільність після 28 днів у нормальних вологісних умовах. Для суден і плавспоруд із тривалим терміном побудови допускається марку важкого суднобудівного бетону за міцністю встановлювати у віці бетону 60 і 90 днів. Діапазон зміни густини становить 2300–2450 кг/м³, межа міцності на стиск 50–60 МПа, межі міцності на розтягнення 3,4–3,6 МПа, межа міцності на розтягнення під час вигину 55–58 МПа, модуль пружності 35–41 ГПа. Наведені значення у таблиці 2 отримано шляхом екстраполяції строків твердіння та інтерполяції усередині часових інтервалів згідно з відомими трендами.

Основні результати та обговорення. Розв'язанням задачі скалярної оптимізації вважається елемент, який максимізує або мінімізує цільову функцію. У разі багатокритеріальної векторної оптимізації відбувається максимізація одного критерію і мінімізація інших. Безліч рішень подається як набір обраних векторів.

Таблиця 3 – Матриця перетворених величин дев'яти механічних характеристик бетонних сумішей

Кіль-ть днів	Щільність, $\omega=0.16$	Межа міцності на стиск, $\omega=0.26$	Межа міцності на вигин, $\omega=0.26$	Модуль Юнга, $\omega=0.16$	Межа міцності на розтягнення, $\omega=0.16$
7	0.4419	1.000	0.9009	0.7275	1.0000
	0.4456	0.8315	1.0000	0.9147	0.8427
	0.5018	0.7046	0.7469	1.0000	0.6855
	0.6666	0.7461	0.9339	0.6353	0.3710
	0.8164	0.6625	0.7029	0.5474	0.5283
14	1.0000	0.6192	0.8019	0.5492	0.5283
	0.8876	0.6625	0.7139	0.4754	0.6855
	0.8127	0.5344	0.8789	0.3971	0.5283
	0.7378	0.5759	1.0000	0.5492	0.5283
	0.6554	0.4919	0.6919	0.3884	0.6855
28	0.6629	0.4053	0.2517	0.6414	0.5283
	0.8127	0.3192	0.3067	0.5632	0.6855
	0.4943	0.2330	0.3287	0.3725	0.3710
	0.5131	0.2313	0.2187	0.2996	0.6855
	0.4569	0.1456	0.0647	0.3005	0.3710
60	0.4456	0.0730	0.5818	0.2109	0.6855
	0.5880	0.0259	0.6809	0.2996	0.5283
	0.4569	0.1524	0.8019	0.2240	0.3710
	0.4382	0.2351	0.5268	0.1959	0.5283
	0.3633	0.1435	0.4718	0.0360	0.2138
90	0.2883	0.2810	0.3728	0.2996	0.2138
	0.1086	0.1944	0.5818	0.3743	0.2138
	0.1760	0.3209	0.7799	0.4604	0.3710
	0.1198	0.2368	0.5818	0.3769	0.0566
	0.0823	0.1952	0.4608	0.4657	0.0566

Методика розрахунку параметрів цільових функцій на основі багатокритеріального аналізу з використанням критеріїв Лапласа, Гурвіца і Вальда вимагає послідовного використання і знаходження експериментальних значень відхилень від пріоритетного розташування цілей.

Так наприклад визначення критеріїв Вальда за формулою (7) використовуючи кількісні дані наведені у другому стовпці в таблиці 4 вибираємо мінімальне значення з усіх максимальних це значення доводиться 0.4569. Аналогічно визначаються результати оптимізації за критерієм Лапласа лише вибираємо мінімум із мінімумів. При обробці даних за критерієм Гурвіца набуваємо значення $\rho = 0.5$. Позначення індексу ρ як індексу стратегії раціонального оптимізму вважається загальноприйнятим у теорії матричних ігор для збереження спільності викладу ми зберегли це формулювання.

Розрахунки проводилися в системі комп'ютерної математики Maple. Результати розрахунків за формулами (3–9) для кожної групи механічних параметрів були виконані з урахуванням вагових коефіцієнтів, отриманих експертним шляхом:

- щільність $\omega = 0.16$
- межа міцності на стиск $\omega = 0.26$
- межа міцності на вигин $\omega = 0.26$
- модуль Юнга $\omega = 0.16$

- межа міцності на розтягнення $\omega = 0.16$

На підставі експертних оцінок встановлено оптимальні значення параметрів (максимальні або мінімальні значення з таблиці 2): густина – мінімальна; міцність на стиск, міцність на розтягнення, модуль Юнга – максимальні; Результати розрахунків і значення згорток та критерії визначення оптимальності механічних параметрів геополімерів наведено в таблиці 4. У табл. 4 використано такі позначення: y_a – адитивна згортка (4); y_{ms} – мультиплікативна згортка (5); y_{md} – додаткова мультиплікативна згортка (6); критерій Валда-Вальда (7); критерій Лапласа (8); критерій Гурвица (9). Оптимальні значення критеріїв і згорток виділені жирним шрифтом і кольором.

Таблиця 4 – Значення згорток та критерії визначення оптимальності механічних параметрів геополімерів

Кіль-ть днів	min	max	(max+min)/2	y_a	y_{ms}	y_{md}
7	0.4419	1.0000	0.7209	0.8413	0.8116	0.6091
	0.4456	1.0000	0.7228	0.8287	0.8034	0.6021
	0.5018	1.0000	0.7509	0.7273	0.7134	0.5473
	0.3710	0.9339	0.6525	0.7045	0.6770	0.5393
	0.5283	0.8164	0.6723	0.6577	0.6507	0.5087
14	0.5283	1.0000	0.7641	0.7019	0.6838	0.5342
	0.4754	0.8876	0.6815	0.6856	0.6749	0.5242
	0.3971	0.8789	0.6380	0.6455	0.6191	0.5045
	0.5283	1.0000	0.7641	0.7002	0.6770	0.5366
	0.3884	0.6919	0.5401	0.5844	0.5714	0.4654
28	0.2517	0.6629	0.4573	0.4641	0.4350	0.3860
	0.3067	0.8127	0.5597	0.4926	0.4540	0.4053
	0.2330	0.4943	0.3637	0.3441	0.3338	0.3001
	0.2187	0.6855	0.4521	0.3567	0.3211	0.3103
	0.0647	0.4569	0.2608	0.2352	0.1846	0.2149
60	0.0730	0.6855	0.3792	0.3850	0.2836	0.3348
	0.0259	0.6809	0.3534	0.4103	0.2394	0.3545
	0.1524	0.8019	0.4771	0.4164	0.3430	0.3610
	0.1959	0.5283	0.3621	0.3841	0.3542	0.3318
	0.0360	0.4718	0.2539	0.2581	0.1938	0.2361
90	0.2138	0.5283	0.3710	0.2983	0.2937	0.2658
	0.1086	0.5818	0.3452	0.3133	0.2655	0.2810
	0.1760	0.7799	0.4779	0.4474	0.3982	0.3812
	0.0566	0.5818	0.3192	0.3014	0.2298	0.2726
	0.0566	0.4657	0.2611	0.2673	0.2004	0.2438
	Vald 0.4569	Laplas 0.0259	Hurwitz 0.5129			

Аналіз отриманих результатів дає змогу констатувати, що амортизація згорток (адитивної, мультиплікативної та додаткової мультиплікативної) дає однозначний висновок – оптимальний склад 28 днів. Критерій Вальда також вказує на склад 28 днів. Визначено оптимальні значення характеристик бетонної суміші для судноремонту та транспортної інфраструктури: густина 2305 кг/м³, межа міцності на стиск 58.30 МПа, межа міцності на вигин 58.80 МПа, модуль Юнга 38.00 ГПа, межа міцності на розтяг 3.4 МПа. Критерій Лапласа дає оптимальний склад 60 днів. Критерій Гурвица суттєво залежить від коефіцієнта песимізму ρ , вибір якого суб'єктивний і сильно змінює результат. Тому критерій Гурвица слід вважати допоміжним і не враховувати його невідповідність загальній тенденції.

Слід відмітити, що градація часу затвердження по отриманих фізико-механічних властивостям через 7, 14, 28, 60 і 90 днів з розбивкою на п'ять рівнів є умовною. Така форма обрана для зручності користування результатами дослідження.

Висновки

1. Відповідно до галузевих вимог бетон для транспортного будівництва повинен мати міцність на стиск, морозостійкість, стійкість до стирання і динамічних навантажень. Розроблення рецептур має враховувати всі потенційні складнощі під час будівництва транспортної інфраструктури. Визначено оптимальні значення характеристик бетонної суміші для судноремонту та транспортної інфраструктури: густина 2305 кг/м³, межа міцності на стиск 58.30 МПа, межа міцності на вигин 58.80 МПа, модуль Юнга 38.00 ГПа, межа міцності на розтяг 3.4 МПа. Моделювання параметрів цільової функції для судноремонту та транспортної інфраструктури засвідчило перевагу цифровізації технологій під час аналізу властивостей бетонних сумішей, де кінцевий результат найкраще поєднує в собі результати експериментальних досліджень та їхнього математичного опрацювання.

2. Бетон для транспортного будівництва та судноремонту відрізняється за термодинамічними та фізико-технічними показниками, а також рецептурою, склад якої проектується залежно від категорії об'єкта. Увага, що приділяється рецептурі та якості компонентів, зумовлена умовами експлуатації транспортних об'єктів, у т.ч. доріг і штучних споруд. Пропонована система багатокритеріальної оцінки визначення оптимальних характеристик сумішей містить суб'єктивні та об'єктивні елементи вибору рішення. Цей підхід являє собою новий спосіб опрацювання інформації, що ґрунтується на математичному моделюванні.

Перспективи подальших досліджень. Перспектива подальших досліджень полягає у ширшому залученні для аналізу інших критеріїв оптимізації та розширення динаміки технологій та рецептура виготовлення суднобудівного бетону з урахуванням умов його використання.

Іншою не менш важливою перспективою подальших досліджень є напрямок пов'язаний із встановленням причинно-наслідкових зв'язків між технологіями отримання бетонних сумішей їх рецептури та спостереженням за зміною у фізико-механічних властивостей при визначенні оптимальних концентрацій сполучних елементів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Горохов М. С., Вплив параметрів дисперсійного армування на тріщиностійкість суднових конструкцій з фібробетону. Вісник Державного університету морського та річкового флоту ім. адм. С.О. Макарова, 2014, №1(23), 68–73.
2. Шехоркіна С. Є., Матюшенко І. М., Савицький М. В. Дослідження довговічності залізобетонних понтонів, що експлуатуються на водних об'єктах України. Вісник Підніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2013 №1, 2 С. 64–49
3. Гололобов Б. Д. Парашенко А. О., Голозубов Т. В. Використання дисперсійно-армованого фібробетона при виготовленні кришки люка оглядового колодязя Збірник наукових праць ДонНАБА, 2015, вип. 1, с. 32–36.
4. Носков А. С., Філіпов В. П. Беляков В. А. Використання сучасних хімічних домішок при проектуванні складу конструкційного полістіролбетону. Бетон і залізобетон в Україні, 2005, №4(26), с. 13–21.
5. Алменов Х., Хуррамов А. Ч., Софаров Ш. Ш., Мірзаолімов І. Ф. Порівняльний аналіз методики розрахунку на розкриття тріщин у залізобетонних елементах з радіальним армуванням фіброю. Central Asian Research Journal for Interdisciplinary Studies 2022 Vol.2 (3), 449–455.
6. Приходько А. П., Шпілько Н. В., Ульченко Т. В., Берей Ю. Г. Високоміцний самоущільнювальний бетон. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури, 2012, №2/3, с. 87–94.

7. Сахошко Е. В., Зайченко Н. М. Самоущільнювальний бетон у сучасному монолітному житловому будівництві. Вісник Донбаської державної академії будівництва та архітектури. Макіївка, 2009, вып. 1(75), с. 112–116.
8. Aleksenko V. L., Sharko A. A., Smetankin S. A., Stepanchikov D. M., Yurenin K. Yu. Application of acoustic emission and strain gaugez measurements to processes of diagnostics of strain hardening of epoxy matrix composites. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing* 2019. №3. p. 49–54.
9. Korniejenko K., Kejzlar P., Louda P. The Influence of the Material Structure on the Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Short Fibers Obtained with Additive Technologies. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23 (4), art. no. 2023.
10. Korniejenko K., Łach M., Chou S.-Y., Lin W.-T., Cheng A., Hebdowska-Krupa M., Gadek S., Mikula J. Mechanical properties of short fiber-reinforced geopolymers made by casted and 3D printing methods: A comparative study. *Materials*, 2020, 13 (3), art. no. 57.
11. Akono A. T., Koric S., Kriven W. M. Influence of pore structure on the strength behavior of particle- and fiber-reinforced metakaolin-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 104, art. no. 103361.
12. Akmal J., Badaruddin M., Ismoyo M.K., Yuwono S.D. Optimisation of matrix compositions of Al₂O₃, SiO₂, Caolin, and CaO on the mechanical properties of a geopolymer composite with short carbon fiber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 602 (1), art. no. 012079.
13. Frenette C. D., Beauregard R., Salenikovich A., Derome D. Multi-criteria evaluation of the compositions of walls of light frame wood construction [Évaluation multi-critère descompositions de murs à ossature légère en bois] *Proceedings, Annual Conference – Canadian Society for Civil Engineering*, 2, pp. 909–918.
14. Tang Y., Shu J., Li W., He Y., Yang Y., Sun P. Quantitative Risk Evaluation Model of the Multilevel Complex Structure Hierarchical System in the Petrochemical Industry. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019, art. no. 9328634.
15. Liu G., Han D., Jia Y., Zhao Y. Asphalt mixture skeleton main force chains composition criteria and characteristics evaluation based on discreteelement methods. *Construction and Building Materials*, 2022, 323, art. no. 126313.
16. Kussmaul R., Zogg M., Ermanni P. An optimality criteria-based algorithm for efficient design optimisation of laminated composites using concurrentresizing and scaling. *Structural and Multidisciplinary Optimisation*, 2018, 58 (2), pp. 735–750.
17. Boldyrev A.V., Kozlov D.M., Pavelchuk M.V. Evaluation of Anisogrid Composite Lattice Structures Weight Effectiveness using the Load-carrying Factor. *Procedia Engineering*, 2017, 185, pp. 153–159.
18. Pop C.B., Chifu V.R., Salomie I., Baico R.B., Dinsoreanu M., Copil G. A hybrid firefly-inspired approach for optimal semantic web service composition *Scalable Computing*, 2011, 12 (3), pp. 363–369.
19. Sharko A., Louda P., Nguyen V., Buczkowska K., Stepanchikov D., Ercoli R., Le V. Multicriteria Assessment for Calculating the Optimal Content of Calcium-Rich Fly Ash in Metakaolin-Based Geopolymers. *Ceramics*, 2023, 6(1), 525–537.
20. Le V. S., Sharko A., Sharko O. Stepanchikov D., Buczkowska K., Louda P. Multicriteria optimization of the composition, thermodynamic and strength properties of fly-ash as an additive in metakaolin-based geopolymer composites. *Sci Rep* 14, 10434 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61123-1>

REFERENCES

1. Gorokhov, M. S. (2014). Influence of dispersion reinforcement parameters on the crack resistance of ship structures made of fibre-reinforced concrete. *Bulletin of the State University of Sea and River Fleet named after Adm. S.O. Makarova*, No. 1(23), 68–73.

2. Shekhorkina, S. E., Matyushenko, I. M., Savytskyi, M. V. (2013). Study of the durability of reinforced concrete pontoons operated on water bodies of Ukraine. *Bulletin of the Pidniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture*. №1, 2 P. 64–49.
3. Hololobov, B. D., Parashenko, A. O., Holozubov, T. V. (2015). The use of dispersion-reinforced fiber concrete in the manufacture of the manhole cover of the inspection well *Collection of scientific works DonNABA, issue.1, p. 32–36.*
4. Noskov, A. S., Filipov, V. P., Belyakov, V. A. (2005). The use of modern chemical admixtures in designing the composition of structural polystyrene concrete. *Concrete and reinforced concrete in Ukraine, No. 4(26), p. 13–21.*
5. Almenov, Kh., Khurramov, A. Ch., Sofarov, S. S., Mirzaolimov, I. F. (2022). Comparative analysis of the methodology for calculating the crack opening in reinforced concrete elements with radial fibre reinforcement. *Central Asian Research Journal for Interdisciplinary Studies Vol.2 (3), 449–455.*
6. Prikhodko, A. P., Shpilko, N. V., Ulchenko, T. V., Berehiy. Y. G. (2012). High-strength self-compacting concrete. *Bulletin of the Prydniprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture, No. 2/3, pp. 87–94.*
7. Sakhoshko, E. V., Zaychenko, N. M. (2019). Self-compacting concrete in modern monolithic housing construction. *Bulletin of the Donbas State Academy of Civil Engineering and Architecture. Makiivka, 2009, issue 1(75), pp. 112-116.* V.L. Aleksenko, A.A. Sharko, A.V. Sharko, D.M. Stepanchikov, K.Yu. Yurenin Identification by AE method of structural features of deformation mechanisms at bending. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. – №1. – p. 32–39.*
8. Aleksenko, V. L., Sharko, A. A., Smetankin, S. A., Stepanchikov, D. M., Yurenin, K. Yu. (2019). Application of acoustic emission and strain gaugez measurements to processes of diagnostics of strain hardening of epoxy matrix composites. *Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing. №3. p. 49–54.*
9. Kornijejenko, K., Kejzlar, P., Louda, P. (2022). The Influence of the Material Structure on the Mechanical Properties of Geopolymer Composites Reinforced with Short Fibers Obtained with Additive Technologies. *International Journal of Molecular Sciences, 23 (4), art. no. 2023.*
10. Kornijejenko, K., Łach, M., Chou, S.-Y., Lin, W.-T., Cheng, A., Hebdowska-Krupa, M., Gadek, S., Mikula, J. (2020). Mechanical properties of short fiber-reinforced geopolymers made by casted and 3D printing methods: A comparative study. *Materials, 13 (3), art. no. 57.*
11. Akono, A. T., Koric, S., Kriven, W. M. (2019). Influence of pore structure on the strength behavior of particle- and fiber-reinforced metakaolin-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites, 104, art. no. 103361.*
12. Akmal, J., Badaruddin, M., Ismoyo, M. K., Yuwono, S. D. (2019). Optimisation of matrix compositions of Al₂O₃, SiO₂, Caolin, and CaO on the mechanical properties of a geopolymer composite with short carbon fiber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 602 (1), art. no. 012079.*
13. Frenette, C. D., Beauregard, R., Salenikovich, A., Derome, D. Multi-criteria evaluation of the compositions of walls of light frame wood construction [Évaluation multi-critère des compositions de murs à ossature légère en bois] *Proceedings, Annual Conference – Canadian Society for Civil Engineering, 2, pp. 909–918.*
14. Tang, Y., Shu, J., Li, W., He, Y., Yang, Y., Sun, P. (2019). Quantitative Risk Evaluation Model of the Multilevel Complex Structure Hierarchical System in the Petrochemical Industry. *Mathematical Problems in Engineering, art. no. 9328634.*
15. Liu, G., Han, D., Jia, Y., Zhao, Y. (2022). Asphalt mixture skeleton main force chains composition criteria and characteristics evaluation based on discrete element methods. *Construction and Building Materials, 323, art. no. 126313.*
16. Kussmaul, R., Zogg, M., Ermanni, P. (2018). An optimality criteria-based algorithm for efficient design optimisation of laminated composites using concurrent resizing and scaling. *Structural and Multidisciplinary Optimisation, 58 (2), pp. 735–750.*

17. Boldyrev, A. V., Kozlov, D. M., Pavelchuk, M. V. (2017). Evaluation of Anisogrid Composite Lattice Structures Weight Effectiveness using the Load-carrying Factor. *Procedia Engineering*, 185, pp. 153–159.
18. Pop, C. B., Chifu, V. R., Salomie, I., Baico, R. B., Dinsoreanu, M., Copil, G. (2011). A hybrid firefly-inspired approach for optimal semantic web service composition *Scalable Computing*, 12 (3), pp. 363–369.
19. Sharko, A., Louda, P., Nguyen, V., Buczkowska, K., Stepanchikov, D., Ercoli, R., Le, V. (2023). Multicriteria Assessment for Calculating the Optimal Content of Calcium-Rich Fly Ash in Metakaolin-Based Geopolymers. *Ceramics*, 6(1), 525–537.
20. Le, V. S., Sharko, A., Sharko, O., Stepanchikov, D., Buczkowska, K., Louda, P. (2024). Multicriteria optimization of the composition, thermodynamic and strength properties of fly-ash as an additive in metakaolin-based geopolymer composites. *Sci Rep* 14, 10434. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-61123-1>.

Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A., Yanenko A., Movchan P. APPLICATION OF MULTICRITERIA ANALYSIS IN THE STUDY OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN SHIP REPAIR AND TRANSPORT INFRASTRUCTURE

The subject of research is a system of multi-criteria analysis in the study of thermodynamic processes in ship repair and transport infrastructure in real time. The topic of research is the development of methodology for assessing the composition of the concrete mixture during hardening process. The aim of the work is modeling of physical and technological parameters of concrete mixtures using multi-criteria optimization. The relevance of the research lies in the fact that at the manufacturing stage, depending on the phases of concrete hardening, the parameters of the heat capacity and thermal conductivity of the concrete mixture change. The uniformity of distribution of temperature parameters in the concrete volume also changes. The resulting stresses create microdefects that reduce the strength properties of the concrete mixture. Depending on their composition, strength properties depend on the choice of optimal thermodynamic processes for obtaining concrete mixtures: bending and compressive strength limits, impact strength and density of the material. The novelty of the work lies in the fact that a multi-criteria analysis algorithm has been developed for the study of thermodynamic processes in ship repair. The optimal composition of structural elements of the mixtures for the given technology of their production was determined. The results of the research are the computational basis of the calculations became the digitization of the technology of research and analysis of physical and mechanical properties of concrete mixtures. The field of application is the study of thermodynamic processes used in ship repair and transport infrastructure. The practical significance of the work is that the conducted experiments and calculations showed that the use of research results in combination with optimization criteria is the basis for increasing the reliability of evaluating the parameters of thermodynamic processes and optimizing the strength properties of the concrete mixture, determining the composition and structure of materials for changes in their production technologies. The advantage of the methodology is its scalability and adaptability to workloads.

Key words: multi-criteria analysis; composition; optimisation; thermodynamic processes; ship repair; transport infrastructure.

© Шарко О., Степанчиков Д., Шарко А., Яненко А., Мовчан П.

Статтю прийнято до редакції 06.06.2024

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН
NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING

DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR ENHANCING MARINE ENGINEER READINESS FOR THE OPERATION AND REPAIR OF INJECTORS WITH VISUALIZATION OF THEIR 3D MODELS

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

Hudz A., Student, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, e-mail: artemhudz2001@gmail.com, ORCID: 0009-0004-9688-0168;

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

The problem of enhancing the readiness of marine engineers for the operation and repair of ship technical systems is relevant due to the difficulty of detecting faults and the need for timely diagnostics. The aim of this research is to develop and implement an intelligent system that improves marine engineer readiness by visualizing 3D models of injectors and using fuzzy diagnostic methods. The research includes the formation of a conceptual system description, the creation of a formal-logical structure of injector diagnostic rules based on symptoms, the development of 3D injector models, and decision-support software.

The research employed methods of machine learning, automation, and fuzzy logic to improve diagnostic accuracy. The main functional elements of the system include: data input, where symptoms of injector faults are entered as a set of parameters; rule evaluation, which assesses the input data based on threshold values to determine the severity levels of symptoms; recommendation generation, where the system automatically generates recommendations based on rule evaluation; visualization of membership functions through the construction of graphs for each diagnostic rule; and 3D modeling, which involves creating 3D models of injectors for visualizing damaged components and facilitating the diagnostic process.

Experiments have shown that the developed system reduces the risk of errors and increases the efficiency of injector repairs. Testing demonstrated that the speed of operations in injector repairs increased by 22.5%. The system automatically evaluates symptoms and generates recommendations for the marine engineer, ensuring timely fault detection.

The practical significance of the system lies in its ability to reduce the impact of human factors on the operation of ship technical systems, enhancing overall reliability and safety. The system ensures operational flexibility, allowing the marine engineer to visually identify damaged injector components. The implementation of the intelligent system contributes to reducing the risk of emergency situations and optimizing the repair process.

The theoretical significance lies in the introduction of new approaches to injector diagnostics using machine learning, automation, and 3D visualization. The use of fuzzy logic for symptom evaluation and recommendation generation ensures more accurate and reliable fault detection. The proposed methods can be adapted for diagnosing other components of ship technical systems, opening new prospects for further research.

Bibliography: 33 sources, 5 figures.

Key words: intelligent system; readiness enhancement; automation; injector repair; 3D modeling; machine learning; fault diagnostics; maritime safety; risks; uncertainty.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.134-151

Introduction. The development of means to enhance the readiness of ship crews for the operation of ship technical systems and complexes is an important task that requires control from shipping companies and qualification centers for the training of seafarers [1]. Special attention should be paid to the complexity of feedback during the monitoring of crew actions, particularly marine engineers on the ship during the operation and repair of ship engine components and other power units, considering the human factor [2]. Additionally, the decline in qualification levels, their fragmented heterogeneity considering operational and repair experience, and the influence of fatigue factors can pose problems [3]. Monitoring such manifestations of the human factor – marine engineerin real-time is quite difficult because although crew members may notice deviations in the work of an individual specialist, they cannot help or, moreover, replace them. At the same time,

there are unfortunately many cases where specialists have documentary proof of their qualifications but make mistakes under real conditions [4, 5].

In some cases, researchers actively use automated reinforcement learning methods to optimize the management of digital flow processes in ship networks [6]. Furthermore, during the operation of ship technical systems and complexes, difficulties may arise, particularly when installing ship system bearings, which can significantly reduce lubrication efficiency, leading to wear and failure of the bearings [7]. Installing stern bearings requires special attention due to their sensitivity to vertical and horizontal errors. Implementing intelligent monitoring and correction systems using 3D models can improve service quality and reduce the risk of errors, enhancing the overall readiness of marine engineers for the operation and repair of ship systems.

Problems arising from human errors and electrical failures have shown that a significant portion of accidents is associated with the human factor [8]. The use of the SHELL method to assess human error in the ship's power supply system revealed that non-compliance with standard operating procedures (SOP) and lack of proper experience lead to failures in the electrical system, accounting for 12.7% and 17.2%, respectively. Moreover, the implementation of condition monitoring and fault diagnosis (CMFD) technologies can significantly increase the reliability and safety of ship systems, reducing the impact of the human factor [9]. Current fault detection and diagnosis methods are often outdated and rely on manual inspections and regular maintenance, which can be subjective and inaccurate.

Thus, the development and implementation of intelligent monitoring systems that use machine learning algorithms and big data allow real-time assessment of equipment condition, prediction of potential faults, and optimization of operational parameters. This is particularly important for ensuring the stable operation of the crew and extending the service life of ship technical systems.

Problem Statement. Many researches have shown a positive trend in both the application and development of new intelligent systems and tools aimed at improving operational quality, reducing risks, and ensuring the safety of ship technical systems and the vessel as a whole. For example, in the research [10], the importance of monitoring the technical condition of materials of metal structures according to international standards to ensure the reliability of marine equipment is highlighted. The authors propose an innovative diagnostic system for ship power plant turbochargers based on Markov chains, which replaces discrete time intervals of diagnostics with a sequence of states of technical objects. This allows for consideration of various operational factors and enhances equipment reliability under harsh operating conditions. The practical significance of the methodology is confirmed by the results of data digitization, calculation of transition matrices, and construction of an orgraph for studying the kinetics of damage in real-time. However, there is a lack of detailed information on the application of the methodology in specific diagnostic tasks, making the research relevant and promising but requiring additional details for a fuller understanding.

In another research [11], the main methods include the integration of machine and deep learning for automatic extraction of key fault features, early warning, and precise identification of potential faults. Using advanced big data processing technologies such as stream computing and distributed storage, the system significantly improves the accuracy and speed of diagnostics. The combination of neural networks with genetic search algorithms ensures higher efficiency in fault detection and prediction in real-time, which is confirmed by experimental results where the BP-GA model showed the best results in accuracy, precision, and F1 score. However, although the article demonstrates significant potential in improving diagnostics and reducing costs, it lacks details on specific methods and their application, limiting the understanding of the full value of the proposed methodology.

Other researchers in their work [12] have improved the traditional genetic algorithm by adding an interpolation test function to avoid obstacle crossing and introducing a concentration value to evaluate the probability of individuals transitioning to the next generation. The A* algorithm is used to search for sub-paths during crossover and mutation, significantly enhancing

problem-solving efficiency. In simulation experiments, the improved A*-genetic algorithm showed better results in six indicators, including pipeline length, number of bends, energy value, fitness value, number of optimal solutions, and average number of iterations to convergence, compared to other algorithms. Thus, the proposed algorithm provides higher quality of pipeline layout and problem-solving efficiency. However, the lack of real-life application examples limits the understanding of its practical value, and the complexity of the algorithm may require significant computational resources.

Additionally, developments are underway regarding the use of artificial intelligence technologies for vulnerability analysis in information management intrusions [13]. The proposed AFL-VA-ISN (Adaptive Fuzzy Logic-assisted Vulnerability Analysis of Intelligent Ship Networks) model combines fuzzy logic and artificial intelligence for effective management of uncertainty and fuzziness in intelligent ship networks. The model uses multi-sensor nodes to assess data on malicious attacks and self-executing protective nodes to prevent attacks. Experimental results showed that the model increases data transmission speed by 99.2%, attack detection rate by 98.5%, risk assessment rate by 97.5%, and access control rate by 96.3%, while reducing network latency by 11.4% compared to existing models. However, for more guaranteed results when applying this approach, additional research is needed to optimize the system and adapt it to different real-time usage scenarios.

Researchers in their work [14] also conceptually identified the necessary intelligent functions for inland vessels by 2030, 2035, and 2050, focusing on artificial intelligence technologies, the Internet of Things, cloud computing, and big data to enhance safety, reliability, and energy efficiency. The main methods include sensors for data collection, communication technologies for information exchange, and evaluation and decision-making technologies for navigation, energy efficiency management, and vessel maintenance. Although the lack of practical examples and implementation complexity may limit technology adoption, the proposed approaches provide clear guidelines for the development of intelligent vessels and improved energy efficiency management.

Another research examines a wide range of intelligent tools that will enhance the operational level of the engine room [15]. Specifically, it describes the use of intelligent engine room systems on ships, including artificial intelligence technologies such as neural networks, support vector machines, and genetic algorithms for fault diagnostics and equipment condition monitoring. The use of big data, cloud computing, and industrial Internet increases the efficiency and safety of engine room operations, although existing automation systems remain closed and isolated, limiting their integration and real-time data exchange. Despite theoretical advantages, the lack of practical examples and implementation complexity raise doubts about the effectiveness and feasibility of widespread application of the proposed technologies.

Thus, the productivity of approaches to creating intelligent tools should also be considered. In the research [16], the development of a database for an intelligent ship management system using MySQL and distributed software MYCAT is described to ensure high performance and management flexibility. The main methods include data flow analysis, database structuring, and table design for storing information about the ship, user management, equipment, and signaling points, ensuring system stability and reliability. Although the proposed architecture is effective, it requires further optimization to handle highly competitive events and adaptation to real usage conditions, particularly in the engine room.

The approaches discussed in the section and their critical analysis indicate the necessity and importance of both developing and applying intelligent systems for ship process management, ensuring safety, improving operational efficiency, and diagnosing faults in the engine room. The current situation requires more flexible human-machine interaction systems when using intelligent decision support systems for the marine engineer, which will enhance their operational readiness, especially under conditions of implicit fault detection. One of the means to improve adaptive feedback between the operator-marine engineer and the intelligent system could be higher-quality 3D visualization of parts that require maintenance and repair, their components, and elements of

fuzzy determination using appropriate methods. All the above requires the development of separate diagnostic modules for individual elements of ship technical systems and complexes, which process symptoms and obtain the most effective operational solutions using fuzzy conclusions.

Research Purpose and Objectives. The aim of this research is to enhance the operational readiness level of the engine room crew by developing and applying an intelligent decision support system for marine engineers, accompanied by 3D visualization of parts, using the example of injector repair. To achieve this goal, a series of sequential tasks must be addressed, namely:

1. Formulate a conceptual description of the intelligent decision support system for marine engineers.
2. Describe the formal-logical structure of rules for identifying injector faults based on symptoms.
3. Develop a 3D measurable model of the injector to improve the visualization of faults in its components.
4. Develop a software tool with inference functions to support the decision-making process of the marine engineer-operator.

Primary Research Material. To address *the first task* of the research, a description of the intelligent decision support system for marine engineers during the operation of the ship's engine in relation to injector replacement and repair was formulated. Structurally, the system comprises the following component blocks:

1. Data input - (input data on symptoms).

Symptoms: power_loss, rpm_fluctuation, acceleration_delay, fuel_leakage, pressure_drop, fuel_smell, corrosion_level, fuel_consumption_increase, startup_delay, visible_cracks, black_smoke, misfire_frequency, oil_consumption_increase, deposits, vibrations, white_smoke.

2. Rule evaluation (Rules 1–15)

Each rule (from evaluate_rule_1 to evaluate_rule_15) has its inputs (specific symptoms) and outputs (severity levels and recommendations).

– Rule 1:

Input: power_loss, rpm_fluctuation, acceleration_delay

Output: severity levels of symptoms, recommendation

– Rule 2:

Input: fuel_leakage, pressure_drop, fuel_smell

Output: severity levels of symptoms, recommendation

And so on for each rule from 1 to 15.

3. Recommendation determination
4. Combining rule results and determining best match
5. Visualization of membership functions
6. Plotting membership function graphs for each rule

To facilitate the most favorable understanding of the system's operation, a graphical diagram of the system was constructed (Figure 1).

To accomplish the second task, relevant literature was analyzed, providing a formal-logical framework for defining and refining rules that allow the identification of injector faults in real-time.

Rule 1: Nozzle Valve Clogging

If there is a decrease in engine power, uneven engine operation, or loss of power during acceleration, this may be due to nozzle valve clogging [17, 18].

Solution: Cleaning or replacing the nozzle

Symptoms: Decrease in engine power, uneven engine operation, loss of power during acceleration.

Equation for Mass Flow Rate (1)

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

Q – mass flow rate (kg/s)
 C_d – discharge coefficient
 A – cross-sectional area (m²)
 ΔP – pressure difference (Pa)
 ρ – fluid density (kg/m³)

Purpose: This formula is used to determine the mass flow rate through the nozzle. It helps to establish whether there is nozzle clogging, which may cause a decrease in engine power and other symptoms.

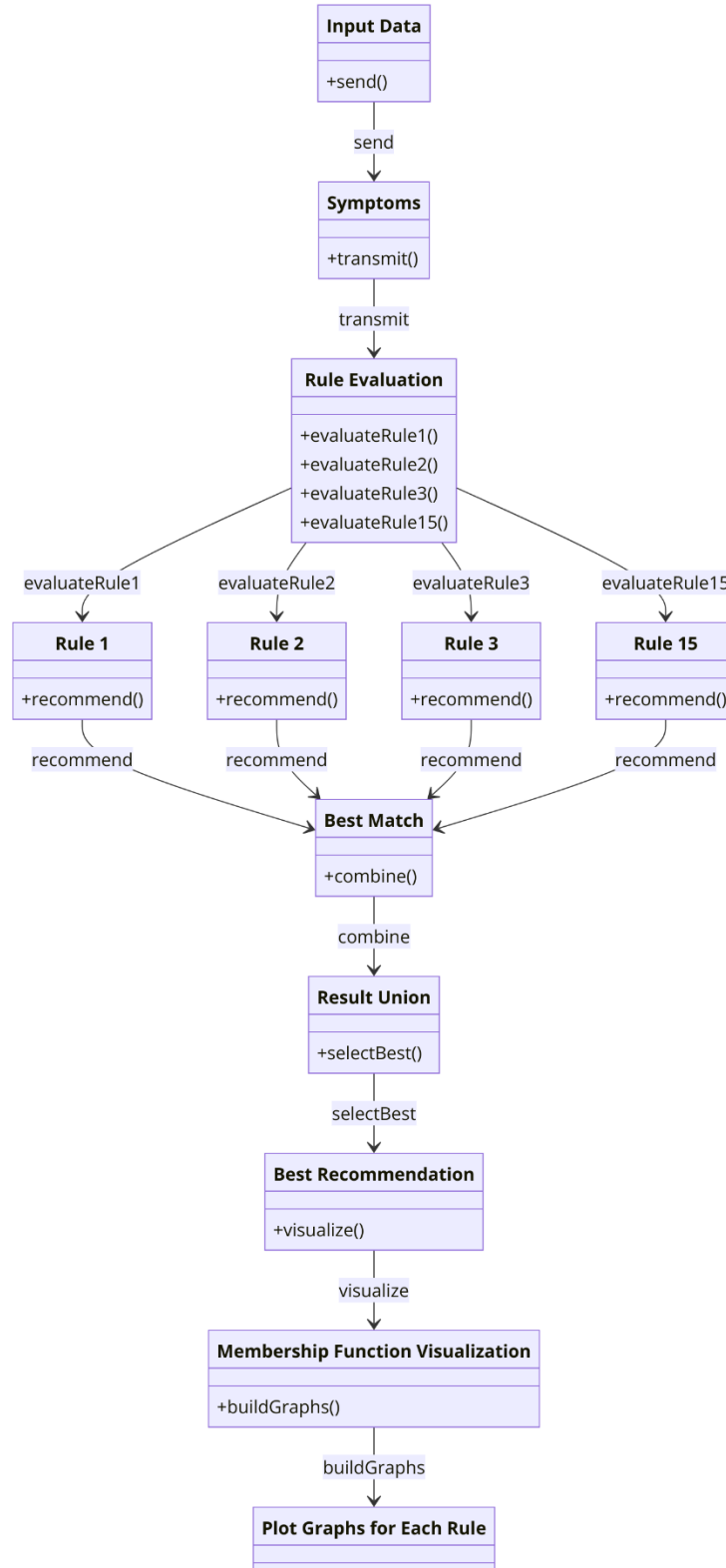


Figure 1 – Structural-Logical Diagram of the System's Functionality

Fuel Flow Rate (2)

$$Q = k \cdot \Delta P \quad (2)$$

Q – fuel flow rate
 ΔP – pressure drop
 k – discharge coefficient

Purpose: This formula allows the determination of fuel flow rate through the pressure drop. It helps to assess the efficiency of the nozzle operation and detect potential clogging.

Evaporation Constant (3)

$$b_{ev} = Y \cdot \frac{p_c}{d^2} \quad (3)$$

b_{ev} – evaporation constant
 Y – correction factor
 p_c – final pressure of the compression process
 d – average diameter of fuel droplets

Purpose: This formula is used to assess the evaporation of fuel, which helps to determine the efficiency of the combustion process in case of a clogged nozzle.

Rule 2: Seal Wear (Nozzle Cap Nut, Cap Nut) [19]

Symptoms: Fuel leakage, pressure drop in the fuel system, fuel smell in the cabin.

Solution: Seal replacement.

Leakage Flow Rate (1)

Purpose: Used to determine the leakage flow rate through the seals. It helps identify worn seals that may lead to fuel leakage.

Fuel Leakage (4)

$$L = \frac{Q}{A \cdot 2g \cdot h} \quad (4)$$

L – fuel leakage
 Q – fuel flow rate
 A – cross-sectional area
 g – acceleration due to gravity
 h – height of the fuel level

Purpose: Helps determine the amount of fuel lost through leakage. This is important for assessing the effectiveness of the seals.

Fuel Evaporation Correction (5)

$$Y = \left(\frac{1000}{n_{crank}} \right)^{m_Y} \quad (5)$$

Y – correction coefficient
 n_{crank} – crankshaft rotational frequency
 m_Y – exponent of the evaporation correction function (0.65–1.00)

Purpose: Used to correct the fuel evaporation process, which helps assess the quality of the sealing and the impact of its wear.

Rule 3: Nozzle Corrosion (Nozzle Body) [20]

Symptoms: Corrosion on the nozzle, increased fuel consumption, difficulty starting the engine.

Solution: Cleaning the nozzle, using high-quality fuel.

Corrosion Rate (6)

$$\dot{m}_{corrosion} = k \cdot A_{corrosion} \quad (6)$$

\dot{m} – швидкість корозії (кг/с)
 k – корозійний коефіцієнт
 $A_{corrosion}$ – площа корозії (м²)

Purpose: Used to determine the corrosion rate on the nozzle. It helps assess the extent of corrosion and the need for cleaning or replacing the nozzle.

Corrosion Stress (7)

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (7)$$

σ_c – corrosion stress

F – force due to corrosion impact

A – surface area of the nozzle

Purpose: Helps evaluate the mechanical impact of corrosion on the nozzle, which can lead to damage.

Pressure Before and After Seal (8)

$$\Delta P_{seal} = P_{before} - P_{after} \quad (8)$$

ΔP_{seal} – pressure difference before and after the seal

P_{before} – pressure before the seal

P_{after} – pressure after the seal

Purpose: Used to assess the pressure difference before and after the seal, which can be an indicator of corrosion or wear.

Rule 4: Incorrect Nozzle Calibration (Valve Spring) [21, 22]

Symptoms: Increased fuel consumption, uneven engine idling, black smoke from the exhaust pipe.

Solution: Nozzle calibration.

Injection Pressure (9)

$$P_{inj} = \frac{m_{fuel} \cdot R \cdot T_{fuel}}{V_{chamber}} \quad (9)$$

P_{inj} – injection pressure

m_{fuel} – mass of fuel

R – gas constant

T_{fuel} – fuel temperature

$V_{chamber}$ – combustion chamber volume

Purpose: Used to determine the injection pressure. It helps identify incorrect nozzle calibration that affects combustion efficiency.

Ignition Delay Time (10)

$$\tau_i = B_0 (1 - k_n n_{crank}) \frac{P_{cyl.in.start} T_{cyl.in.start} e^{E_a / RT_{cyl.in.start}}}{(25 + CN) / 70} \quad (10)$$

τ_i – ignition delay time

B_0 – coefficient

k_n – coefficient

n_{crank} – crankshaft rotational frequency

$P_{cyl.in.start}$ – pressure at the start of compression

$T_{cyl.in.start}$ – temperature at the start of compression

E_a – activation energy

R – universal gas constant

CN – cetane number of the fuel

Purpose: Helps determine the ignition delay time, which may be influenced by incorrect nozzle calibration.

Rule 5: Mechanical Damage to Nozzle (Nozzle Body, Spindle) [23]

Symptoms: Fuel leakage, visible cracks on the nozzle body, constant pressure drop in the fuel system.

Solution: Nozzle replacement.

Leakage Flow Rate (1)

Purpose: Used to determine the leakage flow rate through cracks. It helps identify mechanical damage to the nozzle.

Mechanical Stress (11)

$$\sigma_m = \frac{K \cdot P_{fuel}}{A} \quad (11)$$

σ_m – mechanical stress

K – impact coefficient

P_{fuel} – fuel pressure

A – crack area

Purpose: Helps evaluate the mechanical stress on the nozzle due to fuel pressure, which can lead to cracks.

Impact Stress (12)

$$\sigma_b = \frac{F_{impact}}{A_{crack}} \quad (12)$$

σ_b – impact stress

F_{impact} – impact force

A_{crack} – crack area

Purpose: Used to assess the stress arising from impacts, which can cause mechanical damage to the nozzle.

Rule 6: Clogged Injector Filters (Fuel Inlet) [24, 18]

Symptoms: Uneven engine operation, white smoke from the exhaust pipe, difficulty starting the engine in cold conditions.

Solution: Cleaning or replacing the filters.

Equation for Mass Flow Rate (1)

Purpose: Used to determine the mass flow rate through the filter. It helps identify clogged filters.

Filter Resistance (13)

$$R_{filter} = \frac{\Delta P}{Q} \quad (13)$$

ΔP – pressure drop across the filter

Q – fuel flow rate

Purpose: Helps evaluate the filter resistance, which can indicate clogging.

NO Concentration (14)

$$[NO] = K_1 [O][N_2] \quad (14)$$

$[NO]$ – NO concentration

K_1 – reaction constant

$[O]$ – oxygen concentration

$[N_2]$ – nitrogen concentration

Purpose: Used to assess the NO concentration, which helps evaluate the combustion quality of the fuel with clogged filters.

Rule 7: Damage to Connecting Elements (Lock Nut, Spring Cap Nut) [25]

Symptoms: Fuel leakage, corrosion on joints, fuel smell around the engine.

Solution: Replacement of connecting elements.

Shear Stress (15)

$$\tau = \frac{F_{tight}}{A_{joint}} \quad (15)$$

τ – shear stress

F_{tight} – tightening force

A_{joint} – joint area

Purpose: Used to evaluate the shear stress in the connecting elements. It helps identify damage that can lead to fuel leakage.

Correlation and Sensitivity Coefficient (16)

$$v = \frac{m_0 m_4}{m_2^2} \quad (16)$$

v – correlation and sensitivity coefficient

m_0, m_2, m_4 – spectral moments

Purpose: Helps evaluate the correlation and sensitivity of the system to damage in the connecting elements.

Multivariate Correlation Model (17)

$$H(x_1, x_2, \dots, x_k) = \phi_{0,0,\dots,0} + \sum_{i=1}^k \phi_{i,0,\dots,0} x_i + \sum_{i=1}^k \phi_{i,j,0,\dots,0} x_i x_j + \dots + \phi_{r,0,\dots,0} x_i^r \quad (17)$$

$H(x_1, x_2, \dots, x_k)$ – overall multivariate model

x_i – variables

k – number of variables

r – model order

ϕ – model coefficients

Purpose: Used to assess the relationships between different system parameters, which helps identify problems in the connecting elements.

Rule 8: Wear of the Spring Inside the Injector (Valve Spring) [26]

Symptoms: Increased fuel consumption, loss of power at high RPM, black smoke from the exhaust pipe.

Solution: Spring replacement.

Spring Stiffness (18)

$$k_s = \frac{F}{\Delta x} \quad (18)$$

k_s – spring stiffness

F – force

Δx – spring deformation

Purpose: Used to determine the stiffness of the spring. It helps identify spring wear, which affects the efficiency of fuel injection.

Gas Linear Velocity (19)

$$w = \mu \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} \quad (19)$$

w – gas linear velocity

μ – discharge coefficient

p_1 – pressure before the valve

p_2 – pressure after the valve

ρ – gas density

Purpose: Used to determine the linear velocity of the gas, which helps evaluate the efficiency of the spring's operation.

Period of Angular Velocity Oscillation (20)

$$T = \frac{N_{cyl}}{n} \quad (20)$$

T – period of oscillations (s)

N_{cyl} – number of engine cylinders

n – crankshaft rotational frequency (revolutions per second)

Purpose: Used to evaluate the period of angular velocity oscillations of the crankshaft, which may be influenced by a worn spring.

Rule 9: Wear of the Injector Valve (Nozzle Valve) [27, 28]

Symptoms: Uneven engine operation, black smoke from the exhaust pipe, frequent misfires.

Solution: Valve replacement.

Valve Flow Coefficient (21)

$$C_v = \frac{Q}{\sqrt{\Delta P / \rho}} \quad (21)$$

C_v – valve flow coefficient

Q – flow rate

ΔP – pressure drop across the valve

ρ – fuel density

Purpose: Used to evaluate the flow rate through the valve. It helps identify valve wear, which affects the uniformity of engine operation.

Root Mean Square Error (22)

$$\sigma_s = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (a_i - a_{aver})^2 \quad (22)$$

σ_s – root mean square error

n – number of measurements

a_i – value of the diagnostic parameter

a_{aver} – average value of the parameter

Purpose: Used to evaluate the accuracy of measurements, which helps identify problems with the valve.

Rule 10: Damage to the Nozzle Body (Nozzle Body) [23–25]

Symptoms: Fuel leakage, increased oil consumption, black smoke from the exhaust pipe.

Solution: Nozzle replacement.

Leakage Flow Rate (1)

Purpose: Used to determine the leakage flow rate through cracks. It helps identify damage to the nozzle body.

Mechanical Ship Dynamics (23)

$$m_{ship} \frac{dv_{ship}}{d\tau} = (1-t)T_{prop} - R_{ship} \quad (23)$$

m_{ship} – ship displacement (kg)

v_{ship} – ship speed (m/s)

τ – dynamic time (s)

T_{prop} – propeller torque (N·m)

R_{ship} – hull resistance (N)

Purpose: Used to evaluate the ship's dynamics and intensity, which can impact the damage to the nozzle body.

Vibroacoustic Signals (24)

$$a_p(\theta, \tau) = O[a_o(\theta, \tau)] = O[g_o(F, E_s, Z, Y), \tau] \quad (24)$$

$a_p(\theta, \tau)$ – vibroacoustic signals

$a_o(\theta, \tau)$ – output signal

$g_o(F, E_s, Z, Y)$ – signal generation function

F – force

E_s – energy

Z – resistance

Y – mechanical properties of the material

Purpose: Used to analyze vibroacoustic signals, which helps identify issues with the nozzle body.

Rule 11: Corrosion of the Injector from Aggressive Environment (Nozzle Body) [29]

Symptoms: Corrosion on the nozzle, difficulty starting the engine, power loss under increased loads.

Solution: Cleaning the nozzle, checking operating conditions.

Corrosion Rate (6)

Purpose: Used to determine the corrosion rate on the nozzle. It helps assess the extent of corrosion and the need for cleaning or replacing the nozzle.

Mass Loss Due to Corrosion (25)

$$k_c = \frac{M_{loss}}{t} \quad (25)$$

Purpose: Helps evaluate the mass loss due to corrosion, which can affect the efficiency of the nozzle's operation.

Rule 12: Incorrect Pressure in the Fuel System (Fuel Inlet) [30]

Symptoms: Increased fuel consumption, unstable engine operation when shifting gears, black smoke from the exhaust pipe.

Solution: Adjusting the pressure in the fuel system.

System Pressure (26)

$$P_{system} = P_{set} + \Delta P_{loss} \quad (26)$$

P_{system} – system pressure

P_{set} – set pressure

ΔP_{loss} – pressure losses

Purpose: Used to evaluate the pressure in the system. It helps identify incorrect pressure in the fuel system.

Indicated Thermal Efficiency (27)

$$ITE = \frac{W_c}{Q_{in}} \quad (27)$$

ITE – indicated thermal efficiency

W_c – indicated work

Q_{in} – heat input

Purpose: Used to assess the combustion efficiency under incorrect pressure in the fuel system.

Rule 13: Use of Low-Quality Fuel (Fuel Inlet, Nozzle Valve) [31]

Symptoms: Increased fuel consumption, uneven engine operation, black smoke from the exhaust pipe.

Solution: Use of high-quality fuel.

Combustion Efficiency (28)

$$\eta_f = \frac{Q_{combustion}}{Q_{fuel}} \quad (28)$$

η_f – combustion efficiency

$Q_{combustion}$ – amount of heat obtained from combustion

Q_{fuel} – amount of heat contained in the fuel

Purpose: Used to evaluate the combustion efficiency of the fuel. It helps identify the use of low-quality fuel.

CO Concentration (29)

$$\frac{d[CO]}{d\tau} = K_1 C[CO][OH] \quad (29)$$

$\frac{d[CO]}{d\tau}$ – rate of change in CO concentration over time

K_1 – reaction constant

C – CO concentration

$[OH]$ – concentration of hydroxyl groups

Purpose: Used to evaluate the kinetics of reactions affecting CO concentration when using low-quality fuel.

Rule 14: Clogging of Fuel Supply Channels (Fuel Inlet, Spindle) [32]

Symptoms: Uneven engine operation, idling vibrations, white smoke from the exhaust pipe.

Solution: Cleaning the fuel supply channels.

Equation for Mass Flow Rate (1)

Purpose: Used to determine the mass flow rate through the channels. It helps identify clogging in the fuel supply channels.

Rule 15: Improper Storage or Transportation of the Nozzle (Nozzle Body) [33]

Symptoms: Corrosion on the nozzle, fuel leakage, power loss at high RPM.

Solution: Nozzle replacement, adherence to storage rules.

Transport Stress (30)

$$\sigma_h = \frac{F_{transport}}{A_{surface}} \quad (30)$$

σ_h – transport stress

$F_{transport}$ – transport force

$A_{surface}$ – surface area

Purpose: Used to evaluate the stress during transportation, which can cause corrosion or damage to the nozzle.

The next task, *the third one*, is the development of a 3D measurable model of the nozzle to enhance the visualization of faults in its components. For this purpose, a drawing of the nozzle was created, followed by a step-by-step construction of its three-dimensional model. This model will enable the marine engineer to quickly navigate during the operation of the program, which will indicate specific elements of the nozzle for replacement or repair (Figure 2).

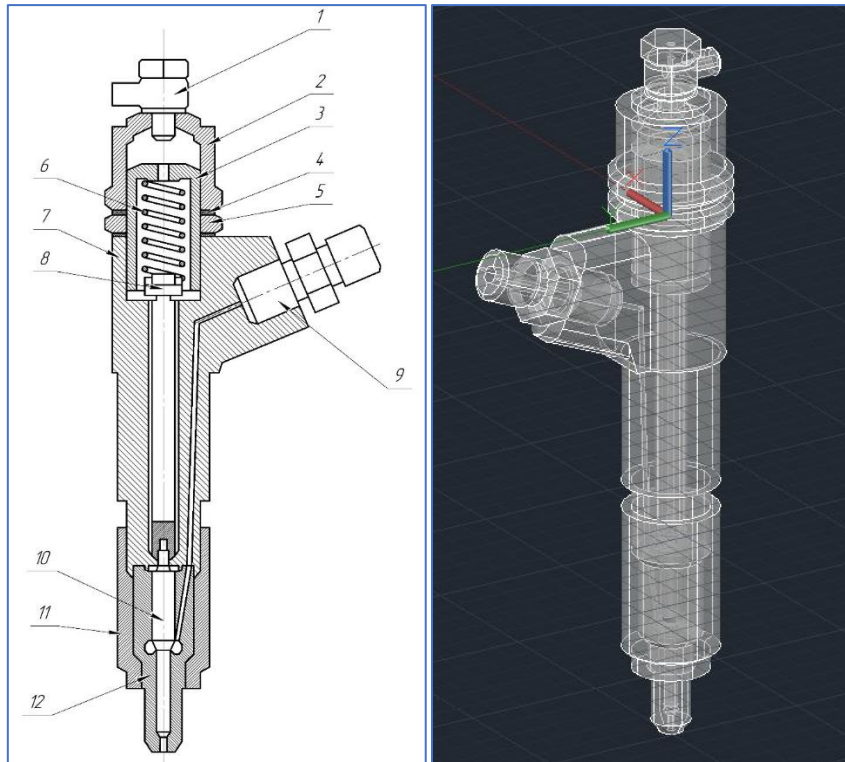


Figure 2 – 3D Modeling of the Nozzle as an Assembly Unit

The *fourth task* of the research involved the development of a specialized software tool with inference functionality to support the marine engineer-operator's decision-making process. To create this system, whose primary function is automated expert assessment and the generation of appropriate advice, the Anaconda programming environment and the Python programming language were used.

Main functional elements of the system:

1. Object Initialization (init method): The init method accepts input data in the form of a dictionary and stores it as object attributes.
2. Symptom Evaluation (evaluate_rule_X methods): Each evaluate_rule_X method evaluates a specific diagnostic rule (from 1 to 15). The input data is checked against various threshold values to determine the severity of symptoms (minor, moderate, significant, critical). The method returns the evaluation results and a match score.
3. Evaluate_all Method: This method calls all rule evaluation methods (evaluate_rule_1 ... evaluate_rule_15) and collects the results into a dictionary. It also collects match scores for each rule.
4. Determine_best_match Method: This method analyzes the match scores and determines the rule with the highest match score as the best match.
5. Plot_membership_functions Method: This method plots the membership functions for all diagnostic rules (Figure 3). It uses the matplotlib library for visualization.

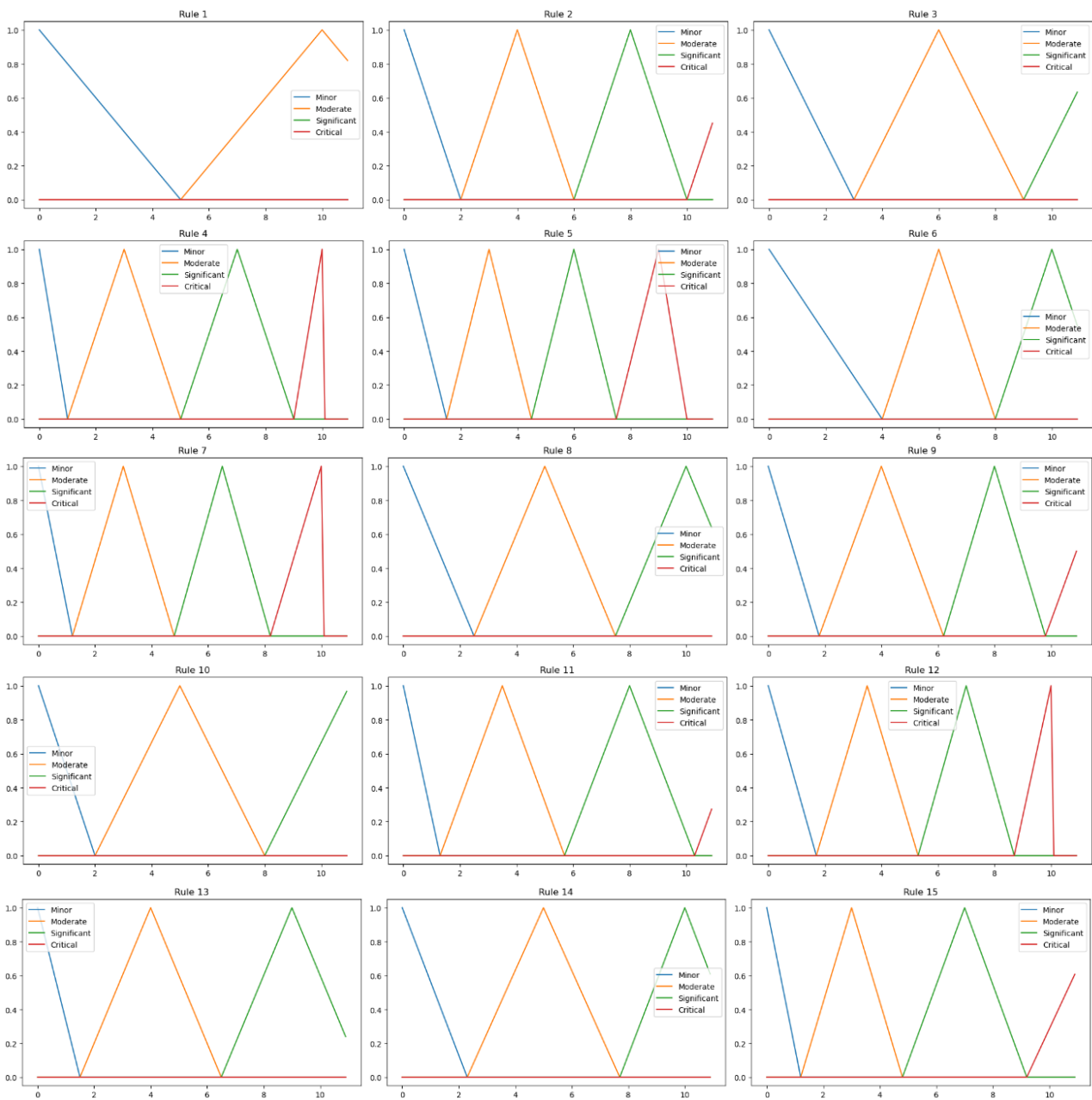


Figure 3 – Visualization of Membership Functions

Obtaining Membership Functions (get_membership_functions method): Returns the membership functions for a specific diagnostic rule based on triangular membership functions. As a result of testing the program, 5 situations were analyzed, and the corresponding results were obtained in the form of membership function graphs, for example (Figure 4).

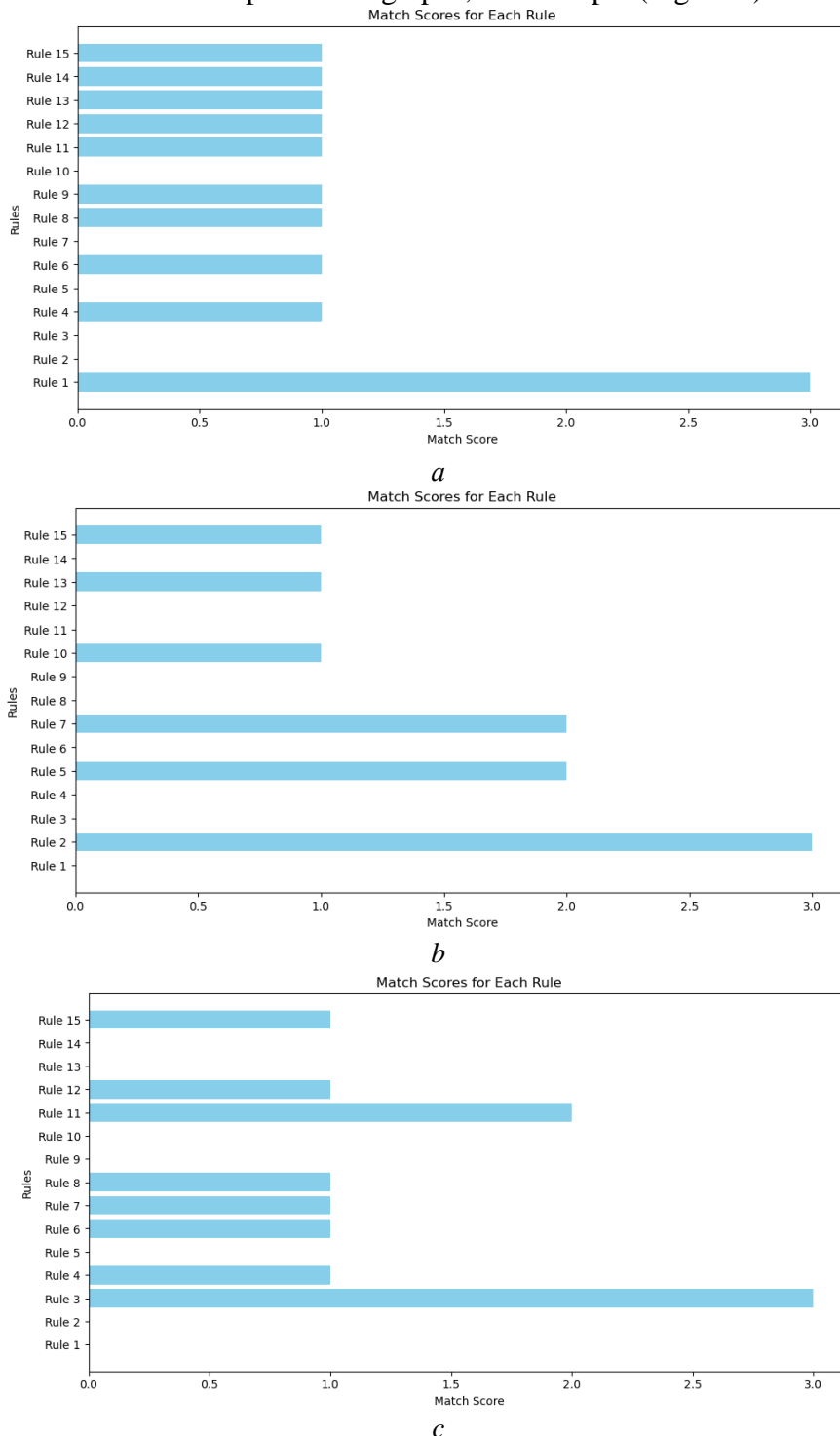


Figure 4 – Visualization of Membership for Situations No. 1, 2, 3 with Input Parameters
 data_samples = [{'power_loss': 10, 'rpm_fluctuation': 3, 'acceleration_delay': 1.0},
 {'fuel_leakage': 1.5, 'pressure_drop': 10, 'fuel_smell': 2},
 {'corrosion_level': 2, 'fuel_consumption_increase': 12, 'startup_delay': 4},]
 Additionally, the program provides recommendations in the form of visual advice.
 For Situation No. 1, the applicable rule is (Figure 5a): Nozzle replacement.
 For Situation No. 2, the most effective advice is: Complete seal replacement (Figure 5b).
 For Situation No. 3: Injector replacement (Figure 5c).

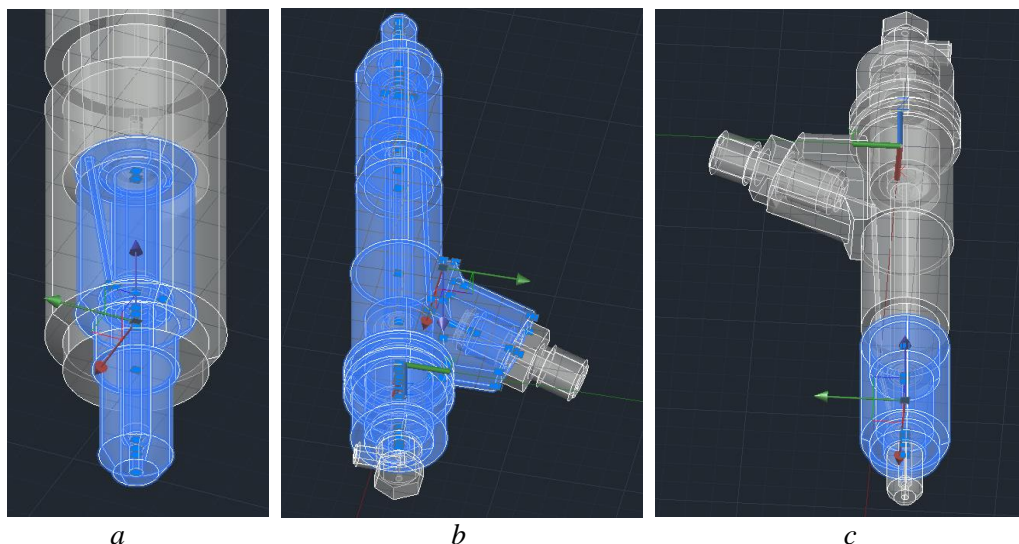


Figure 5 – Visualizations of Damaged Nozzle Elements Requiring Replacement

The proposed approach will allow for quick operations in the maintenance and repair of injectors, as it enables the marine engineer to promptly identify the corresponding damaged elements and parts that require replacement or repair.

Conclusion. The research objective of developing an intelligent system to enhance the marine engineer's readiness for the operation and repair of injectors has been achieved through a series of tasks that ensured the implementation of a comprehensive approach:

1. A conceptual structure of the intelligent system was developed, which includes several key components such as data input, symptom evaluation, recommendation determination, and visualization of membership functions. This allows for a comprehensive approach to diagnostics. In terms of implementation, a user interface has been provided, ensuring ease of use for marine engineers.

2. A formal-logical structure of rules for diagnosing injector faults was described. For example, symptoms such as power loss, uneven engine operation, and fuel leakage are classified by severity levels. Each of the 15 rules evaluates symptoms based on specified threshold values. If a symptom meets certain criteria, the system generates the corresponding severity level and recommendation.

3. 3D models of the injector were designed, allowing the marine engineer to visually locate damaged components. This significantly improves diagnostic accuracy and fault identification because the 3D model enables the user to interact with different parts of the injector, facilitating the learning and diagnostic process.

4. A software tool with a fuzzy inference function was developed to support the marine engineer-operator's decision-making process. The Python-based software tool automatically evaluates symptoms and generates recommendations. Additionally, membership functions for each diagnostic rule were visualized, making the results easier to understand and allowing developers to improve and flexibly adjust the system.

Overall, testing of the developed system showed that the speed of operationalization during injector repair increased by 22.5%, significantly improving the maintenance processes and enhancing their overall safety and reliability.

Prospects for further research. Despite the fact that the developed system improves the accuracy of diagnosing and identifying injector faults by reducing the impact of the marine engineer human factor on the operation and repair of ship technical systems, future tasks should focus on its enhancement, namely:

- Improve the effectiveness of marine engineer training through visualization and intelligent support by adding dynamic display functions of repair processes and virtual augmented reality tools.
- Optimize the system for real-time operation, ensuring timely detection and elimination of faults.

- Expand the system's functionality to diagnose other components of ship technical systems.
- Explore possibilities for integration with other monitoring and ship management systems, which will allow for the creation of a comprehensive decision support system for the entire ship crew.

REFERENCES

1. 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>.
2. Nosov, P. S. (2023). Systemic approaches to rational management of functional marine technical systems and complexes // Журналу "Водний транспорт. Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій". No 2(38). С. 80–95. <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.09>.
3. Nosov, P., Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Y., Gritsuk, I., Sokol, I., Kyrychenko, K. (2023). Devising an approach to safety management of vessel control through the identification of navigator's state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (3 (124)), 19–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286156>.
4. Nosov, P., Zinchenko, S., Plokhikh, V., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Makarchuk, D., Mamenko, P., Moiseienko, V., & Ben, A. (2021). Development and experimental study of analyzer to enhance maritime safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(112), 27–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239093>.
5. Weng, Jinxian & Yang, Dong & Chai, Tian & Fu, Shanshan. (2019). Investigation of occurrence likelihood of human errors in shipping operations. *Ocean Engineering*. 182. 28–37. [10.1016/j.oceaneng.2019.04.083](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.04.083).
6. Yang, Xinduoji & Liu, Minghui & Wang, Xinxin & Hu, Bingyu & Liu, Meng & Wang, Xiaomin. (2024). Ship Network Traffic Engineering Based on Reinforcement Learning. *Electronics*. 13. 1710. [10.3390/electronics13091710](https://doi.org/10.3390/electronics13091710).
7. Yang, Taiwei & Zhu, Hanhua & Fan, Shidong & Wu, Jie & Yuan, Junlang & Zheng, Liangyan. (2023). Research on Lubrication Characteristics of Ship Stern Bearings Considering Bearing Installation Errors. *Lubricants*. 11. 478. [10.3390/lubricants11110478](https://doi.org/10.3390/lubricants11110478).
8. Saragih, Jasman & Hasibuan, Arnawan & Engineering, Electrical & , Suwarno. (2020). Analysis of Damage to Ship MT. Delta Victory due to Human Error and Electricity with the Shel Method. *ELTICOM*50775.2020.9230475. [10.1109/ELTICOM50775.2020.9230475](https://doi.org/10.1109/ELTICOM50775.2020.9230475).
9. Yu, Cairui. (2023). Exploring the Current Status and Development of Condition Monitoring and Fault Diagnosis for Power Machinery of Engineering Ships. *Applied Science and Innovative Research*. 7. p62. [10.22158/asir.v7n3p62](https://doi.org/10.22158/asir.v7n3p62).
10. Sharko, Oleksandr & Yanenko, Artem. (2023). MODELING OF INTELIGENT SOFTWARE FOR THE DIAGNOSIS AND MONITORING OF SHIP POWER PLANT COMPONENTS USING MARKOV CHAINS. *Science-based technologies*. 59. 251–261. [10.18372/2310-5461.59.17946](https://doi.org/10.18372/2310-5461.59.17946).
11. Wang, Ning & Hou, Xiaojun & Ma, Jikun & Yuan, Bingbing & Xin, Fuyan. (2024). Research on Big Data Intelligent System for Fault Diagnosis of Computer Aided Ship Power System. *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*. 8. 65–69. [10.54097/11sgn708](https://doi.org/10.54097/11sgn708).
12. Wei, Zhiguo & Wu, Jun & Li, Zhe & Cheng, Shangfang & Yan, Xiaojiang & Wang, Shunsen. (2024). The Intelligent Layout of the Ship Piping System Based on the Optimization Algorithm. *Applied Sciences*. 14. 2694. [10.3390/app14072694](https://doi.org/10.3390/app14072694).
13. Lan, Dan & Xu, Peilong & Nong, Jia & Song, Junkang & Zhao, Jie. (2024). Application of Artificial Intelligence Technology in Vulnerability Analysis of Intelligent Ship Network. *International Journal of Computational Intelligence Systems*. 17. [10.1007/s44196-024-00539-z](https://doi.org/10.1007/s44196-024-00539-z).

14. Hao, Guozhu & Xiao, Wenhui & Huang, Liwen & Chen, Jiahao & Zhang, Ke & Chen, Yaojie. (2024). The Analysis of Intelligent Functions Required for Inland Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*. 12. 836. 10.3390/jmse12050836.
15. Zhang, Jiale & Jiang, Jiawei & Zhang, Sijie & Zhang, Peng & Dong, Junwei & Sun, Ze. (2023). A Review of Research on Intelligent Engine Room Systems. *Advances in Machinery, Materials Science and Engineering Application IX*. 10.3233/ATDE230571.
16. li, Guiqin & Li, Yang & Lan, Jian & Zhu, Qiuyu & Lu, Hao & Mitrouchev, Peter. (2020). Development of the database for intelligent ship management system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 768. 042055. 10.1088/1757-899X/768/4/042055.
17. Orifice Plate Flow Measurement Principle and Formula URL: (<https://engineerscommunity.com/t/orifice-plate-flow-measurement-principle-and-formula/6165>).
18. Varbanets, Roman & Minchev, Dmytro & Savelieva, I. & Rodionov, A. & Mazur, T. & Psariuk, S. & Bondarenko, V. (2023). Enhanced diagnostic techniques for marine diesel engines: achieving IMO decarbonization compliance. *Internal Combustion Engines*. 26–36. 10.20998/0419-8719.2023.2.04.
19. Zacharewicz, Marcin & Kniaziewicz, Tomasz. (2017). Mathematical modelling malfunctions of marine diesel engine. *MATEC Web of Conferences*. 118. 00001. 10.1051/mateconf/201711800001.
20. Minchev, Dmytro & Varbanets, Roman & Shumylo, Oleksandr & Zalozh, Vitalii & Aleksandrovska, Nadiia & Bratchenko, Pavlo & Thanh Hai, Truong. (2023). Digital Twin Test-Bench Performance for Marine Diesel Engine Applications. *Polish Maritime Research*. 30. 81–91. 10.2478/pomr-2023-0061.
21. Pekař, Miloslav. (2024). The Behaviour of Gases. 10.1007/978-3-031-60321-1_4.
22. Fu, Chao & Liang, Xiaoxia & Li, Qian & Lu, Kuan & Gu, Fengshou & Ball, Andrew & Zheng, Zhaoli. (2023). Comparative Study on Health Monitoring of a Marine Engine Using Multivariate Physics-Based Models and Unsupervised Data-Driven Models. *Machines*. 49. 557. 10.3390/machines11050557.
23. Zacharewicz, Marcin & Kniaziewicz, Tomasz. (2017). Mathematical modelling malfunctions of marine diesel engine. *MATEC Web of Conferences*. 118. 00001. 10.1051/mateconf/201711800001.
24. Monieta, Jan. (2023). Diagnosing Cracks in the Injector Nozzles of Marine Internal Combustion Engines during Operation Using Vibration Symptoms. *Applied Sciences*. 13. 9599. 10.3390/app13179599.
25. Wu, Qinran & Liang, Xingyu & Zhu, Zhijie & Cui, Lei & Liu, Teng. (2024). Numerical Simulation Research on Combustion and Emission Characteristics of Diesel/Ammonia Dual-Fuel Low-Speed Marine Engine. *Energies*. 17. 2960. 10.3390/en17122960.
26. Gharib, Hla & Kovács, György. (2024). Implementation and Possibilities of Fuzzy Logic for Optimal Operation and Maintenance of Marine Diesel Engines. *Machines*. 12. 425. 10.3390/machines120604.
27. Varbanets, Roman & Shumylo, Oleksandr & Marchenko, Andrii & Minchev, Dmytro & Kyrnats, Vladyslav & Zalozh, Vitalii & Aleksandrovska, Nadiia & Brusnyk, Roman & Volovyk, Kateryna. (2022). Concept of Vibroacoustic Diagnostics of the Fuel Injection and Electronic Cylinder Lubrication Systems of Marine Diesel Engines. *Polish Maritime Research*. 29. 88-96. 10.2478/pomr-2022-0046.
28. Zakaria, Zunita & Hassan, Latiffah & Sharif, Zawiyah & Ahmad, Norazah & Ali, Rohaya & Husin, Suraya & Abd Hazi, Nor & Mohamed Sohaimi, Norfitriah & Bakar, Shafini & Garba, Bashiru (2020). Analysis of Salmonella enterica Enteritidis isolates from chicken and chicken meat products using PFGE, and MLST. 10.21203/rs.3.rs-23038/v1.
29. Heywood J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals," McGraw Hill, New York, 1988.
30. Hiroyasu, H., Kadota, T., & Arai, M. (1983). Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions : Part 1

Combustion Modeling. Jsme International Journal Series B-fluids and Thermal Engineering, 26, 569–575.

31. Lino, P., Maione, B., & Rizzo, A. (2007). Nonlinear modelling and control of a common rail injection system for diesel engines. Applied Mathematical Modelling, 31(9), 1770–1784.

32. Lakshminarayanan, P. A., Nayak, N., Dingare, S. V., and Dani, A. D. (June 19, 2002). "Predicting Hydrocarbon Emissions From Direct Injection Diesel Engines ." ASME. J. Eng. Gas Turbines Power. July 2002; 124(3): 708–716. <https://doi.org/10.1115/1.1456091>.

33. Omran, R., Younes, R., & Champoussin, J. C. (2008). Neural networks for real-time nonlinear control of a variable geometry turbocharged diesel engine. International Journal of Robust Nonlinear Control, 18(2), 1209–1229.

Носов П., Гудзь А., Пономарьова В. РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ГОТОВНОСТІ МЕХАНІКА ДО ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА РЕМОНТУ ФОРСУНОК З ВІЗУАЛІЗАЦІЄЮ ЇХ 3D МОДЕЛЕЙ

Проблема підвищення готовності механіка до експлуатації та ремонту суднових технічних систем є актуальною через складність виявлення несправностей та необхідність своєчасної діагностики. Метою цього дослідження є розробка та впровадження інтелектуальної системи, що підвищує готовність механіка шляхом візуалізації 3D моделей форсунок і використання нечітких методів діагностики.

Для вирішення поставлених завдань дослідження було проведено кілька ключових етапів. Спочатку було сформовано концептуальний опис інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень механіка, який включає введення даних про симптоми несправностей, оцінку цих симптомів на основі заданих правил, генерацію рекомендацій та візуалізацію функцій належності. Основні елементи функціоналу системи включають: введення даних, де симптоми несправностей форсунок вводяться у вигляді набору параметрів; оцінка правил, які оцінюють вхідні дані на основі порогових значень для визначення рівнів серйозності симптомів; визначення рекомендацій, де система автоматично генерує рекомендації на основі оцінки правил; візуалізація функцій належності через побудову графіків функцій належності для кожного правила діагностики; 3D моделювання, що включає створення 3D моделей форсунок для візуалізації пошкоджених компонентів та полегшення процесу діагностики.

Наступним етапом було створення формально-логічної структури правил для ідентифікації несправностей форсунок на основі симптомів. Кожне з 15 правил оцінює симптоми на основі заданих порогових значень.

На завершальному етапі було розроблено програмний засіб із функцією нечіткого висновку для підтримки прийняття рішень оператора-механіка. Програмний засіб автоматично оцінює симптоми та генерує рекомендації. Крім того, було візуалізовано функції належності для кожного правила діагностики, що полегшує розуміння результатів та дозволяє розробникам покращувати та гнучко налаштовувати систему.

Експерименти показали, що розроблена система дозволяє знизити ризик помилок та підвищити ефективність ремонту форсунок. Тестування показало, що швидкість операцій при ремонті форсунок зросла на 22,5%. Система автоматично оцінює симптоми та генерує рекомендації для механіка, забезпечуючи своєчасне виявлення несправностей.

Система забезпечує оперативність та гнучкість у використанні, дозволяючи механіку візуально ідентифікувати пошкоджені компоненти форсунок. Впровадження інтелектуальної системи сприяє зниженню ризику аварійних ситуацій та оптимізації процесу ремонту.

Запропоновані методи можуть бути адаптовані для діагностики інших компонентів суднових технічних систем, що відкриває нові перспективи для подальших досліджень. Подальші дослідження передбачають інтеграцію з іншими системами моніторингу та управління судном, а також розширення функціоналу для діагностики інших компонентів суднових технічних систем. Планується впровадження динамічного відображення процесів ремонту та віртуальних засобів доповненої реальності для підвищення ефективності підготовки механіків.

Бібл. 33, рис. 5.

Ключові слова: інтелектуальна система; підвищення готовності; автоматизація; ремонт форсунок; 3D моделювання; машинне навчання; діагностика несправностей; безпека мореплавства; ризики; невизначеність.

© Nosov P., Hudz A., Ponomaryova V.

Статтю прийнято до редакції 21.06.2024

СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В СУДНОВОДІННІ: СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

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 створення, застосування та розвитку систем підтримки прийняття рішень (СППР) у галузі судноводіння. Розглянуто основні напрямки використання СППР та систем штучного інтелекту в морській галузі. Проведено класифікацію існуючих СППР у галузі судноплавства, показано особливості побудови таких систем. Визначено класи практичних задач, які можуть бути успішно вирішені із застосуванням СППР. Розглянуті методологічні основи створення та впровадження СППР у судноводінні. Показано, що ефективне застосування СППР можливе лише за умов гармонізованого розвитку всіх складових, що забезпечують процеси створення, запровадження, розвитку та вдосконалення таких систем – життєвого циклу СППР. Розроблено структуру життєвого циклу СППР та запропоновані підходи до практичної реалізації кожного з його етапів. Визначені специфічні риси процесів прийняття рішень в судноводінні та особливості сприйняття інформації і прийняття рішень судноводієм. Проаналізовано структуру циклу інформаційної взаємодії особи, що приймає рішення, та СППР, визначено його окремі фази. Показано перспективність застосування в СППР моделі особи, що приймає рішення з метою підвищення ефективності процесів інформаційного обміну. Виявлено коло проблемних питань, що виникають при практичному впровадженні СППР в судноводінні та визначені шляхи їх можливого вирішення. Запропоновані підходи до покращення процесів створення та застосування СППР на практиці. Визначено пріоритетні напрямки використання СППР та систем штучного інтелекту в судноводінні та перспективи їх подальшого розвитку.

Ключові слова: системи підтримки прийняття рішень; судноводіння; штучний інтелект; методологія створення; життєвий цикл; людський фактор; безпека судноплавства.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.152-162

Вступ. Стрімкий розвиток сучасних інформаційних технологій істотно вплинув практично на усі галузі науки і промисловості, забезпечуючи їх вихід на принципово новий технологічний щабель. Галузь судноводіння не стала виключенням, про що може свідчити інтенсивний розвиток засобів електронної навігації та автоматизованих систем керування рухом судна та загальносудновими системами, який відбувається протягом останніх двох десятиліть. Окремим важливим напрямом запровадження новітніх інформаційних технологій у судноводінні постає створення систем підтримки прийняття рішень (СППР) судноводія.

Важливою складовою подальшого вдосконалення та успішного запровадження таких систем є визначення методологічних основ їх побудови, перспективних напрямків розвитку та проблемних питань практичного застосування в сучасних умовах, що і стало метою даного дослідження.

Постановка проблеми. Ефективне застосування СППР у судноводінні можливе лише за умов гармонізованого розвитку багатьох складових, що забезпечують процеси створення, запровадження, розвитку та вдосконалення таких систем (так званий життєвий цикл СППР). Вдосконалення вищезазначених процесів, у свою чергу, потребує визначення низки проблемних питань, що виникають при дослідженні та практичному застосуванні СППР і шляхів їх ефективного вирішення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання створення та використання СППР у судноводінні докладно розглянуто в низці робіт вітчизняних та зарубіжних авторів [1–19]. Хоча перші згадки про експертні системи в судноводінні беруть свій початок з 80-х років ХХ-ст. [20–22], слід зазначити, що реальне практичне застосування СППР у судноводінні та проведення наукових досліджень у цій галузі розпочалося на початку ХХІ-ст. Зазначені обставини були, обумовлені, перш за все інтенсивним розвитком та впровадженням сучасних інформаційних технологій в усіх сферах діяльності людства. Широке запровадження засобів електронної навігації, та поява концепції E-Navigation [2],

привело до впровадження інтегрованих систем ходового містка [3, 4], і обумовило необхідність створення сучасних автоматизованих систем керування рухом судна. Таким чином, виникла проблема створення СППР з керування процесами розходження, маневрування та загального планування руху.

Важливими питаннями постали проблеми вибору оптимальних маршрутів суден з позицій мінімізації витрат палива та забезпечення безпеки перевезень [5–12], побудови логістичних ланцюжків транспортування товарів, складання оптимальних вантажних планів суден-контейнеровозів [13] та керування вантажними операціями при перевезенні великовагових, негабаритних, та небезпечних вантажів, тощо [23, 24]. Окремим напрямом для теоретичних досліджень та практичних напрацювань стало розв'язання питань, пов'язаних з оптимізацією роботи портових терміналів та інфраструктури портів [25, 26].

Великий клас задач для СППР у суднопластві сформували також проблеми керування ризиками в галузі, а саме: страхування суден та вантажу, керування фрахтуванням, розрахунок рівня ризиків морських перевезень [27], агентування та бербоут-чартеру суден.

Слід зазначити, що активний розвиток та практичне застосування СППР у галузі суднопластва, обумовило також появу низки важливих питань, що потребують нагального вирішення. Перш за все слід сфокусувати увагу на виникненні наступних вимог до СППР:

- збільшення кількості інформаційних джерел та інтенсивності інформаційних потоків з якими доводиться мати справу особам, що приймають рішення (ОПР);
- підвищення загальних вимог до оперативності і своєчасності прийняття рішень в умовах високого рівня відповідальності за їх наслідки;
- потреба максимального зменшення рівня суб'єктивності оцінки ситуації;
- за можливість, максимальне зменшення впливу так званого людського фактору [28–30] на процеси прийняття рішень.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є визначення методологічних основ побудови СППР у судноводінні, перспективних напрямків розвитку та проблемних питань їх практичного застосування в сучасних умовах.

Об'єктом дослідження є СППР у судноводінні. Предметом дослідження є методологічні основи створення, розвитку та практичного застосування СППР у судноводінні.

Досягнення поставленої мети дослідження обумовлює необхідність вирішення наступних задач:

1. Визначити пріоритетні напрями застосування систем штучного інтелекту (ШІ) та СППР у судноводінні.
2. Побудувати структуру життєвого циклу СППР у судноводінні та з'ясувати особливості практичної реалізації його окремих етапів.
3. Запропонувати нові шляхи розвитку та вдосконалення СППР судноводія.
4. Визначити пріоритетні напрямки запровадження СППР та систем ШІ в судноводінні та перспективи подальших наукових досліджень.

Виклад основного матеріалу. Істотне підвищення швидкодії сучасних засобів обчислювальної техніки та інтенсивний розвиток новітніх інформаційних технологій, сприяли істотному розширенню сфер застосування як СППР так і взагалі систем ШІ.

Серед основних напрямів, за якими здійснюється впровадження таких систем, слід зазначити [1]:

- автономні судна та системи автономної навігації;
- СППР з керування рухом суден у складних навігаційних умовах та за наявності факторів ризику;
- технічна діагностика та прогнозування відмов судового обладнання;
- енергетичний менеджмент процесів експлуатації судових енергетичних установок та електрообладнання;

- керування вантажними операціями контейнеровозів та суден, що перевозять негабаритні і великовагові вантажі;
- планування ефективної роботи портової інфраструктури та портових терміналів;
- раціональне планування маршрутів руху суден та управління логістикою морських перевезень.

Безумовно, сфера застосування саме СППР у морській галузі дещо вужча, ніж систем ІІІ взагалі, проте вона також доволі широка і охоплює практично усі напрями. На підставі ґрунтовного аналізу низки наукових робіт [1–19, 23–30] було побудовано узагальнену класифікацію напрямів застосування СППР у суднопластві, яка наведена на рис. 1.



Рисунок 1 – Класифікація напрямків застосування СППР в галузі суднопластва

Слід зазначити, що хоча специфіка розробки СППР за кожним із зазначених напрямків і має певні відмінності, однак для галузі судноводіння можна визначити певну узагальнену методологію створення та впровадження таких систем. Зазначена методологія побудови СППР обумовлює необхідність послідовного виконання наступних етапів:

- визначення та аналіз особливостей предметної галузі;
- визначення особливостей підтримки прийняття рішень у судноводінні;
- аналіз процесів формування та прийняття рішень судноводієм;
- формування базисних принципів побудови СППР судноводія;
- визначення кола прикладних задач, які будуть вирішуватись за допомогою СППР;
- створення дослідного зразка СППР та аналіз ефективності його практичного застосування;
- модифікація та вдосконалення відповідно з досвідом практичного застосування;
- впровадження та сертифікація (у разі необхідності).

Відповідно до вищезазначених етапів було побудовано структуру життєвого циклу СППР у галузі судноводіння, яка наведена на рис. 2.



Рисунок 2 – Життєвий цикл СППР у судноводінні

Згідно з першим етапом необхідно враховувати, що особливостями предметної галузі, що розглядається, є наступні [15]:

- наявність стохастичних та нетермінованих факторів впливу на процеси керування рухом судна;
- наявність факторів невизначеності та неповноти вихідних даних стосовно ситуацій, що розглядаються;
- наявність часових обмежень на процеси введення, аналізу інформації та формування управлінських рішень;
- необхідність комплексного врахування зовнішніх збурень на процеси прийняття рішень, що обумовлені впливом навколишнього середовища;
- наявність фактору суб'єктивності суджень особи, що приймає рішення (ОПР), що обумовлено наявними в неї стереотипами формування управлінських рішень для певних ситуацій;
- істотний вплив на прийняття рішень психофізіологічного стану ОПР;
- обов'язкова відповідність рішень, що приймаються, вимогам чинних міжнародних нормативних документів, що регламентують діяльність у галузі судноплавства;

– у випадку застосування СППР у сфері запобігання зіткнення суден, слід брати до уваги, що процеси прийняття рішень щодо їх розходження мають розподілений і кооперативний характер за умов цілеспрямованої поведінки всіх учасників навігаційної ситуації.

Зазначені особливості предметної галузі вимагають комбінованого застосування відомих математичних методів керування у поєднанні з моделями і методами ШІ [14].

Наступними, не менш важливими складовими життєвого циклу створення СППР є визначення особливостей підтримки прийняття рішень у судноводінні та аналіз процесів формування і прийняття рішень судноводієм. Слід враховувати, що при прийнятті рішення, судноводій зазвичай керується нижченаведеними правилами [15]:

1. Під час здійснення аналізу ситуації, що склалася, судноводій підсвідомо оцінює динаміку навігаційних параметрів, здійснюючи прогнозування їх змін у часі і формуючи, таким чином, навігаційну ситуацію, що матиме місце у майбутньому.

2. За сприятливих умов (відсутність втоми, нескладна ситуація вибору рішення, стали фактори впливу зовнішнього середовища) судноводій здатний самостійно долати фактори неточності та неповноти вихідних даних, та швидко приймати вірне рішення, спираючись лише на наявний досвід.

3. За несприятливих умов, судноводій підсвідомо здійснює «огрублення» ситуації, що склалася, аналізуючи лише певну кількість, «найбільш важливих», з його суб'єктивної точки зору, параметрів з метою більш швидкого ухвалення рішення.

4. Судноводій зазвичай формує для себе можливий сценарій розвитку подальших дій спираючись на власний досвід прийняття рішень у подібних ситуаціях, якщо вони вже мали місце в минулому, проте не завжди подібні сценарії є коректними і достовірними, що, як наслідок, призводить до прийняття ним суб'єктивних рішень.

5. Судноводій постійно оцінює рівень досягнення ним поставлених результатів керування, що завжди супроводжується певним рівнем емоційного відчуття успіху або тривоги в залежності від складності ситуації, яка має місце.

Саме вищезазначені особливості у поєднанні з постійним збільшенням обсягів інформації, що потребує оперативної обробки, і є першочерговими чинниками виникнення такого явища, як людський фактор. Можливі шляхи його подолання докладно розглянуто у роботах [14–16, 28–30].

З метою зменшення негативного впливу людського фактору, та підвищення ефективності взаємодії СППР із судноводієм у цілому, доцільно враховувати структуру процесів інформаційного обміну, та застосовувати в СППР інтегровану модель ОПР, або судноводія. У такому випадку процес взаємодії розглядається у вигляді безперервного ланцюжка послідовних циклів, що наведені на рис. 3. Безпосередньо цикл інформаційної складається з чотирьох фаз: «С»–«П»–«В»–«А» («Синтез», «Подання», «Взаємодія», «Аналіз»).

Під час циклу інформаційної взаємодії СППР застосовує модель судноводія з метою визначення пріоритетності розв'язання задач, що вирішуються, визначення форми візуалізації вихідних даних та змісту інформаційних повідомлень. Одночасно в СППР також здійснюється накопичення інформації про дії судноводія, яка в подальшому застосовується для уточнення його моделі.

Наявність моделі ОПР дозволяє знизити рівень інформаційного навантаження на ОПР та підвищити швидкість процесів обміну інформацією. Вищевказане набуває особливо важливого значення за умов прийняття рішень у критичних ситуаціях та наявності обмежень часу на їх формування та практичну реалізацію. Докладно особливості практичного запровадження зазначеного підходу розглянуті у роботі [29].

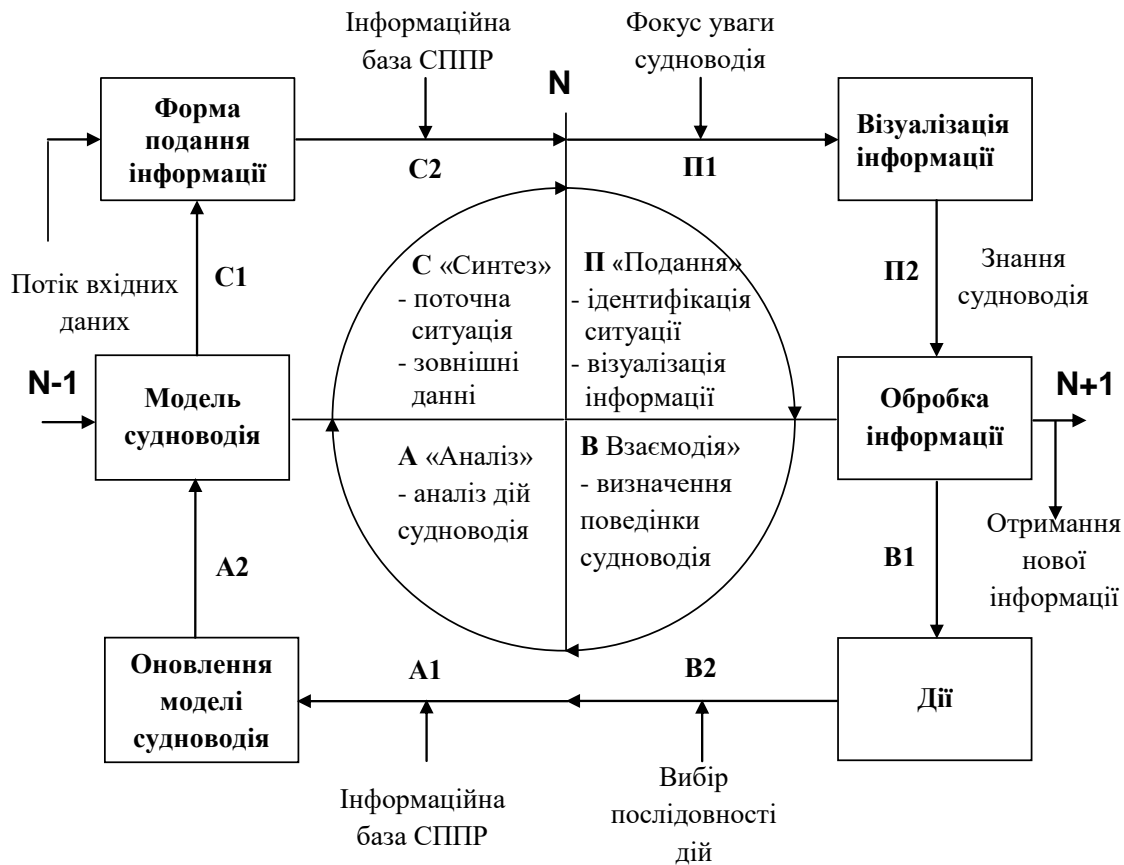


Рисунок 3 – Цикл інформаційної взаємодії судноводія з СППР

Безумовно проблема зниження впливу людського фактору є однією з найбільш важливих у галузі створення СППР, проте, разом з тим, слід зазначити, що впровадження СППР у судноводінні також стикається з низкою і інших проблемних питань, серед найбільш значущих з яких слід вказати наступні:

- складність сертифікованої технічної інтеграції з існуючими навігаційними системами та системами керування судновими технічними засобами;
- необхідність гармонізації рішень, прийнятих СППР з нормативною правовою базою у сфері морського судноплавства, перш за все МППЗС-72, формалізація яких істотно ускладнена внаслідок неповної детермінованості;
- юридично-правові аспекти відповідальності за наслідки керування рухом судна згідно норм чинного законодавства у сфері мореплавства;
- інертність мислення осіб командного складу суден із запровадження новацій та побоювання втрати робочих місць внаслідок підвищення рівня автоматизації систем керування судном.

Незважаючи на вищезазначені проблеми, практичне впровадження СППР у судноводінні продовжується і активно розвивається. В умовах, що склалися, пріоритетними напрямками є [1]:

- створення СППР судноводія, що дозволять здійснювати керування рухом суден у складних навігаційних ситуаціях у режимі реального часу;
- подальший розвиток і вдосконалення систем автоматичної візуальної ідентифікації рухомих об'єктів (машинний зір), особливо в складних умовах спостереження, за наявності зовнішніх завад;
- розвиток моделей і методів координації колективної поведінки автономних суден (у тому числі у військовій сфері);
- планування маршрутів руху суден у відповідності до погодних умов та їх адаптивне корегування;

– раціональне керування трафіком морських суден у вузькостях та зонах інтенсивного мореплавства.

Можливо, стрімкий розвиток сучасних інформаційних технологій і судноплавства в цілому сприятиме істотному розширенню вищезазначеного переліку, але з впевненістю можна констатувати, що частка функцій та задач керування, які в майбутньому виконуватимуться СППР або повністю автономними системами з ШІ, буде лише постійно зростати.

Висновки. З метою підвищення ефективності проєктування, створення, тестування та практичного запровадження СППР та систем ШІ в галузі судноводіння, пропонується здійснювати виконання вказаних етапів з урахуванням структури запропонованого життєвого циклу СППР та особливостей процесів взаємодії таких систем з технічними засобами та безпосередньо ОПР. Таким чином буде скорочено витрати часу, необхідні на реалізацію вищезазначених етапів, що сприятиме підвищенню якості програмних та апаратних засобів, які створюються. Врахування структури процесу інформаційного обміну з СППР також забезпечить поліпшення умов інформаційної взаємодії з ОПР і, як наслідок, позитивно вплине на надійність та ефективність функціонування таких систем в цілому.

Перспективи подальших досліджень. Проведені дослідження показали необхідність удосконалення і подальшого розвитку СППР та систем ШІ в галузі судноводіння. Перспективним напрямом подальших наукових досліджень стане трансформація та перенесення наявних теоретичних та практичних напрацювань, що вже отримані в галузі створення СППР у судноводінні, у сферу розробки систем ШІ для керування роботою безекіпажних та автономних морських суден. Окремим важливим напрямом стане дослідження питань, пов'язаних з координацією спільних дій та цілеспрямованою поведінкою таких суден для вирішення поставлених задач.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Бень А. П., Чернявський В. В., Носов П. С. Системи підтримки прийняття рішень та технології штучного інтелекту – нові реалії розвитку сучасного судноводіння. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2024): матеріали XVI Міжнародної науково-практичної конференції*. Херсон, 2024. С. 29–30.
2. Бень А. П., Паламарчук И. В. Принципы построения систем поддержки принятия решения судоводителя в рамках концепции e-Navigation. *Научный вестник Херсонской государственной морской академии*. 2015. № 2 (13). С. 19–24.
3. Вагущенко Л. Л. Судовые навигационно-информационные системы. Одесса : НУ “ОМА”, 2016. 238 с.
4. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л. Поддержка решений по расхождению с судами: Фенікс, 2010. 229 с.
5. Паламарчук И. В. Использование систем поддержки принятия решений для повышения эффективности и безопасности судоходства. *Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2016): матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції*, 24–26 травня 2016 р. Херсон: ХДМА, 2016. С. 29–30.
6. Ben A. P., Palamarchuk I. V. Solving tasks of vessel collision avoidance and maneuvering during designing decision support systems of the navigator // *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries : monograph / edited by authors*. 3rd ed. Riga, Latvia : Baltija Publishing, 2019. P. 58–77.
7. Lisowski J. Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation. *Advances in Safety and Reliability*. 2005. Vol. 2. P. 1285–1292.
8. Lazarowska A. A trajectory base method for ship's safe path planning/ 20th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems, *Procedia Computer Science* 96 (2016), pp. 1022–1031.

9. Timchenko V., Kondratenko Y., Kreinovich V. Decision Support System for the Safety of Ship Navigation Based on Optical Color Logic Gates // *Information Technology and Implementation IT&I-2022*, pp. 42–52.
10. 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.
11. Cai Y., Wen Y.Q.: Ship Route Design for Avoiding Heavy Weather and Sea Conditions. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2014. Vol. 8, № 4. P. 551–556.
12. Паламарчук І. В. Моделювання розходження суден в системі підтримки прийняття рішень судноводія. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. № 1 (22). С. 45–53.
13. Нікольський В. В., Нікольський М. В., Накул Ю. А. Система підтримки прийняття рішень по завантаженню великотоннажного контейнеровозу. *Наукові праці ЧДУ ім. Петра Могили. Серія: “Комп’ютерні технології”*. 2016. Вип. 271. Т. 283. С. 60–63.
14. 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.
15. Бень А. П. Концептуальные основы создания систем поддержки принятия решений в судовождении. *Штучний інтелект*. 2012. № 3. С. 222–227.
16. Бень А. П., Мальцев А. С. Системы поддержки принятия решений по управлению движением судна // Монографія. Херсон : Видавництво ХДМА, 2019. 244 с.
17. Якусевич Ю. Г., Тришин В. В., Дорофеева З. Я. Побудова навігаційної системи судна на основі сучасних інформаційних технологій. *Кибернетика та системний аналіз*. №4(70). 2021. С. 83–88.
18. Pietrzykowski Z., Wolejsza P., Borkowski P. Decision support in collision situations at sea. *J. Navig.* 2017. Vol. 70. P. 447–464.
19. 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.
20. Koyama T. and Yan J. An expert system approach to collision avoidance, 8th Ship ControlSystem Symposium, Hague, 1987.
21. Положенцев М. А., Шепетуша Ю. М. Применение двухэлементных стратегий расхождения в эргатических системах предупреждения столкновений судов // *Кибернетика и вычислительная техника*. 1987. №76. С. 19–21.
22. Smeaton G., Coenen F. Developing an intelligent marine navigation system. *Computing & Control Engineering Journal*. 1990. Vol. 1. Issue 2. P. 95–103. <https://doi.org/10.1049/cce:19900024>.
23. Kebedow K. G., Oppen J. Including Containers with Dangerous Goods in the Multi-Port Master Bay Planning Problem. *MENDEL*. 2018. vol. 24. no. 2. P. 23–36.
24. Solovey, O., Ben, A., Dudchenko, S., Nosov P. Development of control model for loading operations on Heavy Lift vessels based on inverse algorithm. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5/2 (107), p. 48–56.
25. Carlo H. J., Vis I. F. A., Roodbergen K. J. Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research*. 2014. vol. 236, no. 1. P. 1–13.
26. Rodriguez-Molins M., Salido M.A., Barber F. Intelligent planning for allocating containers in maritime terminals. *Expert Systems with Applications*. 2012. Vol. 39(1). P. 978–989.
27. Yishan L., Zhiqiang G., Jie Y. et al. Prediction of ship collision risk based on CART. *IET Intelligent Transport Systems*. 2018. Vol. 12. Issue 10. pp. 1345–1350.

28. Лелеко Н. В. Пути повышения качества взаимодействия оператора с системой динамического позиционирования. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2018. № 1 (18). С. 27–33.

29. Nosov P. S., Ben A. P., Safonova A. F., Palamarchuk I. V. Approaches going to determination periods of the human factor of navigators during supernumerary situations. *Науковий журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління»*. 2019. № 2 (49).

30. 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.

REFERENCES

1. Ben, A. P., Cherniavskiy, V. V., Nosov, P. S. (2024). Systemy pidtrymky pryiniattia rishen ta tekhnologii shtuchnoho intelektu – novi realii rozvytku suchasnoho sudnovodinnia. Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnologii na transporti (MINTT-2024): materialy XVI Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Kherson. S. 29–30.

2. Ben, A. P., Palamarchuk, Y. V. (2015). Pryntsypy postroenyia system podderzhky pryniattia reshenia sudovodytelia v ramkakh kontseptsyy e-Navigation. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. № 2 (13). S. 19–24.

3. Vahushchenko, L. L. (2016). *Sudovye navyhatsyonno-ynformatsyonnye systemy*. Odessa : NU “OMA”. 238 s.

4. Vahushchenko, L. L., Vahushchenko, A. L. (2010). *Podderzhka reshenyi po raskhozheniyu s sudamy*: Feniks. 229 s.

5. Palamarchuk, Y. V. (2016). Yspolzovanye system podderzhky pryniattia reshenyi dlia povysheniya efektyvnosti y bezopasnosti sudokhodstva. Suchasni informatsiini ta innovatsiini tekhnologii na transporti (MINTT-2016): materialy VIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 24–26 travnia 2016 r. Kherson: KhDMA. S. 29–30.

6. Ben, A. P., Palamarchuk, I. V. (2019). Solving tasks of vessel collision avoidance and maneuvering during designing decision support systems of the navigator // *New stages of development of modern science in Ukraine and EU countries : monograph / edited by authors*. 3rd ed. Riga, Latvia : Baltija Publishing. P. 58–77.

7. Lisowski, J. (2005). Dynamic games methods in navigator decision support system for safety navigation. *Advances in Safety and Reliability*. Vol. 2. P. 1285–1292.

8. Lazarowska, A. (2016). A trajectory base method for ship’s safe path planning/ 20th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems, *Procedia Computer Science* 96, pp. 1022–1031.

9. Timchenko, V., Kondratenko, Y., Kreinovich, V. (2022). Decision Support System for the Safety of Ship Navigation Based on Optical Color Logic Gates // *Information Technology and Implementation (IT&I-2022)*, pp. 42–52.

10. 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.

11. Cai, Y., Wen, Y.Q. (2014). Ship Route Design for Avoiding Heavy Weather and Sea Conditions. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. Vol. 8, № 4. P. 551–556.

12. Palamarchuk, I. V. (2020). Modeliuvannia rozkhozhenia suden v systemi pidtrymky pryiniattia rishen sudnovodiia. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. № 1 (22).S. 45–53.

13. Nikolskiy, V. V., Nikolskiy, M. V., Nakul, Yu. A. (2016). Systema pidtrymky pryiniattia rishen po zavantazhenniu velykotonnazhnoho konteinerovoza. *Naukovi pratsi ChDU im. Petra Mohyly*. Seria: “Kompiuterni tekhnologii”. Vyp. 271. T. 283. S. 60–63

14. 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.
15. Ben, A. P. (2012). Kontseptualnye osnovy sozdaniya system podderzhky pryiniatyia reshenyi v sudovozhdenyy. Shtuchnyi intelekt. № 3. S. 222–227.
16. Ben, A. P., Maltsev, A. S. (2019). Системы подderzhky pryiniatyia reshenyi po upravleniyu dvyzhenyem sudna // Monohrafiia. Kherson : Vydavnytstvo KhDMA. 244 s.
17. Yakusevych, Iu. H., Tryshyn, V. V., Dorofieieva, Z. Ia. (2021). Pobudova navihatsiinoi systemy sudna na osnovi suchasnykh informatsiinykh tekhnolohii. Kibernetika ta systemnyi analiz. №4(70). С. 83–88.
18. Pietrzykowski, Z., Wołajsza, P., Borkowski, P. (2017). Decision support in collision situations at sea. *J. Navig.* Vol. 70. P. 447–464.
19. 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.
20. Koyama, T. and Yan, J. (1987). An expert system approach to collision avoidance, 8th Ship ControlSystem Symposium, Hague.
21. Polozhentsev, M. A., Shepetukha, Yu. M. (1987). Prymenenye dvukh-elementnykh stratehi raskhozhdeniya v erhatycheskykh systemakh preduprezhdeniya stolknovenyi sudov //Kybernetika y vychyslytelnaia tekhnika. №76. S. 19–21.
22. Smeaton, G., Coenen, F. (1990). Developing an intelligent marine navigation system. *Computing & Control Engineering Journal*. Vol. 1. Issue 2. P. 95–103. <https://doi.org/10.1049/cce:19900024>.
23. Kebedow, K. G., Oppen, J. (2018). Including Containers with Dangerous Goods in the Multi-Port Master Bay Planning Problem. *MENDEL*. vol. 24. no. 2. P. 23–36.
24. Solovey, O., Ben, A., Dudchenko, S., Nosov, P. (2020). Development of control model for loading operations on Heavy Lift vessels based on inverse algorithm. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 5/2 (107), p. 48–56.
25. Carlo, H. J., Vis, I. F. A., Roodbergen, K. J. (2014). Transport operations in container terminals: Literature overview, trends, research directions and classification scheme. *European Journal of Operational Research*. vol. 236, no. 1. P. 1–13.
26. Rodriguez-Molins, M., Salido, M.A., Barber, F. (2012). Intelligent planning for allocating containers in maritime terminals. *Expert Systems with Applications*. Vol. 39(1). P. 978–989.
27. Yishan, L., Zhiqiang, G., Jie, Y. (2018). et al. Prediction of ship collision risk based on CART. *IET Intelligent Transport Systems*. Vol. 12. Issue 10. pp. 1345–1350.
28. Leleko, N. V. (2018). Puty povysheniya kachestva vzaymodeistviya operatora s systemoi dynamycheskoho pozytsyonyrovaniya. Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii. № 1 (18). S. 27–33.
29. Nosov, P. S., Ben, A. P., Safonova, A. F., Palamarchuk, I. V. (2019). Approaches going to determination periods of the human factor of navigators during supernumerary situations. *Науковий журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління»*. № 2 (49).
30. MacKinnon, S. N., Weber, R., Olinderson, 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, AISC 1212, pp. 429–435.

Ben A. P. DECISION SUPPORT SYSTEMS IN NAVIGATION: CURRENT STATE AND PROSPECTS FOR FURTHER DEVELOPMENT

The article is devoted to issues of creation, application and development of decision support systems (DSS) in the field of shipping. The main areas of use of DSS and artificial intelligence systems in the maritime industry are considered. The classification of existing DSS in the field is carried out, the peculiarities of the construction of such systems are shown. The classes of practical problems that can be successfully solved with

the use of DSS are defined. The methodological foundations of the creation and implementation of DSS in navigation are considered. It is shown that the effective application of the DSS is possible only under the conditions of the harmonized development of all components that ensure the processes of creation, introduction, development and improvement of such systems - the life cycle of the DSS. The structure of the DSS life cycle was developed and approaches to the practical implementation of each of its stages were proposed. The specific features of decision-making processes in navigation and the features of information perception and decision-making by the shipmaster are determined. The structure of the cycle of information interaction of the decision-maker and the DSS was analyzed, and its separate phases were determined. The perspective of using the model of a decision-maker in the DSS is shown in order to increase the efficiency of information exchange processes. A number of problematic issues that arise during the practical implementation of the DSS in navigation are identified and the ways of their possible solution are determined. Approaches to improving the processes of creation and application of DSS in practice have been proposed. The priority directions for the use of DSS and artificial intelligence systems in ship navigation and the prospects for their further development have been determined.

Key words: *decision support systems; navigation; artificial intelligence; creation methodology; life cycle; human factor; safety shipping.*

© Бень А. П.

Статтю прийнято до редакції 14.06.2024

ВИКОРИСТАННЯ НАДЛИШКОВОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

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.

Питання зменшення енергоспоживання на судах, а також пов'язані з цим питання скорочення викидів та покращення стану навколишнього середовища є особливо актуальними. Шляхи вирішення цих питань різні, але найчастіше використовуються конструктивні рішення, гідродинамічні рішення, вітрила або сучасні силові установки. Зменшення енергоспоживання також можна досягти за рахунок правильного планування маршруту, психологічної підготовки екіпажу, автоматизації процесів керування рухом. У статті запропоновано метод мінімізації енергоспоживання за рахунок використання надлишкового керування. Надлишкові структури виконавчих пристроїв широко використовуються на сучасних судах, зокрема, на судах з динамічною системою позиціонування. Традиційне призначення надлишкових структур – збільшення надійності системи керування по виконавчим пристроям та підвищення маневрових можливостей судна. Запропонований метод використовує наявні на судах надлишкові структури ще й для мінімізації витрат палива. Отриманий результат пояснюється знаходженням оптимальних керувань, що мінімізують енергоспоживання, шляхом вирішення в бортовому обчислювачі автоматизованої системи оптимізаційної задачі з лінійними та нелінійними обмеженнями на параметри керування, використанням знайдених оптимальних керувань для виконання операцій. Працездатність та ефективність розробленого методу підтверджена математичним моделюванням у середовищі MATLAB. Результати проведеного експерименту показали, що використання розробленого методу дозволяє знизити енерговитрати на (35–50)%. При цьому, додаткове навантаження на розрахунковий такт бортового обчислювача не перевищує 25–50 мс, що становить (2,5–5)% всього навантаження.

Ключові слова: інтелектуальні транспортні системи; людський чинник; навігаційна безпека; надлишкові керування; мінімізація енергоспоживання; умовна оптимізація.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.163-173

Вступ. Питання мінімізації енергоспоживання на судах, а також пов'язані з цим питання скорочення викидів та покращення стану навколишнього середовища є особливо актуальними [1]. Шляхи вирішення цих питань різні, але найчастіше для цього використовуються конструктивні рішення [2], гідродинамічні рішення [3], вітрила [4] або сучасні силові установки. Оптимізація руху та економія палива також можливі за рахунок правильного планування маршруту, психологічної підготовки екіпажу, використання систем підтримки прийняття рішень, ергатичних та автоматизованих систем з модулями автоматичного керування [5–8]. Функції людини в таких системах зводяться лише до запуску автоматичного модуля та контролю за його роботою, що значно зменшує вплив людського чинника на процеси керування, сприяє зменшенню кількості аварій та катастроф на морі [9]. Останнім часом, для оптимізації процесів керування, використовуються надлишкові керування. Відомі способи використання надлишкового керування в авіаційній промисловості [10], у зварювальному виробництві [11], тощо. Надлишкові керування використовуються також на сучасних судах, наприклад, оснащених динамічною системою позиціонування: судна забезпечення платформ (PSV), судна забезпечення водолазних робіт (DSV), бурові судна, судна для прокладки кабелю та ремонту, судна для прокладки труб, земснаряди, кранові баржі або кранові судна, судна для скидання породи, мобільні морські бурові установки (MODU), човникові танкери, пасажирські, військово-морські судна та інші. До систем керування таких суден пред'являються підвищені вимоги до надійності, точності і маневреності. Для забезпечення цих вимог судна оснащені високоточними засобами вимірювання абсолютного (системи DGPS) і відносного положення, надлишковими структурами активного керування та бортовими обчислювальними потужностями [12, 13]. Наявність надлишкових структур керування дозволяє підвищити не тільки надійність та

маневрові можливості суден, але й оптимізувати процеси керування, зокрема, зменшити витрати палива, збільшити керуючі сили і моменти, зменшити час на виконання операцій.

Об'єктом дослідження є процеси мінімізації енергоспоживання, за рахунок використання надлишковості керування.

Предметом дослідження є моделі та методи мінімізації енерговитрат, за рахунок використання надлишковості керування.

Постановка проблеми. Для судна з надлишковою структурою керування необхідно знайти оптимальні керування \mathbf{U}^0 , які мінімізують енерговитрати

$$E(\mathbf{U}^0) \rightarrow \min, \quad (1)$$

за умови створення необхідних керуючих сил P_x^* , P_y^* і моменту M_z^* під час виконання операцій (динамічного позиціонування, програмного переміщення, виконання інших маневрів)

$$\begin{cases} P_x(\mathbf{U}^0) = P_x^* \\ P_y(\mathbf{U}^0) = P_y^* \\ M_z(\mathbf{U}^0) = M_z^* \end{cases}, \quad (2)$$

при наявності обмежень на керування

$$\mathbf{U} \leq \mathbf{U}_{\max}. \quad (3)$$

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання оптимізації процесів керування із використанням надлишкових структур раніше розглядалося багатьма авторами. Так, у роботі [14] розглянуті питання підвищення надійності підшипників з магнітним підвісом у конструкціях із резервуванням, за рахунок реконфігурації конструкції у разі відмови окремих компонентів. Коефіцієнт струму зміщення є одним із ключових факторів у стійкому до відмов контролі. Авторами розроблено метод оптимізації коефіцієнту струму зміщення в резервній структурі. За допомогою математичного аналізу діапазону зміни коефіцієнту струму зміщення доведено існування оптимального рішення. Розроблено алгоритми пошуку оптимального рішення.

Дослідження системи керування автономним надводним судном, яка б забезпечувала безпечно та точно виконання функціональних завдань за наявності вітру, течії та хвилювання, наведено у дослідженні [15]. Представлена нова топологія контролера, заснована на поєднанні ПД- регулятора та оптимального керування. Налаштування регулятора сформовані на основі отриманих результатів оптимального керування, що забезпечило мінімізацію модельних невизначеностей. Працездатність та ефективність методу перевірені на математичній моделі реального судна з 3 ступенями свободи (модель DoF). Результати моделювання показали, що ПД-регулятор, налаштований відповідно до запропонованого методу, здатний працювати за різних параметричних невизначеностей.

У статті [16] розглянуті питання оптимального керування стріловими кранами, що використовуються на судах. Модель динамічного стрілового крана лінеаризована шляхом розкладання в ряд Тейлора навколо робочої точки, яка перераховувалася на кожному кроці керування. Для розрахунку коефіцієнту підсилення у каналі зворотного зв'язку регулятора розв'язувалося алгебраїчне рівняння Ріккати. Запропонований підхід до оптимального керування забезпечив швидке та точне відстеження змінних станів стрілових кранів при помірних флуктуаціях вхідних керуючих сигналів.

Дослідженню швидкодії авіаційного маневру Кульбіт, при створенні бази маневрів, присвячена робота [17]. За допомогою методу заміни змінних і накладення функції штрафу, задача оптимального керування з вільним кінцевим станом і часом перетворена у задачу оптимального керування з фіксованим кінцевим станом. Результати моделювання показали, що запропонований метод дозволяє оптимізувати у часі керування для маневру Кульбіт.

У статті [18] розглянуто швартовий маневр автономного надводного судна (АНС) з використанням модифікованої механіки (тросу). Мала швидкість судна при швартуванні істотно знижує його маневрові можливості, а вітер і хвилювання значно підсилюють цей ефект. Внесок статті в розробку методів швартування АНС з використанням модифікованої механіки полягає у врахуванні провисання каната. Це досягнуто за рахунок використання гладкої штрафної функції та лінійного комплементарного рішення.

У статті [19] досліджено задачу оптимізації вертикального зниження космічного корабля під час посадки на планету, з урахуванням обмежень на глісаду та тягу двигуна. В якості критерію оптимальності прийнята функція мінімізації енерговитрат. Вперше доведено форму Max-Min-Max або Max-Singular-Max оптимального керування за принципом максимуму Понтрягіна. Отриманий результат поширено на задачі керування з урахуванням впливу атмосфери. Показано, що сингулярна структура не виникає в розширених задачах керування.

У статті [20] розглянуті питання створення відмовостійкої системи рульового керування безпілотних підводних апаратів. Проведений авторами аналіз показав, що надійність системи керування, яка використовує стратегію та алгоритми керування резервуванням, значно краща, ніж традиційна конфігурація.

Методи керування резервною структурою електрогідролічних приводів на основі нечіткої агрегації, правил нечіткої логіки Мамдані та теорії нечітких нейронних мереж досліджено в [21].

У керівництві [22] містяться рекомендації щодо практичного маневрування судном з двома кормовими азимутальними пристроями (АП). Розглянуто можливості кількох фіксованих режимів. Враховуючи, що ці режими реалізуються вручну, кути АП у всіх режимах вибираються кратними 45 гр. крім режимів швидкого переміщення вліво та вправо. Структура з двома кормовими АП може виникнути, коли носовий і кормовий підрулюючі пристрої виходять з ладу через засмічення піском або мулом. Така конструкція є останнім «рублежем», який забезпечує тривимірне керування, тому вона особливо цікава.

У посібнику користувача [23] описані три сучасні системи динамічного позиціонування: Navis, Marine Technologies і Rolls Royce, які використовують надлишкові структури для оптимізації процесів керування.

Як видно із проведеного аналізу останніх досліджень та публікацій, методи мінімізації енергоспоживання, за рахунок використання надлишкового керування, раніше у відкритих джерелах не розглядалися. Тому, розробка таких методів є актуальною науково-технічною задачею.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є зменшення енерговитрат на проведення операцій судном з надлишковою структурою виконавчих пристроїв. Поставлена мета досягається за рахунок: вимірювання поточних параметрів руху судна; визначення відхилень вимірюваних параметрів руху від програмних, які повинні забезпечуватися системою керування під час виконання операцій; визначення керуючих сил і моменту в каналах поздовжнього, бокового руху та ристання, необхідних для відпрацювання виявлених відхилень; визначення оптимальних керувань, які забезпечать створення керуючих сил і моменту з мінімальними енерговитратами, шляхом вирішення в бортовому обчислювачі оптимізаційної задачі з обмеженнями типу рівностей та нерівностей; реалізація оптимальних керувань системою керування.

Основна частина. У загальному випадку, поставлена задача мінімізації енергоспоживання під час виконання операцій зводиться до вирішення у реальному часі оптимізаційної задачі із заданою функцією якості керування (1), нелінійними обмеженнями типу рівностей (2) та лінійними обмеженнями типу нерівностей (3). Функція якості керування (1) являє собою залежність енергоспоживання від параметрів керувань, повинна мати глобальний мінімум або infimum , а також може мати кілька локальних екстремумів та supremum в області допустимих керувань; нелінійні обмеження типу рівностей (2) визначають необхідні керуючі сили та момент, для забезпечення допустимих відхилень від

програмних значень під час виконання операцій, а лінійні обмеження типу нерівностей (3) є обмеженнями на керування. Дана задача може бути вирішена чисельно в бортовому обчислювачі автоматизованої системи із використанням одного із відомих методів умовної оптимізації.

Розглянемо вирішення даної задачі на прикладі офшорного судна з двома кормовими азиподами та носовим підрулюючим пристроєм, рис. 1.

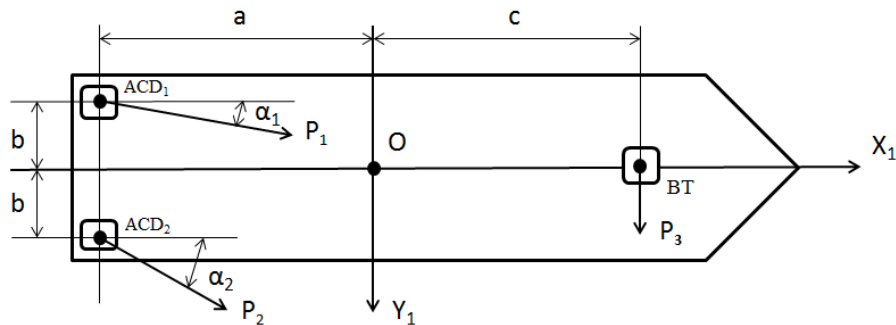


Рисунок 1 – Схема офшорного судна OSV з двома кормовими азиподами і носовим підрулюючим пристроєм

Початок зв'язаної системи координат (ЗСК) $OX_1Y_1Z_1$ розміщений у центрі обертання O , вісь OX_1 лежить у діаметральній площині судна, паралельна палубі судна і направлена в носову частину судна. Вісь OY_1 перпендикулярна діаметральній площині судна і направлена в сторону правого борту. Вісь OZ_1 доповнює систему до «правої». Надлишкова структура керування включає: перший азипод ACD_1 , положення якого у ЗСК визначається координатами $(-a, -b, 0)$; другий азипод ACD_2 , положення якого у ЗСК визначається координатами $(-a, b, 0)$ та носовий підрулюючий пристрій BT , положення якого у ЗСК визначається координатами $(c, 0, 0)$. Перший азипод ACD_1 створює вектор сили упору гвинта $\mathbf{P}_1 = (P_1 \cos \alpha_1, P_1 \sin \alpha_1, 0)$, де P_1 – модуль сили упору гвинта першого азиподу, α_1 – кут повороту першого азиподу, та має обмеження на керування $|\mathbf{P}_1| \leq P_1^{\max}$, $|\alpha_1| \leq \pi$. Другий азипод ACD_2 створює вектор сили упору гвинта $\mathbf{P}_2 = (P_2 \cos \alpha_2, P_2 \sin \alpha_2, 0)$, де P_2 – модуль сили упору гвинта другого азиподу, α_2 – кут повороту другого азиподу, та має обмеження на керування $|\mathbf{P}_2| \leq P_2^{\max}$, $|\alpha_2| \leq \pi$. Носовий підрулюючий пристрій створює бокову силу $\mathbf{P}_3 = (0, P_3, 0)$, яка обмежена величиною $|\mathbf{P}_3| \leq P_3^{\max}$.

Сумарні сили і момент надлишкової структури, рис. 1, можна записати у вигляді

$$\begin{cases} P_x = P_1 \cos \alpha_1 + P_2 \cos \alpha_2 \\ P_y = P_1 \sin \alpha_1 + P_2 \sin \alpha_2 + P_3 \\ M_z = P_1 b \cos \alpha_1 - P_2 b \cos \alpha_2 - P_1 a \sin \alpha_1 - P_2 a \sin \alpha_2 + P_3 c \end{cases}, \quad (4)$$

де P_x – сумарна поздовжня керуюча сила структури,

P_y – сумарна бокова керуюча сила структури,

M_z – сумарний керуючий момент структури у каналі рискання.

Значення P_x , P_y , M_z будемо визначати через відхилення вимірних параметрів руху судна від їх програмних значень, необхідних для виконання операцій

$$\begin{cases} P_x = k_1(X_m - X^*) + k_2(V_{xm} - V_x^*) + k_3 \int_0^{\infty} (X_m - X^*) dt \\ P_y = k_4(Y_m - Y^*) + k_5(V_{ym} - V_y^*) + k_6 \int_0^{\infty} (Y_m - Y^*) dt \\ P_z = k_7(\varphi_m - \varphi^*) + k_8(\omega_{zm} - \omega_z^*) + k_9 \int_0^{\infty} (\varphi_m - \varphi^*) dt \end{cases}, \quad (5)$$

де $k_1 - k_9$ – коефіцієнти підсилення ПІД-регулятора (5), X_m, Y_m, φ_m – вимірні лінійні та кутове положення судна, $V_{xm}, V_{ym}, \omega_{zm}$ – вимірні лінійні швидкості та кутова швидкість ристання, X^*, Y^*, φ^* – програмні положення судна, V_x^*, V_y^*, ω_z^* – програмні швидкості судна.

До складу системи (4) входить п'ять керувань: $P_1, \alpha_1, P_2, \alpha_2, P_3$. Кількість рівнянь системи (4) (кількість ступенів свободи, що підлягають керуванню) – три. Отже, надлишковість керування структури $5-3=2$. Цю надлишковість будемо використовувати для оптимізації енергоспоживання на виконання операцій.

У якості цільової функції будемо використовувати функцію

$$E(P_1, P_2, P_3) = P_1^2 + P_2^2 + P_3^2, \quad (6)$$

пропорційну потужності виконавчих пристроїв і енерговитратам.

Обмеження на керування структури матимуть вигляд

$$\begin{cases} -P_1^{\max} \leq P_1 \leq P_1^{\max} \\ -\pi \leq \alpha_1 \leq \pi \\ -P_2^{\max} \leq P_2 \leq P_2^{\max} \\ -\pi \leq \alpha_2 \leq \pi \\ -P_3^{\max} \leq P_3 \leq P_3^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

Для оптимізації цільової функції (6) з нелінійними обмеженнями типу рівностей (4) та лінійними обмеженнями типу нерівностей (7) використана функція MATLAB

$$f \min \text{con}(@ \text{fun}, \mathbf{x0}, \mathbf{A}, \mathbf{b}, \mathbf{A}_{eq}, \mathbf{b}_{eq}, \mathbf{lb}, \mathbf{ub}, @ \text{nonlcon}) \quad (8)$$

де $@ \text{fun}$ – посилання на функцію (5), що підлягає оптимізації;

$\mathbf{x0} = (P_1(0), \alpha_1(0), P_2(0), \alpha_2(0), P_3(0))$ – початковий вектор параметрів оптимізації;

\mathbf{A} – матриця системи лінійних обмежень типу нерівностей, у нашому випадку відсутня;

\mathbf{b} – вектор правої частини системи лінійних обмежень типу нерівностей, у нашому випадку відсутній;

\mathbf{A}_{eq} – матриця системи лінійних обмежень типу рівностей, у нашому випадку відсутня;

\mathbf{b}_{eq} – вектор правої частини системи лінійних обмежень типу рівностей, у нашому випадку відсутній;

$\mathbf{lb} = (-P_1^{\max}, -\pi, -P_2^{\max}, -\pi, -P_3^{\max})$ – нижні значення параметрів керувань;

$\mathbf{ub} = (P_1^{\max}, \pi, P_2^{\max}, \pi, P_3^{\max})$ – верхні значення параметрів керувань;

@ *nonlcon* – посилання на файл із системою (4) нелінійних обмежень типу рівностей.

Математичне моделювання процесів динамічного позиціонування з оптимізацією енергоспоживання. Математичне моделювання проводилося в замкнутому контурі «Об’єкт керування – Система керування», створеному в середовищі MATLAB. У якості об’єкту керування використовувалася математична модель судна ESNAAD-224, характеристики якого наведені у таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристики судна ESNAAD-224

Параметр	Значення
Пропульсивна установка	Два азиподи SCHOTTEL Azimuth Thrusters electrically driven, тип: SRP 1012 R/R, потужність: 1250 КВт, кут повороту 360 градусів.
Гвинт	Фіксованого кроку, діаметр 2100 мм, кількість лопатей: 4.
Система керування	SCHOTTEL Steering System, тип SST 612, потужність: 45 КВт.
Підрулюючі пристрої	Три SCHOTTEL Tunnel thrusters electrically driven, тип: STT 002, потужність: 600 КВт, Швидкість: 1770 об/хв, гвинт фіксованого кроку, діаметр гвинта 1540 мм.
Максимальне водовиміщення	4020 т.
Максимальна швидкість	13 вуз.
Витрати палива	16т/добу @ max. швидкість 13 вуз.
Максимальна осадка	4,85 м.

На рис. 2 наведені результати математичного моделювання у середовищі MATLAB у вигляді графіків зміни у часі параметрів руху судна, керувань і витрат палива для трьох схем: оптимального керування (графіки синього кольору), рівно-векторного керування (графіки зеленого кольору) та рівно-модульного керування з ортогональними векторами (графіки червоного кольору).

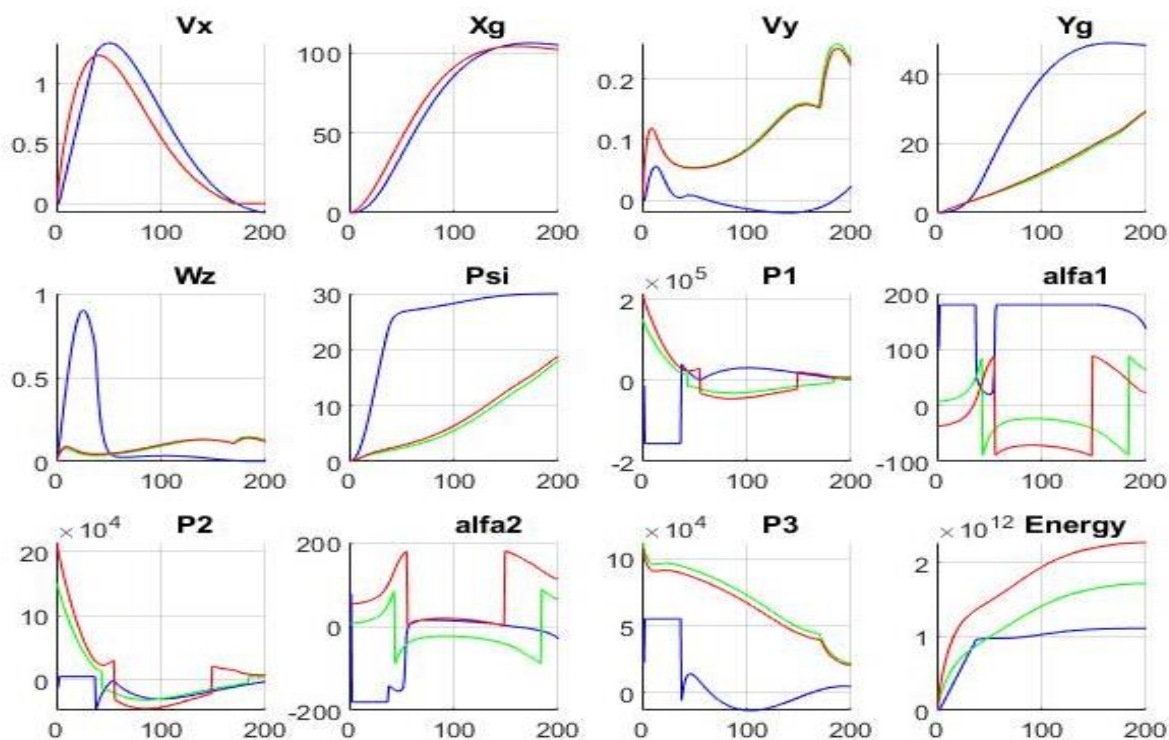


Рисунок 2 – Графіки зміни у часі параметрів руху судна для трьох схем керування

На графіках зображені: поздовжня швидкість судна $V_x [м/с]$, поздовжнє переміщення $X_g [м]$, бокова швидкість $V_y [м/с]$, бокове переміщення $Y_g [м]$, кутова швидкість рискання $\omega_z [гр/с]$, кут рискання (курс) $\phi [гр]$, сила упору гвинта $P_1 [н]$ та кут повороту $\alpha_1 [гр]$

першого азиподу, сила упору гвинта $P_2[n]$ та кут повороту $\alpha_2[gp]$ другого азиподу, сила упору гвинта носового підрулюючого пристрою $P_3[n]$ та значення цільової функції (6) Energy, пропорційної витратам палива. Початкові значення параметрів руху судна становлять: поздовжня швидкість $V_x(0) = 0 м/с$, поздовжнє переміщення $X_g(0) = 0 м$, бокова швидкість $V_y(0) = 0 м/с$, бокове переміщення $Y_g(0) = 0 м$, кутова швидкість рискання $\omega_z(0) = 0 gp/c$, кут рискання (курс) $\varphi(0) = 0 gp/c$. Як видно із наведених графіків, судно спочатку переміщується в позицію динамічного позиціонування з параметрами: поздовжня швидкість $V_x(t) = 0 м/с$, поздовжнє переміщення $X_g(t) = 100 м$, бокова швидкість $V_y(t) = 0 м/с$, бокове переміщення $Y_g(t) = 50 м$, кутова швидкість рискання $\omega_z(t) = 0 gp/c$, кут рискання (курс) $\varphi(0) = 30 gp/c$ та у подальшому підтримує її. При цьому, як видно з графіку Energy(t), найбільше значення цільової функції для оптимального керування становить $\int_0^t E(t)dt = 1.1e^{12}[н^2c]$, найбільше значення цільової функції для рівно-

векторного керування становить $\int_0^t E(t)dt = 1.7e^{12}[н^2c]$ та найбільше значення цільової функції для рівно-модульного керування з ортогональними векторами становить $\int_0^t E(t)dt = 2.2e^{12}[н^2c]$.

Результати математичного моделювання показують, що оптимальне керування надлишковою структурою з цільовою функцією мінімального енергоспоживання дозволяє знизити енергоспоживання на (35–50)%, у порівнянні з не оптимальними керуваннями.

Основні результати та їх обговорення. Розроблено метод оптимального керування надлишковою структурою виконавчих пристроїв судна, який дозволяє на (35–50)% зменшити енерговитрати на виконання операцій. Отриманий результат пояснюється знаходженням оптимальних керувань, що мінімізують енергоспоживання, шляхом вирішення в бортовому обчислювачі автоматизованої системи оптимізаційної задачі з лінійними та нелінійними обмеженнями на параметри керування, використанням знайдених оптимальних керувань для виконання операцій. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що використовують надлишкові керування для мінімізації енергоспоживання. Метод розроблений для використання в бортовому обчислювачі автоматизованої системи судна з надлишковими структурами керування і не може використовуватися на суднах, що не мають надлишкового керування, або для ручного керування. Отримані результати є відтворюваними і можуть використовуватися при розробці модулів оптимального керування рухом для мінімізації енергоспоживання. Подальші дослідження можуть бути пов'язані з використанням інших функцій якості керування та інших надлишкових структур.

Висновки. Проведено аналіз літературних джерел, у яких розглядалися питання оптимального керування, у тому числі із використанням надлишкових структур виконавчих пристроїв. Встановлено, що найближчі технічні рішення реалізовані в системах динамічного позиціонування виробників Navis, Marine Technologies, Rolls Royce, Transas, Consberg. Разом з тим, відомі рішення не дозволяють використовувати надлишкові керування для мінімізації енергоспоживання. Запропоновано метод мінімізації енергоспоживання за рахунок використання надлишковості керування. Метод перевірено на прикладі мінімізації енергоспоживання судна з надлишковою структурою двох кормових азиподів та носового підрулюючого пристрою. Результати моделювання показали, що запропонований метод дозволяє на (35–50)% зменшити енерговитрати. Отриманий результат пояснюється:

використанням бортового обчислювача; знаходженням на кожному кроці бортового обчислювача оптимальних керувань, що мінімізують енергоспоживання, шляхом вирішення оптимізаційної задачі з обмеженнями на параметри керування, використанням знайдених оптимальних керувань для виконання операцій. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у розробці методу мінімізації енергоспоживання, за рахунок використання надлишкового керування. Практичне значення отриманих результатів полягає у перевірці працездатності та ефективності розробленого методу математичним моделюванням та можливості його використання у бортовому обчислювачі автоматизованої системи керування рухом судна для мінімізації енергоспоживання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Vidoza J. A., Andreasen J. G., Haglind F., Reis M., Gallo W., Design and optimization of power hubs for Brazilian off-shore oil production units, *Energy*. 2019, 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.022>.
2. Kai L., Yanyun Y., Yunlong W., Zhenwu H. Research on structural optimization method of FRP fishing vessel based on artificial bee colony algorithm, *Advances in Engineering Software*. 2018, 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.03.011>.
3. Feng Y., Chen Z., Dai Yi, Wang F., Cai J., Shen Z. Multidisciplinary optimization of an offshore aquaculture vessel hull form based on the support vector regression surrogate model, *Ocean Engineering*. 2018, 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.062>.
4. Ma Y., Bi H., Hu M., Zheng Y., Gan L. Hard sail optimization and energy efficiency enhancement for sail-assisted vessel, *Ocean Engineering*. 2019, 687–699. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.026>.
5. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Saprnov O., Petrovskyi A., Ivanov A., Tymofeiev K. Development of automatic control methods of vessel rotation around the pivot point without drift. *Technology Audit and Production Reserves*. 2022, 6(2(68)), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.
6. Zinchenko S. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O., Mateichuk V. M. Automatic control of the vessel's movement under external conditions // Науковий вісник ХДМА, №2(21), 2019. с. 10–15. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015>. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>.
7. Moiseenko V. S., Zinchenko S. M., Tovstokoryi O. M. Automatic beam control of laser-optical position reference system, Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of Power Plants and TE of Odessa National Maritime University MPP & O-2020, April 2020, Odessa-Istambul-Odessa. <https://drive.google.com/file/d/1HEX2RVuA1KV5JjMfQcqYZ1f4SCFMcy6a/view>.
8. Zinchenko S., Tovstokoryi O. 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.
9. Luo M., Shin S. Half-century research developments in maritime accidents: Future directions, *Accident Analysis & Prevention*. 2019, 448–460. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.010>.
10. Jacobellis G., Gandhi F., Floros M. Using Control Redundancy for Power and Vibration Reduction on a Coaxial Rotor Helicopter at High Speeds, *Journal of the American Helicopter Society*, 2019. <https://doi.org/10.4050/JAHS.64.032008>.
11. Gao W., Tang Q., Yao J., Yang Y. Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101862>.

12. Pakaste R., Laukia K., Wilhelmson M., Kuuskoski J. Experience with Azipod® propulsion systems on board marine vessels, *Marine Propulsion*. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/4956/a88815fe21a86883277042d8cd304a35efc5.pdf>.
13. IMCA Marine Division: Guidelines for the design and operation of dynamically positioned vessels. *The International Marine Contractors Association*, 2019. <https://www.imca-int.com/product/guidelines-for-the-design-and-operation-of-dynamically-positioned-vessels/>.
14. Cheng X., Deng S., Cheng B., Meiqian L., Zhou R. Optimization of bias current coefficient in the fault-tolerance of active magnetic bearings based on the redundant structure parameters, *Automatika*, 2020, 602–613. <https://doi.org/10.1080/00051144.2020.1806012>.
15. Santos M. F., Santos Neto A. F., Honorio L., Silva M. F., Mercorelli P. Robust and Optimal Control Designed for Autonomous Surface Vessel Prototypes, *IEEE Access*, 2023, (99):1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239591>.
16. Rigatos G. A nonlinear optimal control approach for underactuated offshore cranes, *Ships and Offshore Structures*, 2022. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2150420>.
17. Bao X., Jiang C. Time-Optimal Control Algorithm of Aircraft Maneuver, in book: *Advances in Guidance, Navigation and Control, Proceedings of 2022 International Conference on Guidance, Navigation and Control*, 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2_454.
18. Bartels S., Helling S., Meurer T. Inequality Constrained Optimal Control for Rope-Assisted ASV Docking Maneuvers, *IFAC-PapersOnLine*, 2023, pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.407>.
19. Leparoux C., Herisse B., Jean F. Structure of optimal control for planetary landing with control and state constraints, *ESAIM Control Optimisation and Calculus of Variations*, 2022. <https://doi.org/10.1051/cocv/2022065>.
20. Huang W., Xu H., Wang J., Miao C., Ren Y., Wang L. Redundancy Management for Fault-tolerant Control System of an Unmanned Underwater Vehicle, *5th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE): Proceedings*, China, 19–20 Sept. 2020. <https://doi.org/10.1109/CACRE50138.2020.9230038>.
21. Li W., Shi G. Redundancy management strategy for electro-hydraulic actuators based on intelligent algorithms, *Advances in Mechanical Engineering*, 2020. <https://doi.org/10.1177/1687814020930455>.
22. Piloting Vessels Fitted with Azimuthing Control Devices (ACD's). *United Kingdom Maritime Pilot's Association (UKMPA)*, Transport House, London, 2013. <https://www.yumpu.com/en/document/view/13677403/piloting-vessels-fitted-with-azimuthing-control-devices-acds>.
23. Navi – Trainer 5000. Transas offshore simulator. Instructor manual. *Transas MIP Ltd*. 2012. https://cyberonboard.com/wp-content/uploads/NT_5000_5_35_Instructor_Manual_eng.pdf.

REFERENCES

1. Vidoza, J. A., Andreasen, J. G., Haglind, F., Reis, M., Gallo, W. (2019). Design and optimization of power hubs for Brazilian off-shore oil production units, *Energy*, 656–666. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.022>.
2. Kai, L., Yanyun, Y., Yunlong, W., Zhenwu, H. (2018). Research on structural optimization method of FRP fishing vessel based on artificial bee colony algorithm, *Advances in Engineering Software*, 250–261. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2018.03.011>.
3. Feng, Y., Chen, Z., Dai, Yi, Wang, F., Cai, J., Shen, Z. (2018). Multidisciplinary optimization of an offshore aquaculture vessel hull form based on the support vector regression surrogate model, *Ocean Engineering*, 145–158. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.062>.
4. Ma, Y., Bi, H., Hu, M., Zheng, Y., Gan, L. (2019). Hard sail optimization and energy efficiency enhancement for sail-assisted vessel, *Ocean Engineering*, 687–699. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.01.026>.

5. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Saprnov, 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*, 6(2(68)), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.
6. Zinchenko, S. M., Mamenko, P. P., Grosheva, O. O., Mateichuk, V. M. (2019). Automatic control of the vessel's movement under external conditions, *Naukovyi Visnyk KSMA*, №2(21), s. 10–15. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015>. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>.
7. Moiseenko, V. S., Zinchenko, S. M., Tovstokoryi, O. M. (2020). Automatic beam control of laser–optical position reference system, *Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of Power Plants and TE of Odessa National Maritime University MPP & O-2020*, April 2020, Odessa-Istambul-Odessa. <https://drive.google.com/file/d/1HEX2RVuA1KV5JmFQcqYZ1f4SCFMcy6a/view>.
8. 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
9. Luo, M., Shin, S. (2019). Half-century research developments in maritime accidents: Future directions, *Accident Analysis & Prevention*, 448–460. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.04.010>.
10. Jacobellis, G., Gandhi, F., Floros, M. (2019). Using Control Redundancy for Power and Vibration Reduction on a Coaxial Rotor Helicopter at High Speeds, *Journal of the American Helicopter Society*. <https://doi.org/10.4050/JAHS.64.032008>.
11. Gao, W., Tang, Q., Yao, J., Yang, Y. (2020). Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101862>.
12. Pakaste, R., Laukia, K., Wilhelmson, M., Kuuskoski, J. (1999) Experience with Azipod® propulsion systems on board marine vessels, *Marine Propulsion*. <https://library.e.abb.com/public/2314773146eb2d77c1256ec300341511/12-18%20ENG%209902.pdf>.
13. IMCA Marine Division: Guidelines for the design and operation of dynamically positioned vessels. (2019). The International Marine Contractors Association. <https://www.imca-int.com/product/guidelines-for-the-design-and-operation-of-dynamically-positioned-vessels/>.
14. Cheng, X., Deng, S., Cheng, B., Meiqian, L., Zhou, R. (2020). Optimization of bias current coefficient in the fault-tolerance of active magnetic bearings based on the redundant structure parameters, *Automatika*, 602–613. <https://doi.org/10.1080/00051144.2020.1806012>.
15. Santos, M. F., Santos Neto, A. F., Honorio, L., Silva, M. F., Mercorelli, P. (2023). Robust and Optimal Control Designed for Autonomous Surface Vessel Prototypes, *IEEE Access*, (99):1–1. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3239591>.
16. Rigatos, G. A. (2022). Nonlinear optimal control approach for underactuated offshore cranes, *Ships and Offshore Structures*. <https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2150420>.
17. Bao, X., Jiang, C. (2023). Time-Optimal Control Algorithm of Aircraft Maneuver, in book: *Advances in Guidance, Navigation and Control*, Proceedings of 2022 International Conference on Guidance, Navigation and Control. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6613-2_454.
18. Bartels, S., Helling, S., Meurer, T. (2023). Inequality Constrained Optimal Control for Rope-Assisted ASV Docking Maneuvers, *IFAC-PapersOnLine*, pp. 44–49. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.407>.
19. Leparoux, C., Herisse, B., Jean, F. (2022). Structure of optimal control for planetary landing with control and state constraints, *ESAIM Control Optimisation and Calculus of Variations*. <https://doi.org/10.1051/cocv/2022065>.
20. Huang, W., Xu, H., Wang, J., Miao, C., Ren, Y., Wang, L. (2020). Redundancy Management for Fault-tolerant Control System of an Unmanned Underwater Vehicle, 5th

International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE): Proceedings, China, 19–20 Sept. 2020. <https://doi.org/10.1109/CACRE50138.2020.9230038>.

21. Li, W., Shi, G. (2020). Redundancy management strategy for electro-hydraulic actuators based on intelligent algorithms, *Advances in Mechanical Engineering*. <https://doi.org/10.1177/1687814020930455>.

22. Piloting Vessels Fitted with Azimuthing Control Devices (ACD's). (2013). United Kingdom Maritime Pilot's Association (UKMPA), Transport House, London. <https://www.yumpu.com/en/document/view/13677403/piloting-vessels-fitted-with-azimuthing-control-devices-acds>.

23. Navi – Trainer 5000. Transas offshore simulator. Instructor manual. (2012). Transas MIP Ltd. https://cyberonboard.com/wp-content/uploads/NT_5000_5_35_Instructor_Manual_eng.pdf.

Zinchenko S. M. USING REDUNDANT CONTROL TO MINIMIZE ENERGY CONSUMPTION

Reducing energy consumption in maritime transport, as well as the associated emission reductions and environmental improvements, are particularly relevant. The ways of solving these issues are different, but most often structural solutions, hydrodynamic solutions, sails, or modern power plants are used. Reducing energy consumption can also be achieved due to proper route planning, psychological training of the crew, automation of traffic control processes. The article proposes a method to minimize energy consumption using redundant control. Redundant structures of actuating devices are widely used on modern ships, in particular, on ships with a dynamic positioning system. Traditional purpose of redundant structures is to increase the reliability of the actuating control system and increase the maneuverability of the vessel. The proposed method also uses redundant structures available on ships to minimize fuel consumption. The subject of research are models and methods of optimizing energy consumption, due to the use of redundant control. The aim of the study is to minimize energy consumption for operations. To solve the problem, a systematic approach, analysis and synthesis, imaginary experiment, methods of automatic control theory, numerical methods of conditional optimization, and mathematical modeling were used. The scientific novelty of the obtained results consists in the development of a method for determining optimal controls that minimize energy costs for performing operations by solving optimization problem with constraints in the on-board computer of the automatic or automated control system, unlike known solutions, it uses redundant controls for optimization and allows reducing energy costs by (35–50) %. At the same time, the additional load on the calculation cycle of the on-board computer does not exceed (25–50) ms, which is (2.5–5) % of the total load. The practical value of the obtained results consists in checking the workability and efficiency of the developed method by mathematical modeling and the possibility of its use in the on-board computer of the automated ship motion control system with redundant structures of actuating devices.

Key words: intelligent transport systems; navigation safety; human factor; loss of stability; regular disturbance; restoring moment.

© Зінченко С. М.

Статтю прийнято до редакції 24.06.2024

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ
TRANSPORT TECHNOLOGIES

УДК 656.61.052

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ФОРМУВАННЯ ВАНТАЖНИХ ПЛАНІВ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ

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;

Соколов А. В., аспірант, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: arthursokolov7@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3115-3854.

У статті досліджуються питання створення системи підтримки прийняття рішень (СППР) з формування вантажних планів контейнеровозів. Визначені пріоритетні напрями наукових досліджень в галузі оптимізації процесів керування вантажними операціями контейнеровозів. Показано, що ключовою проблемою в оптимізації морських контейнерних перевезень є проблема формування оптимальних вантажних планів. Розглянуті особливості процесу побудови плану розміщення вантажів на контейнеровозі та принципи його корегування для випадку мультипортових контейнерних перевезень. Запропоновані підходи щодо оптимізації процесу формування вантажного плану контейнеровозу. Визначено, що проблема формування оптимального вантажного плану судна полягає в розв'язанні множини складних взаємопов'язаних задач багатокритеріальної оптимізації. Із застосуванням системного підходу до аналізу процесу формування вантажного плану судна, визначено ключові чинники впливу на нього. Виходячи з визначених особливостей процесів обробки інформації при формуванні вантажного плану контейнеровозу, а також специфіки його створення та корегування в умовах здійснення мультипортових перевезень, розроблено структуру СППР для керування таким процесом та визначено перелік її основних функцій. Запропоновано використання гнучких стратегій вибору оптимізаційних процедур, що враховують вплив пріоритетів судновласника на процес формування вантажного плану судна. Визначені перспективні напрямки подальших наукових досліджень в зазначеній галузі.

Ключові слова: система підтримки прийняття рішень; вантажний план контейнеровозу; вантажні операції судна; багатокритеріальна оптимізація; мультипортові перевезення; безпека судноплавства.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.175-184

Вступ. Постійне зростання обсягів сучасних морських контейнерних перевезень та ускладнення їх логістичних ланцюжків, що пов'язане з істотним збільшенням контейнеромісткості сучасних суден контейнеровозів, яке може досягати до 24000 TEU (20-ти футових контейнерних одиниць або 20" контейнерів), обумовлює нагальну потребу в розв'язанні низки теоретичних та практичних задач, пов'язаних з підвищенням економічної ефективності та безпечності таких перевезень [1, 2]. Однією з ключових складових успішного розв'язання вказаних задач є розробка математичних моделей, методів та інформаційних технологій формування вантажних планів суден-контейнеровозів. З огляду на вищевказане, актуальною проблемою сьогодення є створення систем підтримки прийняття рішень (СППР) з керування процесами побудови вантажних планів. Зазначені питання викликають суттєвий інтерес серед науковців та фахівців у галузі морських контейнерних перевезень, про що свідчить значна кількість наукових досліджень з різними теоретичними підходами до вирішення вказаних задач [1–28].

Постановка проблеми. Підвищення економічної ефективності та безпечності морських контейнерних перевезень є одними із ключових питань сучасного судноплавства. Забезпечення їх вирішення потребує, перш за все, раціональної організації вантажних операцій контейнерного флоту, що в свою чергу, обумовлює потребу в оптимізації процесів формування вантажних планів контейнеровозів, особливо для складних логістичних ланцюжків перевезень. Найбільшої актуальності зазначене питання набуває для галузі мультипортових контейнерних перевезень, які характеризуються як складністю формування початкового вантажного плану судна, так і потребою в його подальшому корегуванні в наступних портах виконання рейсу.

Нераціональний вантажний план судна призводить до необхідності виконання зайвих вантажних операцій у портах, що призведе до додаткових, як прямих, так і опосередкованих

економічних втрат. Крім того, наявність зайвих вантажних операцій погіршує безпекову складову виконання рейсу, тому оптимізація структури вантажних планів вкрай важлива. Перспективним шляхом вирішення вищезазначених проблем є створення спеціалізованих СППР з формування вантажних планів контейнеровозів. Разом з тим, розробка таких СППР потребує проведення ґрунтовного аналізу наявного досвіду їх створення та практичного запровадження, а також вивчення особливостей процесів побудови та корегування вантажних планів суден, що і обумовило вибір головної мети, об'єкту та предмету дослідження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Значний інтерес до створення нових математичних моделей, методів, інформаційних систем та СППР у напрямку керування вантажними операціями контейнеровозів виник на початку ХХІ століття, що обумовлено швидким розвитком сучасних інформаційних технологій і методів імітаційного моделювання та їх глибокою інтеграцією у процеси розв'язання реальних практичних задач у галузі морських перевезень. Основними напрямками, за якими відбувались дослідження з оптимізації процесів керування вантажними операціями контейнеровозів, стали наступні:

- розробка математичних моделей та методів оптимізації структури вантажних планів контейнеровозів та правил їх формування [3–10];
- керування логістикою контейнерних перевезень [11, 12];
- керування розміщенням контейнерів на судні у відповідності до правил сегрегації небезпечних, спеціалізованих вантажів та вантажів з особливими умовами перевезення [13, 14];
- планування мультипортових перевезень та перевезень на внутрішніх водних шляхах [9, 10, 15–17];
- моніторинг та контроль низки параметрів судна, що впливають на його остійність та збереження морехідних якостей: метацентрична висота, осадка, крен та диферент [17, 18];
- оптимізація процесів здійснення вантажних операцій на судні та в портових терміналах [19–21];
- контроль та оптимізація економічних показників контейнерних перевезень [22, 23].

Слід зазначити, що ключовою проблемою, яка безпосередньо пов'язана з усіма вищезазначеними напрямками, була і залишається проблема створення раціонального (або оптимального) вантажного плану судна-контейнеровозу, оскільки саме вантажний план є «серцем» для усіх вищезазначених напрямів і саме від нього, у найбільшій мірі, залежить їх успішна реалізація [24–28].

Приймаючи до уваги ті обставини, що зазначена проблема носить комплексний характер та потребує одночасного вирішення низки складних та взаємопов'язаних задач багатокритеріальної оптимізації, активного розвитку набуває напрям розробки та впровадження відповідних СППР [1, 2, 24–28].

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка структури СППР з формування вантажних планів контейнеровозів в умовах мультипортових контейнерних перевезень та визначення особливостей її практичної реалізації. Досягнення поставленої мети передбачає необхідність вирішення наступних задач:

1. Визначення особливостей процесу побудови плану розміщення вантажів на контейнеровозі та методів його корегування.
2. Визначення базових принципів оптимізації вантажного плану контейнеровозу при мультипортових перевезеннях для поліпшення економічної ефективності виконання рейсу.
3. Розробка структури СППР з формування оптимального вантажного плану контейнеровозу для мультипортових контейнерних перевезень.

Об'єктом дослідження є СППР для вирішення задач створення вантажних планів контейнеровозів.

Предметом дослідження є процеси формування оптимальних вантажних планів контейнеровозів у СППР в умовах здійснення мультипортових перевезень.

Виклад основного матеріалу. Вантажний план контейнеровозу визначає порядок та особливості розміщення контейнерів на борту судна під час виконання рейсу. Контейнери зазвичай розміщуються як у трюмах, так і на палубі, а їх конкретне розташування залежить від конструктивних особливостей судна та типу самих контейнерів (рис. 1).

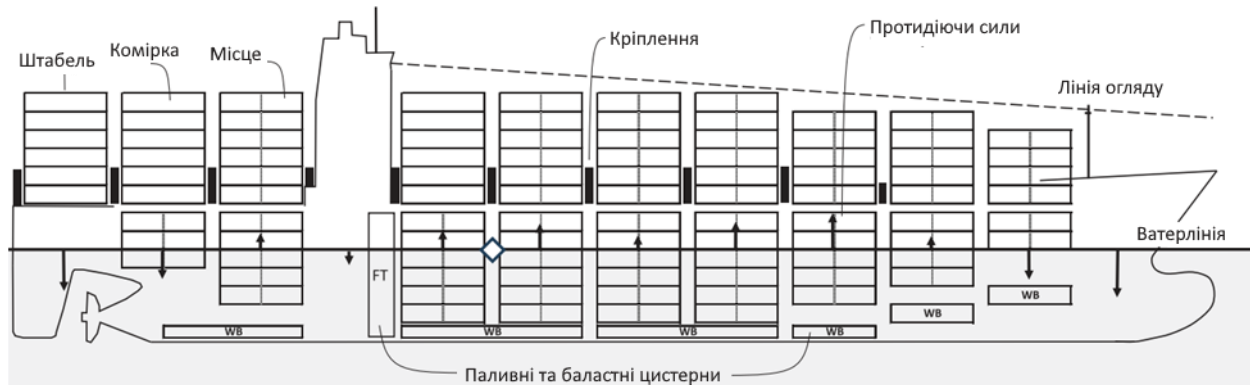


Рисунок 1 – Узагальнений вигляд вантажного плану контейнеровозу

Найбільш розповсюдженими є три типорозміри контейнерів за довжиною: 20", 40" і 45" та два типорозміри за висотою: 8,6" та 9,6". Стандартними є контейнери 20" і 40" довжини та 8,6" висоти. Вага одного контейнеру зазвичай знаходиться в діапазоні від 5 до 30 тон. Контейнери складаються в штабелі, при цьому для стандартних контейнерів кожна вантажна комірка може бути зайнята одним 40" або двома 20" контейнерами (рис.1). Крім того, контейнери можуть бути рефрижераторного типу – у цьому випадку вони мають стандартні типорозміри і можуть бути розміщені лише в окремих, заздалегідь пристосованих для цього місцях на судні, які обладнані джерелами електричного живлення. Для розв'язання задачі формування оптимального вантажного плану контейнеровозу, зазвичай розглядаються лише контейнери стандартних типорозмірів (тобто 20" або 40" довжини та 8,6" висоти), які можуть бути звичайного або рефрижераторного типу. Для спрощення виконання СППР процедур з розрахунку дотримання вимог остійності судна, всі контейнери доцільно заздалегідь окремо розподіляти на кілька вагових груп за їх максимально припустимою вагою: 5, 10, 15, 20, 25, 30 тон відповідно [1].

Слід зазначити, що при складанні вантажного плану контейнеровозу необхідно враховувати низку обов'язкових та додаткових обмежень, які можна структурувати наступним чином [4].

1. Дотримання вимог збереження міцності корпусу судна та врахування його конструктивних особливостей (поздовжня міцність корпусу, вигинаючі моменти, міцність палуби, розташування кришок люків та місць кріплення контейнерів тощо).

2. Дотримання вимог до збереження остійності судна (контроль припустимих меж для метацентричної висоти, осадки, крену та диференту).

3. Врахування послідовності завантаження-вивантаження контейнерів у відповідності з портами під час виконання рейсу (мінімізація «шифті́нгу» – зайвих технологічних переміщень одних контейнерів з метою отримання доступу до інших).

4. Дотримання технологічних вимог до взаємного розташування і кріплення 20-ти та 40-ка футових контейнерів, а також контейнерів збільшеної висоти та довжини.

5. Врахування вимог, пов'язаних з сегрегацією вантажів та розміщенням небезпечних вантажів на судні.

6. Розміщення рефрижераторних та спеціалізованих контейнерів у заздалегідь призначених для них місцях.

7. Штабелювання контейнерів, які розташовані на палубі судна повинно здійснюватись з урахуванням граничних навантажень на палубу, та таким чином, щоб вони не перекривали лінію огляду з навігаційного містка (рис. 1).

8. Додатково при формуванні вантажного плану судна бажано враховувати характеристики вантажного обладнання та порядок здійснення вантажних робіт у портах призначення з метою зменшення витрат часу на його завантаження та розвантаження.

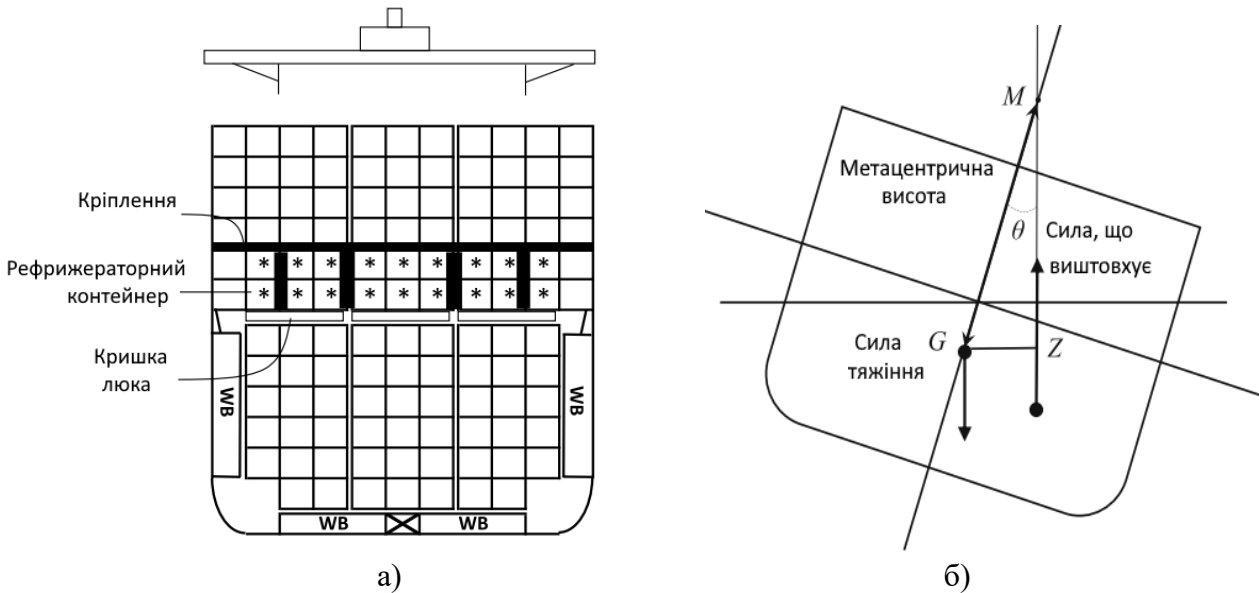


Рисунок 2 – Дотримання технологічних вимог з розміщення контейнерів на судні

На рис. 2 проілюстровано базові принципи виконання окремих технологічних вимог до складання вантажного плану контейнеровозу. На рис. 2(а) показано, що розміщення контейнерів повинно здійснюватись з урахуванням конструктивних особливостей наявних на судні кріплень, а розміщення спеціалізованих контейнерів – лише у заздалегідь обладнаних місцях (наприклад, наявність мережі електроживлення для рефрижераторних контейнерів). На рис. 2(б) проілюстровано вплив вантажу на параметри остійності судна – кут крену Θ та метацентричну висоту M (також ще обов'язково необхідно враховувати і інші параметри, такі як диферент та осадку корпусу). Частково корекція кута Θ та метацентричної висоти можуть бути здійснені за рахунок зміни кількості та розподілу баласту, що знаходиться в баластних танках судна WB, які розташовані в різних місцях корпусу (рис. 2(а)).

У випадку формування вантажного плану для рейсу судна, що відбувається між кількома портами, процес його побудови дещо ускладнюється, оскільки в проміжних портах можливе здійснення додаткових вантажних операцій, які потребують внесення змін до вже сформованого вантажного плану, і відповідно виникає потреба його корегування у кожному з проміжних портів. При цьому дуже важливим питанням є зменшення кількості «шифтінгу», тобто нераціональних, але технологічно необхідних переміщень контейнерів [10]. Зменшення шифтінгу можна досягти шляхом запровадження двохетапних процедур побудови вантажних планів [7, 24], при цьому спочатку виконується формування огрублених варіантів вантажних планів, або майстер планів, а далі здійснюються процедури їх послідовного уточнення в кожному з портів для розміщення кожного контейнеру в окрему комірку, і, таким чином, формується вже остаточний варіант вантажного плану. Послідовність етапів обробки інформації для такого випадку наведена на рис. 3.

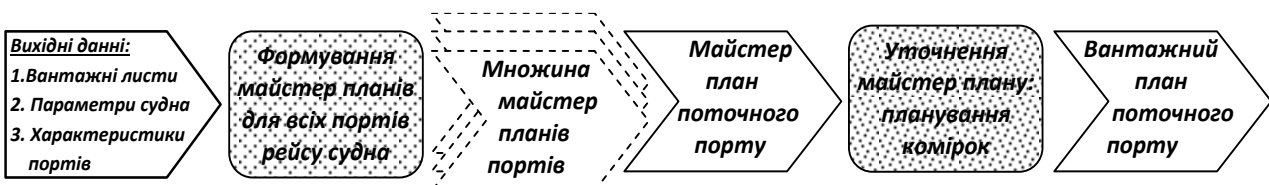


Рисунок 3 – Послідовність етапів обробки інформації при формуванні вантажного плану контейнеровозу в умовах здійснення мультипортів перевезень

Виходячи з вищенаведеного, можна дійти до висновку, що проблема формування оптимального (або раціонального) вантажного плану потребує одночасного комплексного вирішення низки складних взаємопов'язаних задач багатокритеріальної оптимізації, що можливо лише за умов ретельного врахування впливу отриманих розв'язків кожної з них на кінцевий результат, тобто, власне, вантажний план.

Розглядаючи процес формування вантажного плану контейнеровозу з позицій системного підходу, пропонується застосування наступної структурно-логічної схеми для аналізу впливу його окремих складових та оптимізації в цілому (рис. 4).

У зазначеному процесі можна виділити два взаємопов'язаних комплекси складових впливу. Перший визначає технологічну складову і чітке виконання його вимог носить обов'язковий характер. Другий комплекс відповідає за формування експлуатаційної складової вантажного плану і має більш варіативний характер.

Слід зазначити, що не завжди процес формування вантажного плану розпочинається з виконання вимог комплексу технологічних складових (хоча на практиці у більшості випадків відбувається саме так). Іноді домінантним фактором прийняття рішень для судовласника (або компанії – перевізника вантажів) виступають економічні показники виконання рейсу (максимізація прибутку за умов мінімізації витрат), і в такому разі процес формування вантажного плану контейнеровозу розпочинається з його експлуатаційної складової: визначаються логістичні ланцюжки перевезень, проводиться аналіз та оптимізація послідовності виконання вантажних робіт, розраховуються економічні показники прибутковості рейсу судна. І лише на другому етапі проробляється технологічний цикл, який вже повинен забезпечити дотримання необхідних технологічних вимог виконання створеного логістичного ланцюжка перевезень. Також можливі випадки, в яких пріоритетним буде фактор часу поставок товарів, і в такому разі, головним чинником стане оптимізація здійснення вантажних операцій у портах, з метою мінімізації часу виконання рейсу.

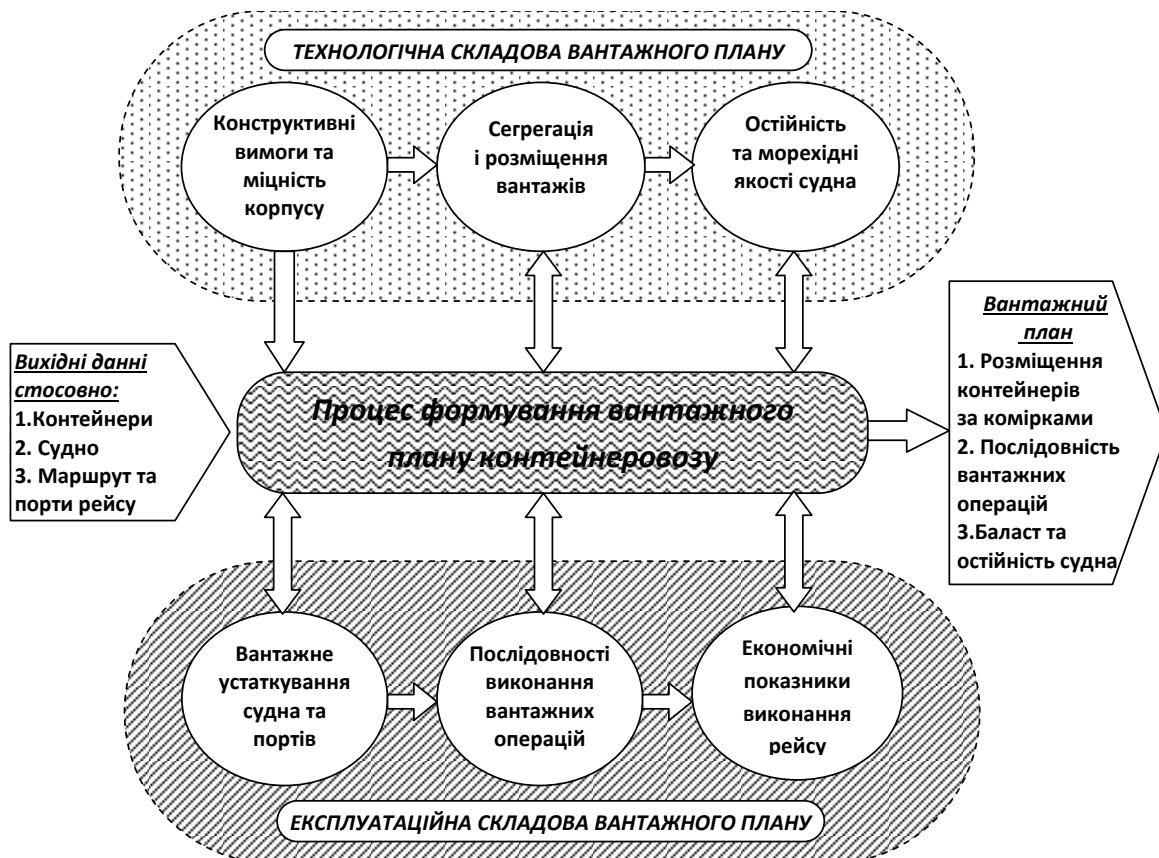


Рисунок 4 – Структура процесу формування вантажного плану контейнеровозу та взаємозв'язок основних чинників впливу на нього

Таким чином, наразі існують нагальні потреби врахування різних запитів практики при керуванні процесом формування вантажних планів контейнеровозів. Постає проблема розробки гнучких оптимізаційних стратегій вибору пріоритетів у прийнятті рішень, які повинні враховувати при плануванні перевезень вантажів існуючі потреби судовласника. Одним з найбільш доцільних шляхів вирішення вищезазначеної проблеми є створення спеціалізованих СППР, особливо для планування мультипортових перевезень, що відрізняються складною структурою процесу планування та необхідністю внесення постійних змін до вже сформованого вантажного плану судна [6].

Виходячи з вищенаведених особливостей процесів обробки інформації при формуванні вантажного плану контейнеровозу, а також специфіки його створення та корегування в умовах здійснення мультипортових перевезень, було розроблено структуру СППР для керування таким процесом та визначено перелік її основних функцій.

Функціонально зазначена СППР повинна забезпечити виконання наступних задач:

- формування множини майстер планів для кожного з портів рейсу судна;
- уточнення і оптимізацію відібраного майстер плану до вантажного плану у відповідності потребам поточного порту;
- розрахунок параметрів остійності та міцності корпусу судна;
- оптимізацію виконання вантажних операцій на судні і портових терміналах;
- розрахунок економічних показників виконання рейсу;
- вибір та рекомендація особи, що приймає рішення, найкращих варіантів вантажних планів у відповідності до заданої нею стратегії пріоритетів прийняття рішень.



Рисунок 5 – Структура СППР з формування вантажного плану контейнеровозу для мультипортових контейнерних перевезень

Висновки. Застосовуючи принципи системного підходу до аналізу процесу формування вантажного плану контейнеровозу, було визначено множину ключових складових, що впливають на його побудову та оптимізацію. Визначено, що проблема формування оптимального вантажного плану полягає в розв'язанні множини складних взаємопов'язаних задач багатокритеріальної оптимізації. Практичне вирішення зазначеної проблеми знаходиться в площині пошуку субоптимальних рішень вказаних задач, що відповідають запитам практики.

Розроблено структуру СППР з формування вантажного плану контейнеровозу для мультипортових контейнерних перевезень та визначено перелік її основних функцій. Запропоновано використання гнучких стратегій вибору оптимізаційних процедур, що враховують пріоритети судновласника (або перевізника) до процесу формування вантажного плану судна. Зазначено, що СППР є лише інструментарієм пошуку рішень, а вибір пріоритетності застосування критеріїв пошуку та рівнів прийнятності результатів, що отримані, є і завжди залишиться головним завданням особи, яка приймає рішення.

Перспективи подальших досліджень. Перспективним напрямом майбутніх наукових досліджень є подальший розвиток та запровадження комплексного системного підходу до аналізу впливу та взаємозв'язку ключових складових процесу формування вантажних планів контейнеровозів, як на оперативному, так і на технологічному рівнях. Виявлення таких взаємозв'язків дозволить сформулювати систему пріоритетів при прийнятті рішень з побудови вантажного плану судна, орієнтовану на вирішення практичних потреб конкретного судновласника.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Iris, C., Pacino D. A survey on the ship loading problem. *Computational logistics*. Springer. 2015. P. 238–251.
2. Twiller, J. V., Sivertsen, A., Pacino, D., Jensen, R. M. Literature survey on the container stowage planning problem. *European Journal of Operational Research*. 2024. vol. 317. no. 3. P. 841–857.
3. Ambrosino D., Sciomachen A., Tanfani E. Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2004. № 38.2. P. 81–99.
4. Ambrosino D., Paolucci M., Sciomachen A. A MIP heuristic for multi port stowage planning. *Transportation Research Procedia*. 2015. P. 725–734.
5. Rahsed D. M., Gheith M. S., Eltawil A. B. A Rule-based Greedy Algorithm to Solve Stowage Planning Problem. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, December 2018. P. 437–441.
6. Бень А. П., Соколов А. В. Аналіз сучасного стану методів формування вантажних планів контейнеровозів та шляхи їх подальшого вдосконалення. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2023. №1–2 (26–27). С. 6–16.
7. Pacino D., Delgado A., Jensen R., Bebbington T. Fast generation of nearoptimal plans for eco-efficient stowage of large container vessels. *Computational Logistics*. 2011. P. 286–301.
8. Wang L., Ni M., Gao J., Shen Q., Jia Y., Yao C. The Loading Optimization: A Novel Integer Linear Programming Model. *Enterprise Information Systems*. 2019. Vol. 13 (10). P. 1471–1482.
9. Цимбал М. М. Формування плану завантаження контейнеровозу. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2020. №1(22). С. 64–73.
10. Федоров А. І. Метод формування субоптимального вантажного плану контейнеровозу. *Проблеми інформаційних технологій*. 2019. №25. С. 96–100.
11. Lee, C.-Y., & Song, D.-P. Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities. *Transportation Research Part B: Methodological*. 2017. Vol. 95, P. 442–474.

12. Christensen J., Pacino D. A matheuristic for the cargo mix problem with block stowage. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97. 2017. pp. 151–171
13. Kamieniev K. I., Kamienieva A. V. Vykopyctannia adytyvnoho alhopytmu dlia pozmishchennia nebezpechnykh vantazhiv na konteinerному cudni. *Cudovozhdenye*. 2018. № 28. S. 70–77.
14. Kebedow K. G., Oppen J. Including containers with dangerous goods in the multi-port master bay planning problem. *Mendel*. 2018. vol. 24(2), P. 23–36.
15. Franzkeit J., Schwientek A., Jahn C. Stowage planning for inland container vessels: A literature review. In *Proceedings of the Hamburg international conference of logistics*. 2020. Vol. 30. P. 247–280.
16. Parreño-Torres C., Alvarez-Valdes R., Parreño F. Solution strategies for a multiport container ship stowage problem. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. vol. 2019, issue 1.
17. Yaagoubi A.E., Alaoui E.H., Boukachour J. Multiobjective river-sea-going container barge stowage planning problem with container fragility and barge stability factors. *GOL 2018 : The 4th International Conference on Logistics Operations Management*. 10–12 Apr. 2018. Le Havre, France. IEEE : 2018. P. 214–230.
18. Zhang Z., Lee Ch.-Y. Multiobjective approaches for the ship stowage planning problem considering ship stability and container rehandles. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. 2016. vol. 46(10). P. 1374–1389.
19. Conca A., Febbraro A.D., Giglio D., Rebora F. Automation in freight port call process: Real time data sharing to improve the stowage planning. In *Transportation research procedia*. 2018. Vol. 30. P. 70–79.
20. Wong E.Y.C., Ling K.K.T., Tai A. H., Lam J. S. L., Zhang X. Three-echelon slot allocation for yield and utilisation management in ship liner operations. *Computers and Operations Research*. 2022. 148, 105983.
21. Azevedo A.T., Neto L. L. S., Chaves A. A., Moretti A. C. Solving the 3D stowage planning problem integrated with the quay crane scheduling problem by representation by rules and genetic algorithm. *Applied So Computing Journal*. 2018. vol. 65. P. 495–516.
22. Wei L., Zhu W., Lim W., A goal-driven prototype column generation strategy for the multiple container loading cost minimization problem. *European Journal of Operational Research*. 2015. vol. 241. no. 1. P. 39–49, 2015.
23. Zurheide S., Fischer K. Revenue management methods for the liner shipping industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2015. 27(2). P. 200–223.
24. Delgado A., Jensen R.M., Guilbert N. A placement heuristic for a commercial decision support system for container vessel stowage. In *38th Latin America conference on informatics, CLEI 2012 - conference proceedings*. <http://dx.doi.org/10.1109/CLEI.2012.6427181>.
25. Jensen R. M., Leknes E., Bebbington T. Fast interactive decision support for modifying stowage plans using binary decision diagrams. In *Lecture notes in engineering and computer science*: 2012. vol. 2196, P. 1555–1561.
26. Wu Q., Xia Q., Wu M. Research on intelligent loading system for container ships. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021. Earth Environ. Sci. 632 022074.
27. Jin J., Mi W. An AIMMS-based decision-making model for optimizing the intelligent stowage of export containers in a single bay. *Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S*. 2019. vol. 12. Number (4–5), P. 1101–1115.
28. Накул Ю. А., Нікольський В. В., Стовманенко В. С. Система контролю завантаження контейнеровозів. *Судноводіння*. 2017. №27. С. 127–136.

REFERENCES

1. Iris, C., Pacino, D. (2015). A survey on the ship loading problem. *Computational logistics*. Springer. P. 238–251.

2. Twiller, J. V., Sivertsen, A., Pacino, D., Jensen, R. M. (2024). Literature survey on the container stowage planning problem. *European Journal of Operational Research*. vol. 317. no. 3. P. 841–857.
3. Ambrosino, D., Sciomachen, A., Tanfani, E. (2004). Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. № 38.2. P. 81–99.
4. Ambrosino, D., Paolucci, M., Sciomachen, A. (2015). A MIP heuristic for multi port stowage planning. *Transportation Research Procedia*. P. 725–734.
5. Rahsed, D. M., Gheith, M. S., Eltawil, A. B. (2018). A Rule-based Greedy Algorithm to Solve Stowage Planning Problem. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, December. P. 437–441.
6. Ben, A. P., Sokolov, A. V. (2023). Analiz suchasnoho stanu metodiv formuvannya vantazhnykh planiv konteinerovoziv ta shliakhy yikh podalshoho vdoskonalennia. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. №1–2 (26–27). S. 6–16.
7. Pacino, D., Delgado, A., Jensen, R., Bebbington, T. (2011). Fast generation of nearoptimal plans for eco-efficient stowage of large container vessels. *Computational Logistics*. P. 286–301.
8. Wang, L., Ni, M., Gao, J., Shen, Q., Jia, Y., Yao, C. (2019). The Loading Optimization: A Novel Integer Linear Programming Model. *Enterprise Information Systems*. Vol. 13 (10). P. 1471–1482.
9. Tsybmal, M. M. (2020). Formuvannya planu zavantazhennia konteinerovozu. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii*. №1(22). S. 64–73.
10. Fedorov, A. I. (2019). Metod formuvannya suboptymalnoho vantazhnoho planu konteinerovozu. *Problemy informatsiinykh tekhnolohii*. №25. S. 96–100.
11. Lee, C.-Y., & Song, D.-P. (2017). Ocean container transport in global supply chains: Overview and research opportunities. *Transportation Research Part B: Methodological*. Vol. 95, P. 442–474.
12. Christensen, J., Pacino, D. (2017). A matheuristic for the cargo mix problem with block stowage. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97. pp. 151–171.
13. Каменєв, К. І., Каменєва, А. В. (2018). Використання адитивного алгоритму для розміщення небезпечних вантажів на контейнерному судні. *Судовождєние*. № 28. С. 70–77.
14. Kebedow, K. G., Oppen, J. (2018). Including containers with dangerous goods in the multi-port master bay planning problem. *Mendel*. vol. 24(2), P. 23–36.
15. Franzkeit, J., Schwientek, A., Jahn, C. (2020). Stowage planning for inland container vessels: A literature review. In *Proceedings of the Hamburg international conference of logistics*. Vol. 30. P. 247–280.
16. Parreño-Torres, C., Alvarez-Valdes, R., Parreño, F. (2019). Solution strategies for a multiport container ship stowage problem. *Mathematical Problems in Engineering*. vol. 2019, issue 1.
17. Yaagoubi, A. E., Alaoui, E. H., Boukachour, J. (2018). Multiobjective river-sea-going container barge stowage planning problem with container fragility and barge stability factors. *GOL 2018 : The 4th International Conference on Logistics Operations Management*. 10–12 Apr. 2018. Le Havre, France. IEEE : P. 214–230.
18. Zhang, Z., Lee, Ch.-Y. (2016). Multiobjective approaches for the ship stowage planning problem considering ship stability and container rehandles. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*. vol. 46(10). P. 1374–1389.
19. Conca, A., Febraro, A. D., Giglio, D., Rebori, F. (2018). Automation in freight port call process: Real time data sharing to improve the stowage planning. *In Transportation research procedia*. Vol. 30. P. 70–79.
20. Wong, E. Y. C., Ling, K. K. T., Tai, A. H., Lam, J. S. L., Zhang, X. (2022). Three-echelon slot allocation for yield and utilisation management in ship liner operations. *Computers and Operations Research*. 148, 105983.

21. Azevedo, A. T., Neto, L. L. S., Chaves, A. A., Moretti, A. C. (2018). Solving the 3D stowage planning problem integrated with the quay crane scheduling problem by representation by rules and genetic algorithm. *Applied So Computing Journal*. vol. 65. P. 495–516.
22. Wei, L., Zhu, W., Lim, W. (2015). A goal-driven prototype column generation strategy for the multiple container loading cost minimization problem. *European Journal of Operational Research*. vol. 241. no. 1. P. 39–49.
23. Zurheide, S., Fischer, K. (2015). Revenue management methods for the liner shipping industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 27(2). P. 200–223.
24. Delgado, A., Jensen, R. M., Guilbert, N. (2012). A placement heuristic for a commercial decision support system for container vessel stowage. In *38th Latin America conference on informatics, CLEI 2012 - conference proceedings*. <http://dx.doi.org/10.1109/CLEI.2012.6427181>.
25. Jensen, R. M., Leknes, E., Bebbington, T. (2012). Fast interactive decision support for modifying stowage plans using binary decision diagrams. In *Lecture notes in engineering and computer science*: vol. 2196, P. 1555–1561.
26. Wu, Q., Xia, Q., Wu, M. (2021). Research on intelligent loading system for container ships. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Earth Environ. Sci. 632 022074.
27. Jin, J., Mi, W. (2019). An AIMMS-based decision-making model for optimizing the intelligent stowage of export containers in a single bay. *Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S*. vol. 12. Number (4–5), P. 1101–1115.
28. Nakul, Yu. A., Nikolskyi, V. V., Stovmanenko, V. S. (2017). Systema kontroliu zavantazhennia konteinerovoziv. *Sudnovodinnia*. №27. S. 127–136.

Ben A. P., Sokolov A. V. DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE FORMATION OF CARGO PLANS OF CONTAINER SHIPS

The article examines the issue of creating a decision support system (DSS) for the formation of cargo plans of container ships. The priority directions of scientific research in the field of optimization of processes of control cargo operations of container ships have been determined. It is shown that the key problem in the optimization of sea container transportation is the problem of forming optimal cargo plans. The peculiarities of the process of building a cargo placement plan on a container ship and the principles of its adjustment for the case of multiport container transportation are considered. Approaches to optimizing the process of forming a cargo plan of a container ship have been proposed. It was determined that the problem of forming the optimal cargo plan of the ship consists in solving a set of complex interrelated problems of multi-criteria optimization. With the application of a systematic approach to the analysis of the process of forming the ship's cargo plan, the key factors influencing it were determined. Based on the identified features of information processing processes in the formation of the cargo plan of a container ship, as well as the specifics of its creation and correction in the conditions of multiport transportation, the structure of the DSS was developed to manage such a process and a list of its main functions was defined. The use of flexible strategies for choosing optimization procedures that take into account the influence of the shipowner's priorities on the process of forming the ship's cargo plan is proposed. Prospective directions of further scientific research in the specified field are determined.

Key words: decision support system; cargo plan of the container ship; ship cargo operations; multi-criteria optimization; multiport transportation; safety of shipping.

© Бень А. П., Соколов А. В.

Статтю прийнято до редакції 14.06.2024

ЩОДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОФЕСІЙНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ ECDIS

Петровський А. В. к.т.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: andreynobody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3337-9577;

Жмур В. М. к.д.п., старший викладач кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: viz.post@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5034-3007.

Кількісне зростання світового морського флоту, збільшення розмірів суден вимагають все більше уваги щодо опанування командою навігаційного містка сучасними автоматизованими системами керування судна та відстеження навігаційної обстановки. Навігаційні інформаційні системи все більш ускладнюються функціонально, інтерфейсно, що призвело до необхідності організації додаткової підготовки для користування судовими Electronic Chart Display and Information System (ECDIS). І тому, питання професійності персоналу містка, постає на перший план при вирішенні будь-яких задач керування судном. У статті наведені приклади звітів Marine Accident Investigation Branch (MAIB), з яких видно, наскільки критичним є глибоке розуміння штурманами власних дій у ECDIS, а також правильна інтерпретація отриманих даних/результатів. Висвітлені основні проблемні напрямки у використанні ECDIS та показано, що деякі теми професійними закладами освіти вивчаються дуже поверхово. Опанування практичними навичками володіння ECDIS на симуляторі і, одночасно, відсутність візуального аналізу наслідків невірної інтерпретації даних, невірних налаштувань, недостатнє опрацювання попередньої прокладки – не надають впевненості у власних діях майбутнім штурманам. Проведені у статті дослідження показали ефективність практичної прямої участі курсантів у відновленні описаних інцидентів на тренажері з метою покращення навичок та знань з запобігання таких випадків. Для цього було розроблено поетапний план дій з орієнтовною кількістю витрат часу як інструктора-викладача для моделювання ситуації, так і слухачів закладу освіти для проведення експериментів. Для проведення досліджень обирались диференційовані вибірки курсантів по інтегральному критерію успішності з навчання тих тем, які потрібні для проведення експерименту.

Ключові слова: ECDIS; MAIB; ENC; SENC; Navi Sailor.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.185-195

Вступ. Останні декілька років морський транспорт все більше відновлює власні обсяги перевезень. Зростає як кількість складу морського флоту у світовому масштабі, так і розміри суден. Останній фактор додає необхідності подальшого втілення та розвитку автоматизованих систем управління у процесі керування суднами. Однією з головних складових судового програмного забезпечення вже давно постали ECDIS, як системи, які значно підвищують безпеку мореплавства за рахунок: інтегрованості навігаційних приладів до однієї інформаційної системи, отримання будь-яких повідомлень навігаційного характеру, відображення великої кількості інформації на електронних картах та ін. Звісно, останнім часом, кількість аварійних випадків на морі знизилася поряд зі збільшенням кількості суден. Це пояснюється багатьма причинами і, не в останню чергу, розвитком ECDIS. Але, незважаючи на постійне оновлення версій ECDIS для виправлення помилок попередніх версій, збільшення функціоналу задля прискорення та полегшення роботи штурманів, кількість випадків невмілого використання штурманами ECDIS не падає. Саме різноманітність інтерфейсів від різних розробників ECDIS призвело також і до необхідності сертифікації персоналу навігаційного містка. Згідно з Манільськими поправками до Кодексу STCW (ПДНВ), капітани, старші помічники капітанів і навігаційні офіцери, що працюють на суднах з ECDIS, повинні мати сертифікати про використання ECDIS у відповідності з ІМО Модельним курсом 1.27.

Основними сприяючими факторами при використанні ECDIS залишаються, згідно звітів MAIB [1]:

- «– планування переходів через навігаційні небезпеки;
- відключення звукової сигналізації;
- ігнорування сповіщень;
- не встановлені параметри LookAhead;
- налаштування Safety Contour та Safety Depth не відповідають UKC (Under Keel Clearance);
- ХТD є ширшим за судноплавний канал;
- використання ENC з Overscale;
- наявність та неточність ENC;
- недостатнє знання ECDIS;
- відсутність контролю та нагляду».

Результатом помилок сприйняття інформації/втомлення/відсутності глибокого розуміння ECDIS є статистика випадків посадки на мілину/зіткнення та ін., наприклад, за 2020 р. (табл. 1):

Таблиця 1 – Дослідження МАІВ Safety Digest 2/2020 випадків аварій на морі за період 01.03.2020–31.08.2020 [2]

<i>Дата події</i>	<i>Назва судна (PLN/ІМО номер)</i>	<i>Тип судна</i>	<i>Прапор</i>	<i>Розмір (gt)</i>	<i>Тип події</i>
23/03/20	Koomz (19063885)	General cargo vessel	Bahamas	2715	Посадка на мілину
28/03/20	Key Bora (93160241)	Chemical/products tanker	Gibraltar	2627	Посадка на мілину, підтоплення
09/04/20	Snearwaier (16822216)	Dredger	UK1	342	Втрата можливості руху
25/06/20	Arrow (9119414)	Ro-ro freight vessel	Isle of Man	7605	Посадка на мілину
04/8/20	MorrtzSehufte (9220794)	LPG tanker	Isle of Man	8234	Загоряння
16/08/20	Dromond D (SN 103)	Fishing vessel	UK	48	Переверот/затоплення

Причинами помилок можуть виступати:

- недосконале розуміння функціоналу та налагоджень ECDIS внаслідок незасвоєння навчального матеріалу;
- складність оцінювання реальної навігаційної обстановки;
- людський фактор.

Останнім часом є тенденція щодо збільшення відстаней морських перевезень, у тому числі за рахунок ведення воєнних дій на території України (рис. 1). Звісно, збільшення відстаней сприяє зростанню термінів контрактів моряків і, як наслідок, накопичуванню систематичної втоми та, у деяких випадках, втрати уваги до стеження за обстановкою навколо судна, перекладання функції людини (як супервізора) на дії ECDIS, що стосується, наприклад, Track control system (TCS).

Тому у розрізі такого питання, як підвищення рівня «розуміння» компонентів ECDIS, потрібно приділяти більше уваги саме у навчальних закладах. Також, проведенні дослідження [3], які стосуються взаємодії вахтових офіцерів навігаційного містка з ECDIS, доводять необхідність вирішення цього питання ще на часі навчання з метою набуття готовності до відповідних ситуацій.

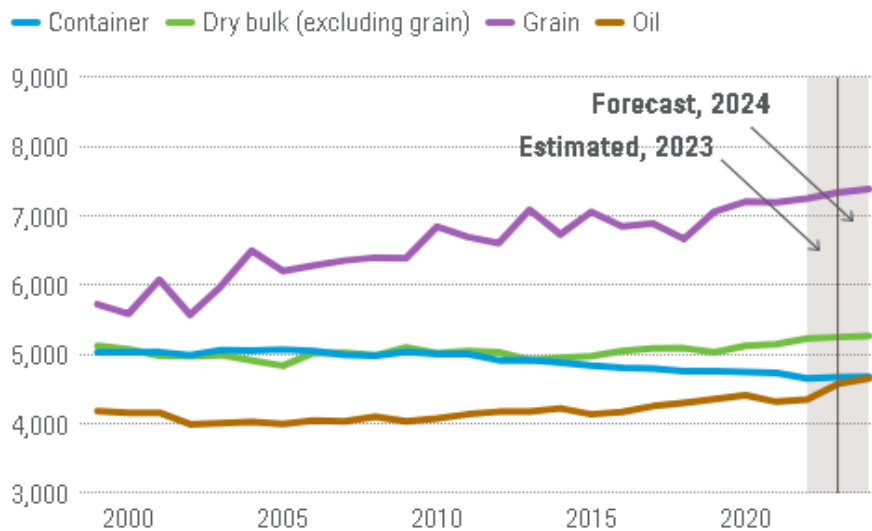


Рисунок 1 – Війна в Україні збільшила відстані комерційних перевезень [4]

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вивчення ECDIS зумовлено Положенням Міжнародної Конвенції SOLAS, частиною V, правилом 19.2.10, конвенцією STCW розділами А-II/1 та А-II/2 і є обов'язковим у межах дисципліни «Навігаційні інформаційні системи». Основні теми, які підіймаються при вивченні ECDIS, як засновуючого елемента дисципліни «Навігаційні інформаційні системи», стосуються: теоретичних знань, правового забезпечення та резолюцій щодо сертифікації ECDIS від ІМО, налаштування SENC та функціональних можливостей даного програмного забезпечення [5]. Додатково на курсах ІМО 1.27 – Operational Use Of Electronic Chart Display And Information Systems надаються дані щодо Detection of misrepresentation of information, and factors affecting system performance and accuracy, including the risks of over-reliance on ECDIS [6–10].

Також втілення сучасних наукових досліджень ще у період навчання: новітніх інформаційних технологій, таких як VR [11], з метою збільшення часу для практичного ознайомлення штурмана з місцевими обставинами та моделюванню деяких несподіваних ситуацій розходження з судном-ціллю; ознайомлення здобувачів освіти із запропонованими моделями усунення колізій при обгонах [12] та оцінюванню місцезнаходження Pivot point [13] при деяких ситуаціях [1] – можуть допомогти прийняти вірне рішення при різних обставинах. При тому ж використання у навчанні досліджень щодо більш ретельного підходу налагодження параметрів навігаційних глибин [14], надає можливість курсантам придбати навички коректного прорахування безпечних зон акваторій стосовно особливостей судна, відповідно до CATZOC і всіх наявних інформаційних повідомлень, включаючи NavTex та АІО.

Поширеність досліджень з підвищення ефективності комплексного навчання як управлінням судном, так і користуванням ECDIS, призводить до більш якісного складу спеціалістів [11], тому розширення напрямків таких досліджень є актуальним.

Постановка проблеми. Опанування практичними навичками володіння ECDIS на симуляторі і, одночасно, відсутність візуального аналізу наслідків невірної інтерпретації даних, невірних налаштувань, недостатнє опрацювання попередньої прокладки – не надають впевненості у власних діях майбутнім штурманам.

Зазвичай практичні навички з дисципліни «Навігаційні інформаційні системи» опрацьовуються відповідно до ІМО модельного курсу 1.27, також іноді надається інформація щодо звітів МАІВ, що стосується помилок використання ECDIS, але моделювання у практичному розрізі таких ситуацій та можливості/варіанти усунення критичних ситуацій, у визначених звітами обставинах, яке дуже важливе для набуття професійних навичок використання ECDIS майбутніми спеціалістами, не ведеться.

Мета та задачі дослідження. Метою статті є поглиблення систематизації знань та практичних навичок при вивченні профільної дисципліни «Навігаційні інформаційні системи» за рахунок візуалізації, прямої участі у відновлених аварійних ситуаціях на тренажері. Об'єктом дослідження є процес викладання дисципліни «Навігаційні інформаційні системи», предметом дослідження виступають особливості надання навчального матеріалу. Задачами даного дослідження є:

- розробка етапів моделювання досліджуваної ситуації на морі у NaviTrainer 5000;
- розробка етапів проведення експерименту з досліджуваною вибіркою курсантів у NaviSailor 4000;
- розподіл курсантів за інтегральним критерієм успішності обраних тем на вибірці з класичного навчання та досліджуваного;
- проведення експерименту та порівняння з вибіркою курсантів класичного навчання у NaviSailor 4000.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводились після опанування курсантами тем з налаштування та основного функціоналу ECDIS NaviSailor 4000 симулятора NaviTrainer 5000. На тренажері використовувалось устаткування ECDIS відповідного всім затвердженим стандартам [15] і застосованим експлуатаційним вимогам (робочим стандартам): IMO MSC, ІНО та ІЕС (Резолюції: А.817(19), А.893(21), MSC.530(106), MSC.232(82), MSC.191(79), MSC.64(67), ІНО S-57(3.1), ІЕС 61174, ІЕС 60945) з використанням імітаторів зовнішніх датчиків: GPS, лагів, гірокомпасів, магнітного компасу, РЛС, ЗАРП (ARPA), авторульового, навігаційного ехолоту, AIS.

Основні напрямки проведення досліджень:

1. Вивчення конкретного звіту МАІВ за темою.
2. Перевірка наявності карт відповідної акваторії і, якщо вони не встановлені, здійснення моделювання навігаційних небезпек, об'єктів (до яких можливі обсерваційні дії) та корисної для експериментів батиметричної коректури.
3. Моделювання аналогічної ситуації.
4. Розробка власних дій:
 - ситуація стає критичною;
 - ситуація тільки починає виходити з під контролю;
 - ситуація недопущення до критичної;
 - ситуація, наближена до ідеального рішення.

Термін проведення експерименту – 4 години (2 пари) на тренажері курсантом (табл. 2) та витрачений час на підготовку інструктором – 85 хвилин (табл. 3).

Таблиця 2 – Середній час, витрачений курсантом на кожному етапі протягом 4 академічних годин

<i>Етапи</i>	<i>Характеристика етапу</i>	<i>Витрачений час, хв</i>
1	2	3
0	Підготовка до заняття (у загальні аудиторні витрати часу не входить). Ознайомлення з ситуацією курсантами у домашніх умовах зі звітів МАІВ (рис. 2) на прикладі [16]. Надається у вигляді посилання QR-кодом на звіт pdf формату (англійська мова).	40
1	Дослідження умов плавання на реальній/корегованій карті. Вправа завантажена, але всі дії призупинені. Йде ознайомлення.	10
2	Аналіз навігаційних обставин, налаштувань ECDIS і навігаційних приладів.	20
3	Розбір помилок персоналу містка під керівництвом викладача.	20

Продовження табл. 2

4	Виконавча прокладка (модельована досліджена критична ситуація: повна відповідність налаштувань навігаційних приладів та ECDIS). Вправа запущена на виконання.	10
5	Відкат завдання на початкову позицію. Вправа завантажена, але всі дії призупинені. Здійснення необхідної коректури SENC (у тому числі з урахуванням CATZOC).	30
6	Дослідження власних варіантів виправлення ситуації (налаштування ECDIS, навігаційних приладів, необхідна коректура SENC, відповідні дії). Висновки з кожного варіанту.	40
7	Групове оптимальне рішення серед запропонованих курсантами. Пояснення викладача щодо переваг та недоліків запропонованих варіантів.	20
8	Необов'язковий етап (якщо на аварію вплинула інша ціль та її дії складно було передбачити, виходячи з даних звіту МАІВ). Додаткове розбиття на 2 підгрупи: 1 – дії судна цілі, які вплинули на аварію, 2 – досліджений тип судна. Розбір можливих варіантів поведінки підгрупи 2 в залежності від дій підгрупи 1 (можливий аналіз з використанням результатів досліджень [12, 13]). (У даних дослідженнях етап не використовувався, але при необхідності є можливість використання за рахунок часу на коректуру, яку частково може підготувати заздалегідь викладач, табл. 2 п. 2).	(15)
9	Висновки по запобіганню даної ситуації.	10
Всього часу		160

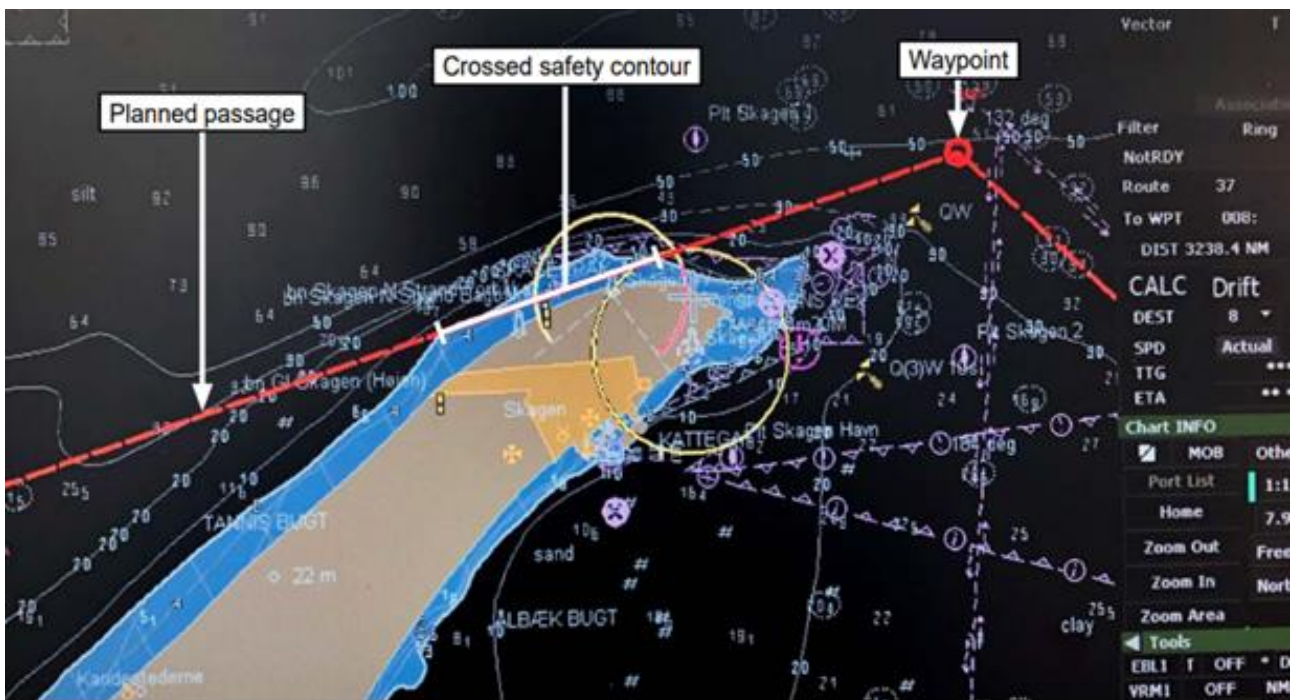


Рисунок 2 – Приклад маршруту для дослідження (маршрут перетинає Safety Contour перед точкою Kattegat) [15]

Таблиця 3 – Етапи підготовки ситуації зі звіту МАІВ на тренажері інструктором

Номер	Етапи	Витрачений час, хв
1	2	3
0	Надання звіту МАІВ. Реалізується за допомогою безоплатних генераторів QR-кодів по введеному посиланню. QR код надається у систему Moodle (рис. 3).	10
1	Пошук відповідних карт серед встановлених на тренажері.	5
2	Якщо відповідних карт немає, коректурую: – Lines (лінії ізобат, узбережжя, інші необхідні лінійні об'єкти зі статусом danger/depth, якщо необхідно); – Points (IDS, Aids to Navigation, інші точкові об'єкти, а також такі, відносно яких є можливість проведення обсерваційних дій протягом виконавчої прокладки. Оскільки на симуляторі-радарі, після запуску з Navi Trainer 5000 програми NaviSailor 4000 таких об'єктів не буде, то краще використовувати такі точкові елементи, які за своїм статусом будуть відображатися симулятором: наприклад, статичні судна-цілі за визначеними координатами або такі, що мають швидкість і курс, щоб залишатися на місці, якщо є течія); – Square (площадні об'єкти, такі як: Land danger, зони з відповідними умовами плавання) відновити умови звіту МАІВ [16].	30
3	Первісне розташування динамічних цілей, якщо вони вплинули на аварію (у даних дослідженнях не використовувалось).	5
4	Моделювання маршрутів руху цілей та їх швидкість, які вплинули на аварію (у даних дослідженнях не використовувалось).	10
5	Обрання досліджуваного типу судна згідно звіту МАІВ [16] для отримання у дослідженнях більш-менш адекватної фізико-математичної моделі поведінки судна при русі.	5
6	Побудова маршруту руху досліджуваного судна згідно звіту МАІВ [16].	5
7	Встановлення досліджуваного судна на позицію маршруту (10 хв до початку наявних проблем/відхилень показників згідно звіту МАІВ [16]) з відповідним курсом та швидкістю.	5
8	Встановлення показників навколишнього середовища згідно звіту МАІВ [16].	5
9	Встановлення показників навігаційних приладів згідно звіту МАІВ [16].	5
Всього		85

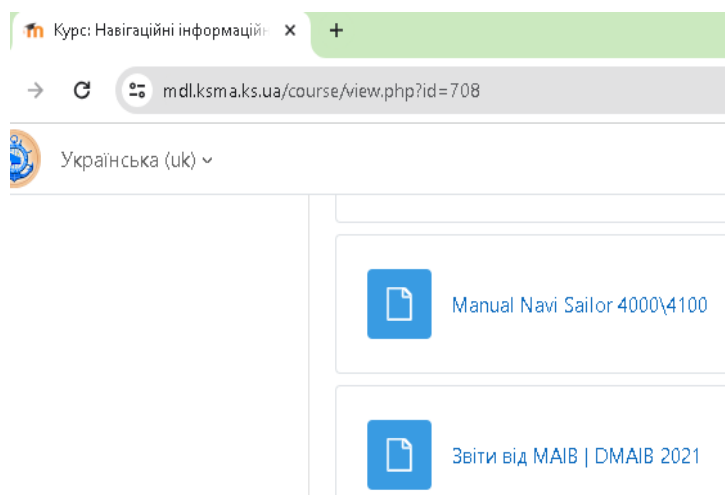


Рисунок 3 – QR-код посилання на звіт

Для тестування були обрані 2 групи II курсу спеціальності 271 «Морський та внутрішній водний транспорт» спеціалізації 271.01 «Навігація і управління морськими суднами» за скороченою формою навчання. Скорочена форма навчання надає можливість курсантам ще у коледжі приймати участь у морських переходах та отримати деякі навички користуванням ECDIS до вступу у ЗВО (заклад вищої освіти). Дисципліна «Навігаційні інформаційні системи» вивчається 2 роки по 60 годин на кожен рік. Всього у групі 1 – 30 курсантів, у групі 2 – 32 курсанта. Кожну досліджувану групу курсантів було розділено на дві підгрупи, що обумовлено обмеженою кількістю місць на тренажері (містків 8 од.) та нерівномірністю опанування знаннями у кожній групі. За темами подальших досліджень було розраховано інтегральний показник успішності для кожного курсанта (1):

$$K_{int} = \sqrt[3]{K_1 K_2 K_3} \quad (1)$$

де K_1 – налаштування SENC у ECDIS щодо параметрів судна;

K_2 – необхідні практичні навички з дисципліни «Управління судном»;

K_3 – практичні навички оцінювання навігаційних обставин у ECDIS.

Кожну групу поділено на підгрупи А₁/Б₁ та А₂/Б₂ у межах кожної групи по значенням інтегрального показника:

– підгруп А₁ і А₂ $K_{int} \in [0.74;1]$

– підгруп Б₁ і Б₂ $K_{int} \in [0.6;0.74]$

Розподіл на підгрупи здійснено також для порівняння знань та практичних навичок між курсантами підгруп А₁ і А₂ та Б₁ і Б₂ груп 1 та 2 з метою оцінювання курсантів підгруп з рівномірним опануванням матеріалу. Тому можна говорити про рівномірність отриманих знань за інтегральним показником щодо проведення наступних досліджень.

Таблиця 4 – Результати оцінювання необхідних знань курсантів окремо по обраних показниках

Опанування темою	Діапазон значень успішності окремих показників	Група 1		Група 2	
		Підгрупа А ₁ , % кількості	Підгрупа Б ₁ , % кількості	Підгрупа А ₂ , % кількості	Підгрупа Б ₂ , % кількості
1	2	3	4	5	6
Налаштування SENC у ECDIS щодо параметрів судна	$K_1 \in [0.74;1]$	80	45	75	40
	$K_1 \in [0.6;0.74]$	20	55	25	60
Необхідні практичні навички з дисципліни «Управління судном» (K_2)	$K_2 \in [0.74;1]$	90	70	88	72
	$K_2 \in [0.6;0.74]$	10	30	12	28
Практичні навички оцінювання навігаційних обставин у ECDIS (K_3)	$K_3 \in [0.74;1]$	70	40	67	43
	$K_3 \in [0.6;0.74]$	30	60	33	57
Інтегральний критерій (K_{int})	$K_{int} \in [0.74;1]$	55		53	
	$K_{int} \in [0.6;0.74]$		45		47

Згідно розподілу можна стверджувати, що як курсанти у підгрупах А₁ та А₂ мають приблизно однаковий рівень підготовки поміж собою, так і у підгрупах Б₁ і Б₂.

Далі, згідно розкладу і проведення лекційних занять на потоку, обидві групи на лекціях отримували однакову загальну інформацію досліджуваного випадку зі звіту МАІВ [16]. Однак, досліджувані підгрупи: Б₁ та Б₂ проходили ще практичні заняття (4 години) з аналізу звіту МАІВ [16] і мали доступ до звіту для попереднього ознайомлення перед проведенням практичних занять, а підгрупи класичні: А₁ та А₂ опанували функціоналом ECDIS щодо здійснення пошуково-рятувальних операцій (інша тема).

Після проходження 2-х практичних занять (табл. 1) з підгрупами Б₁ і Б₂ груп 1 та 2 відповідно, проводилось оцінювання обраних параметрів К_i змодельованої схожої ситуації досліджуваних підгруп та класичних.

Таблиця 5 – Порівняльні результати досліджень

Опанування темою	Діапазон значень успішності окремих показників	Група 1				Група 2			
		Підгрупа А ₁ , % кількості	Зміни, %	Підгрупа Б ₁ , % кількості	Зміни, %	Підгрупа А ₂ , % кількості	Зміни, %	Підгрупа Б ₂ , % кількості	Зміни, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Налаштування SENC у ECDIS щодо параметрів судна	$K_1 \in [0.74;1]$	75	-5	65	20	68	-7	62	22
	$K_1 \in [0.6;0.74)$	25	5	35	-20	32	7	38	-22
Необхідні практичні навички з дисципліни «Управління судном» (К ₂)	$K_2 \in [0.74;1]$	88	-2	80	10	85	-3	90	18
	$K_2 \in [0.6;0.74)$	12	2	20	-10	15	3	10	-18
Практичні навички оцінювання навігаційних обставин у ECDIS (К ₃)	$K_3 \in [0.74;1]$	60	-10	60	20	58	-9	65	22
	$K_3 \in [0.6;0.74)$	40	10	40	-20	42	9	35	-22
Інтегральний критерій (К _{інт})	$K_{інт} \in [0.74;1]$	48					73		
	$K_{інт} \in [0.6;0.74)$			52					27

Основні результати і їх обговорення. Результати дослідження показали, що класичні підгрупи А₁ та А₂, незважаючи на попередні результати більшої успішності, практично не мали переваги перед менш успішними курсантами досліджуваних підгруп.

Від'ємні значення % показують зменшення кількості курсантів з відповідними значеннями обраних коефіцієнтів К_i.

У наявності зменшення якості підгруп А_i в середньому на 7% при збільшенні якості менш успішних за навчанням курсантів підгруп Б_i теж у середньому на 20%. Тому загальна зміна якості складе у середньому 27% за рахунок курсантів з підгруп А₁ та А₂, хто знизив власні показники, та курсантів з підгруп Б₁ і Б₂, хто підвищив результати.

Також встановлено зменшення часу на внесення коректури і більш точні дії курсантів щодо запобігання виникнення критичної ситуації саме у підгрупах Б₁ та Б₂.

Оскільки більшість всіх курсантів буде проходити крізь посаду другого помічника, який у більшості випадків відповідає за прокладку, то загальна різниця у якості 27% слухачів, досить суттєво вплине на професійність майбутніх спеціалістів.

Висновки. Проведені дослідження показали, що є доцільним здійснювати не лише теоретичний огляд випадків зі звітів МАІВ, але й здійснювати моделювання описаних випадків та залучати до прямої участі курсантів у відновленні таких ситуацій на тренажері та їх запобіганні. Цей підхід додатково надає наочне уявлення курсантами:

- наслідків невірних дій, помилкових налаштувань SENC, неповні розрахунки їх відсутність параметрів навігаційних глибин таких як Safety Depth, Safety Contour;
- необхідності досконалого дослідження акваторій переходу;

– необхідності постійного контролю позиції судна.

Перспективи подальших досліджень. У сучасних умовах здійснення навчального процесу у розрізі професійних дисциплін, які вимагають отримання практичних навичок, дуже ускладнено необхідністю використання тренажерів-симуляторів. Тому розвиток хмарних технологій саме у напрямку навігаційних інформаційних систем сприяв би значному підвищенню професійних навичок майбутніх спеціалістів за рахунок використання обмежених функціонально, демонстраційних, але безоплатних версій програмного забезпечення з моделювання симуляторів ECDIS та радару. Можливість самостійно моделювати та проходити випадки, описані у звітах МАІВ/DMAІВ, дуже серйозно підвищать рівень навчання, а значить і подальшу безпеку мореплавства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Application and usability of ECDIS 2021. https://dmaib.com/media/8502/ecdis_application_and_usability.pdf.
2. MAIB Safety Digest 2/2020. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5f7594128fa8f54e93cb1ff1/2020-SD2-MAIBSafetyDigest.pdf>.
3. Brcic D., Kos S., Zuskin S.: Partial structural analysis of the ECDIS EHO research: The handling part. In: Proceedings of the 24nd International Symposium on Electronics in Transport. ISEP. 8 p. (2016). https://www.researchgate.net/publication/331571625_Partial_structural_analysis_of_the_ECDIS_EHO_research_The_handling_part.
4. The war in Ukraine has increased shipping distances. <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>.
5. Вагущенко Л. Л. Судові навігаційно-інформаційні системи : навчальний посібник /Л. Л. Вагущенко, А. А. Вагущенко [3-е вид., перероб. и доп.]. Одеса : НУ «ОМА», 2016. 238 с. <http://www.nav-eks.org.ua/NIS-na-site/NIC-2016.pdf>.
6. Operational use of ECDIS – IMO Model Course 1.27 Approved by the Danish Maritime Authority and DNV-GL. <https://www.furunotraining.com/operational-use-of-ecdis>.
7. Maritime Training & Consultancy <https://searegs.co.uk/ecdis/>.
8. ECDIS – Generic IMO 1.27 and TRANSAS Type Specific <https://www.stcwdirect.com/stcw-course/1079/ecdis-generic-imo-127-and-transas-type-specific/>.
9. Singapore Polytechnic, Operational Use of Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS) [https://www.sp.edu.sg/pace/courses/all-courses/course-details/operational-use-of-ecdis-\(imo-model-course-1.27\)](https://www.sp.edu.sg/pace/courses/all-courses/course-details/operational-use-of-ecdis-(imo-model-course-1.27)).
10. Одеський Морський Тренажерний Центр. <https://www.omtc.ua/ru/kursy/podgotovka-sudovoditelej/podgotovka-po-ispolzovaniyu-elektronnykh-kartograficheskikh-i-navigatsionno-informatsionnykh-sistem>.
11. Use of VR Technologies in the System of Quality Assessment of Seafarer's Professional Competence Formation (Conference Paper) Voloshynov S., Petrovskiy A., Popova H., Cherniavskiy V., Pindosova T. 17th International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications, ICTERI 2021; Kherson; Ukraine; 28 September 2021 – 2 October 2021; Volume 1635 CCIS, 2022, Pages 258–280. https://doi.org/10.1007/978-3-031-14841-5_17.
12. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Saprionov O., Tymofeiev K., Petrovskiy A., & Ivanov A. (2023). Collision avoidance by constructing and using a passing area in on-board controller. *Technology Audit and Production Reserves*, 1/2 (69), 25–29. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.274296>.
13. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Saprionov 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*, 6/2 (68), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.
14. Pipchenko O. D., Burenkov O., Tsymbal M., Pernykoza V. : Identification of Weak Links in the ECDIS – Operator System Based on Simulator Training. TransNav, the International

Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 15, No. 1, <https://doi.org/10.12716/1001.15.01.07>, pp. 83–88, 2021.

15. Вимоги до тренажерного та іншого обладнання, призначеного для підготовки та перевірки знань судноводіїв з використання електронних картографічних та навігаційно-інформаційних систем. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1329-14#Text>.

16. MAIB Report 7/2021 – Kaami – Serious Marine Casualty. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/60acb4bd8fa8f520bde56d16/2021-07-Kaami.pdf>.

REFERENCES

1. Application and usability of ECDIS (2021). https://dmaib.com/media/8502/eccdis_application_and_usability.pdf.

2. MAIB Safety Digest (2020). <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5f7594128fa8f54e93cb1ff1/2020-SD2-MAIBSafetyDigest.pdf>.

3. Brcic, D., Kos, S., Zuskin, S. (2016). : Partial structural analysis of the ECDIS EHO research: The handling part. In: Proceedings of the 24th International Symposium on Electronics in Transport. ISEP. 8 p. https://www.researchgate.net/publication/331571625_Partial_structural_analysis_of_the_ECDIS_EHO_research_The_handling_part.

4. The war in Ukraine has increased shipping distances. (2023). <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2023>.

5. Vahushchenko, L. L. (2016). Sudovi navihatsiino-informatsiini systemy: Navchalnyi posibnyk /L. L. Vahushchenko, A. A. Vahushchenko [3-e vyd., pererob. y dop.]. Odesa: NU «OMA», 2016. 238 s. <http://www.nav-eks.org.ua/NIS-na-site/NIC-2016.pdf>.

6. Operational use of ECDIS – IMO Model Course 1.27 Approved by the Danish Maritime Authority and DNV-GL. <https://www.furunotraining.com/operational-use-of-eccdis>.

7. Maritime Training & Consultancy <https://searegs.co.uk/eccdis/>.

8. ECDIS – Generic IMO 1.27 and TRANSAS Type Specific <https://www.stcwdirect.com/stcw-course/1079/eccdis-generic-imo-127-and-transas-type-specific/>.

9. Singapore Polytechnic, Operational Use of Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS) [https://www.sp.edu.sg/pace/courses/all-courses/course-details/operational-use-of-eccdis-\(imo-model-course-1.27\)](https://www.sp.edu.sg/pace/courses/all-courses/course-details/operational-use-of-eccdis-(imo-model-course-1.27)).

10. Odeskyi Morskyi Trenazhernyi Tsentr <https://www.omtc.ua/ru/kursy/podgotovka-sudovoditelej/podgotovka-po-ispolzovaniyu-elektronnykh-kartograficheskikh-i-navigatsionno-informatsionnykh-sistem>.

11. Use of VR Technologies in the System of Quality Assessment of Seafarer’s Professional Competence Formation (Conference Paper) Voloshynov, S., Petrovskiy, A., Popova, H., Cherniavskiy, V., Pindosova, T. (2021). 17th International Conference on Information and Communication Technologies in Education, Research, and Industrial Applications, ICTERI 2021; Kherson; Ukraine; 28 September 2021 do 2 October 2021; Volume 1635 CCIS, 2022, Pages 258–280 https://doi.org/10.1007/978-3-031-14841-5_17.

12. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Sapronov, O., Tymofeiev, K., Petrovskiy, A., & Ivanov, A. (2023). Collision avoidance by constructing and using a passing area in on-board controller. Technology Audit and Production Reserves, 1(2(69)), 25–29. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.274296>.

13. 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, 6(2(68)), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.

14. Pipchenko, O. D., Burenkov, O., Tsymbal, M., Pernykoza, V.: Identification of Weak Links in the ECDIS - Operator System Based on Simulator Training. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 15, No. 1, <https://doi.org/10.12716/1001.15.01.07>, pp. 83–88, 2021.

15. Vymohy do trenazhernoho ta inshoho obladdannia, pryznachenoho dlia pidhotovky ta perevirky znan sudnovodiiv z vykorystannia elektronnykh kartohrafichnykh ta navihatsiino-informatsiinykh system. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1329-14#Text>.

16. MAIB Report 7/2021 – Kaami – Serious Marine Casualty. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/60acb4bd8fa8f520bde56d16/2021-07-Kaami.pdf>.

Petrovskiy A. V., Zhmur V. M. REGARDING THE PROFESSIONALISM OF ECDIS USERS

Quantitative growth of the world marine fleet accompanied by the increase in the size of ships require more and more attention to mastering modern automated systems of ship control and tracking of the navigational situation by the navigation bridge team. Navigational information systems are increasingly complex functionally, interface-wise, which has already led to the necessity of obtaining certificates for the use of ships' Electronic Chart Display and Information System (ECDIS). And therefore, the question of the professionalism of the bridge personnel comes to the fore when there is the need to solve problems of ship management. The article provides instances of reports from the Marine Accident Investigation Branch (MAIB), which show how critical it is for navigators to have a thorough understanding of their own actions in the use of ECDIS, as well as the correct interpretation of the data/results received. The main problem areas in the use of ECDIS are highlighted and it is shown that some topics are studied very superficially by professional educational institutions. Mastering the practical skills of using ECDIS on the simulator and, at the same time, the lack of visual analysis of the consequences of incorrect data interpretations, incorrect settings, insufficient elaboration of the preliminary layout - do not give future navigators confidence in their own actions. The research conducted in the article showed the effectiveness of the proposed consideration of not only the theoretical part of MAIB reports, but also the practical direct participation of cadets in the recovery of the described incidents in order to improve skills and knowledge to prevent such incidents. In order to achieve this, a step-by-step action plan was developed with an estimated amount of time spent by both the instructor-teacher to simulate the situation and the students of the educational institution to conduct experiments. Differentiated number of cadets was selected for conducting research based on the integral criterion of success in learning the topics required for conducting the experiment. Since the majority of all cadets will someday hold the position of second assistant, who in most cases is responsible for the route creating, then the total difference in the achieved quality by almost 1/3 will significantly affect the professionalism of future specialists.

Key words: ECDIS; MAIB; ENC; SENC; Navi Sailor.

© Петровський А. В., Жмур В. М.

Статтю прийнято до редакції 21.02.2024

МОДЕЛЬ ЧОТИРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ

Славич В. П., к.т.н., доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: vslavich@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7882-4198;

Савченко М. О., студент кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, e-mail: maxsava2004@gmail.com.

У статті представлено розробку математичної моделі спеціальної системи управління світлофорною сигналізацією дорожнього перехрестя транспортної мережі міста. Суть системи полягає в визначенні основних параметрів режимів світлофору в залежності від встановлених наперед критеріїв. В якості таких критеріїв у роботі приймаються наступні: 1) мінімальна пропускна здатність підходів до перехрестя, що визначається кількістю транспортних засобів, що здатна проїхати за час дозволеного сигналу світлофору – причому це значення є узагальненим для всіх підходів; 2) максимальне завантаження перехрестя, що визначається кількістю транспортних засобів, що накопичуються під час горіння заборонено сигналу світлофорної сигналізації, яке також є узагальненим для всіх підходів. Дані викладення доцільні до використання для будь-яких перехресть, для яких необхідно регулювати зазначені два параметри з метою покращення дорожньо-транспортної ситуації, а саме для випадків, коли на певному перехресті встановлені за замовчуванням параметри світлофорного управління не відповідають наявній інтенсивності автомобільного потоку, а також для випадків, коли при наявних параметрах відбувається зайве накопичення на одному чи на декількох підходах транспортних засобів, тобто приводе до заторних ситуацій. Дана модель запропонована для х-подібних перехресть зі встановленою 4-х фазною світлофорною системою управління. Така модель управління дозволить вирішувати дві важливі проблеми перехресть – невідповідну пропускну здатність та зменшення заторів.

Ключові слова: транспортний потік; дорожній рух; перехрестя; система управління транспортним потоком; світлофорна сигналізація; пропускна здатність перехрестя; транспортна мережа.

DOI: 10.33815/2313-4763.2024.1.28.196-204

Вступ. Системи управління світлофорною сигналізацією можна поділити системи з так званим жорстким управлінням та системи, що здатні міняти свої параметри в залежності від вхідних умов [1, 2].

Жорстке управління – цей тип системи працює за заздалегідь встановленим розкладом. Сигнали світлофорів переключаються відповідно до фіксованого часового інтервалу, без урахування актуальних умов на дорозі (таких як інтенсивність трафіку або час доби). Жорстке управління часто використовується на малих перехрестях або там, де підсумковий трафік прогнозований і стабільний.

Інтелектуальне управління – цей тип системи здатний адаптуватися до змінюваних умов дорожнього руху. Він використовує різноманітні сенсори (такі як камери, петлі, акустичні датчики тощо) для збору даних про трафік і пішоходів. Ці дані аналізуються алгоритмами, які визначають оптимальний розклад світлофорних циклів з метою мінімізації заторів і часу очікування.

Інтелектуальні системи управління мають ряд переваг порівняно з жорсткими системами, таких як:

1) Оптимізація трафіку. Інтелектуальне управління може значно зменшити час очікування і затори, оскільки реагує на поточні умови.

2) Енергоефективність. Зменшення часу роботи світлофорів при низькому трафіку дозволяє зменшити споживання енергії.

3) Адаптація до змін. Інтелектуальні системи можуть швидко адаптуватися до змін у трафіку в реальному часі, забезпечуючи більш гнучке управління.

Тому інтелектуальне управління світлофорами можна вважати більш передовим та ефективним рішенням, особливо в умовах густого міського трафіку і великої кількості перехресть.

Постановка проблеми. Однією з проблем міських перехресть у випадку жорсткого управління є такий параметр, як кількість транспортних засобів, що встигає проїжджати за час горіння дозволеного сигналу світлофора. Цей параметр є важливим для ефективності роботи світлофора. Цей параметр може бути критичним у міських умовах, де велика кількість автомобілів може утворювати затори, якщо час, присвячений руху, недостатній для відведення всім транспортним засобам.

При жорсткому управлінні світлофорами важливо забезпечити, щоб час, виділений на рух автомобілів, був достатнім для того, щоб уникнути заторів і забезпечити плавний рух транспорту. Це може вимагати ретельного налаштування часів циклів світлофорів, урахування пікових навантажень і взаємодії з іншими світлофорами на маршруті.

Тому розроблення та впровадження систем управління транспортним потоком на перехресті, що дозволяють враховувати кількість транспортних засобів, що встигає проїжджати за час горіння дозволеного сигналу світлофора, є важливою задачею. Збалансоване управління світлофорами дозволяє оптимізувати рух транспорту в місті, знижувати викиди вуглецю та час очікування, сприяючи загальній ефективності транспортної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасний період існують різноманітні методи інтелектуального управління світлофорною сигналізацією. Аналіз наукових робіт українських [6–8, 14, 15] та закордонних [9–13] дослідників, присвячених цій проблемі, вказує на застосування різних підходів та методів регулювання транспортного руху на перехрестях у різних країнах.

Проблеми оптимізації режимів світлофорного регулювання досліджувалися як вітчизняними, так і закордонними вченими, зокрема В. П. Поліщуком, В. І. Єресовим, О. П. Дзубою, Ю. О. Кременцем, М. П. Печерським, Є. Ю. Форнальчиком, М. С. Фішельсоном, В. Т. Капітановим, Є. О. Рейценом, а також Ф. Вебстером, Х. Іносе, Т. Хамадою та іншими дослідниками.

Слід зазначити, що в проаналізованих роботах не зустрічаються моделі управління транспортним потоком на перехресті, яка б могла змінювати режими управління під зазначені вище критерії – наперед заданої фіксованої кількості автомобілів, яка має встигнути проїхати за час дозволеного сигналу, та наперед заданого фіксованого числа автомобілів, більше за яке не має їх накопичуватися за час забороненого сигналу, в умовах 4-фазного регулювання на перехресті. Розробці такої моделі і буде присвячено дану роботу.

Мета та задачі дослідження. Мета цієї роботи полягає в створенні такої моделі управління світлофорною сигналізацією на міському перехресті, яке має класичну х-подібну конфігурацію, та на якому встановлено 4-х фазний режим управління, яка може змінювати параметри робочого режиму світлофору відповідно до двох наступних критеріїв – заданої наперед фіксованої кількості автомобілів, які можуть проїхати за час горіння дозволеного сигналу, та максимального завантаження перехрестя, що визначається кількістю транспортних засобів, що накопичуються під час горіння забороненого сигналу світлофорної сигналізації.

Зазначена параметр кількості машин на практиці встановлюється експериментально для певного перехрестя, виходячи з задач, які необхідно вирішити. Наприклад, коли на одному підході (чи декількох) встановлені параметри сигналізації не відповідають наявній інтенсивності транспортного потоку. Тому застосування подібної системи дозволить вирішувати зазначену проблему дорожнього руху.

Виклад основного матеріалу. Нехай задане деяке транспортне перехрестя, що має х-подібну конфігурацію, з чотирма підходами до нього.

Кожний підхід має транспортний потік зі своїми власними характеристиками. Перехрестя управляється світлофорною сигналізацією зі встановленими на нею 4-х фазним режимом управління.

У даній роботі буде розглядатися саме 4-х фазна система, коли для кожного з наявних потоків надається окрема фаза регулювання. Випадки 2-х фазних систем управління авторами розглядатиметься в інших наукових роботах.

Для моделювання буде застосовано клітинковий спосіб [3, 4, 5], коли транспортна мережа представляє собою сукупність клітинок, по яким переміщуються автомобілі. Цей спосіб моделювання приблизний, але з певною точністю здатен відображати процес для встановлення взаємозв'язків між його параметрами.

Цей метод є досить поширеним у транспортних моделях для аналізу потоків та оптимізації роботи світлофорів.

До основних принципів клітинкового моделювання транспортної мережі можна віднести наступні:

1. Клітинкова структура. Транспортна мережа поділяється на клітинки (або сегменти), через які рухаються транспортні засоби. Кожна клітина може мати власні характеристики, такі як довжина, максимальна ємність, середня швидкість руху тощо.

2. Потік автомобілів. Кожен підхід до перехрестя моделюється як вхідний потік автомобілів, що надходить до перехрестя через відповідні вхідні клітинки.

3. Фази світлофора. Для кожного напрямку руху задаються фази світлофора, які регулюють рух автомобілів через вихідні клітинки (виходи перехрестя).

4. Управління світлофором. Часові інтервали фаз світлофора розподіляються таким чином, щоб максимізувати потік або мінімізувати затори в системі, враховуючи обмеження ресурсів (наприклад, часу світлофорних циклів).

Процес моделювання:

1. Ініціалізація. Початкові умови встановлюються для кожної клітинки (вхідні і вихідні потоки, максимальні швидкості, ємності).

2. Рух автомобілів. Автомобілі переміщуються між клітинками відповідно до заданих правил (наприклад, залежно від поточної швидкості та довжини клітинки).

3. Світлофорне управління. Залежно від поточного часу інтервалів фаз світлофора, автомобілі з вхідних клітинок вибирають напрямок руху через перехрестя.

4. Оцінка продуктивності. Збираються дані про потік автомобілів через виходи перехрестя, середні часи очікування і пропускні здатності для кожного напрямку.

Важливі аспекти:

1. Керування оптимізацією. Мета моделювання – знайти оптимальні параметри світлофорів (час фаз, послідовність фаз), які максимізують пропускну здатність або знижують середні часи очікування.

2. Валідація моделі. Модель потребує валідації через порівняння прогнозованих результатів з реальними даними або іншими відомими моделями.

Тому клітинковий підхід до моделювання транспортного перехрестя дозволяє досліджувати і покращувати ефективність роботи світлофорної системи з урахуванням різних потоків автомобілів. Це важливий інструмент для планування міської інфраструктури та розвитку транспортних систем.

Наступним кроком введемо необхідні вхідні параметри моделі зазначеного транспортного перехрестя:

Δt – час, за який один транспортний засіб переміщується на одну клітинку мережі (секунди);

I_1 – інтервали між транспортними засобами відповідно для першого підходу перехрестя (секунди);

I_2 – інтервали між транспортними засобами відповідно для другого підходу перехрестя (секунди);

I_3 – інтервали між транспортними засобами відповідно для третього підходу перехрестя (секунди);

I_4 – інтервали між транспортними засобами відповідно для четвертого підходу перехрестя (секунди);

k_1 – кількість клітинок від початку мережі до центру перехрестя для першого підходу (одиниць);

k_2 – кількість клітинок від початку мережі до центру перехрестя для другого підходу (одиниць);

k_3 – кількість клітинок від початку мережі до центру перехрестя для третього підходу (одиниць);

k_4 – кількість клітинок від початку мережі до центру перехрестя для четвертого підходу (одиниць).

Введемо змінний параметр m – кількість транспортних засобів, що має проїхати перехрестя за час горіння дозволеного сигналу.

Для виведення подальших залежностей побудуємо схему руху транспортних засобів на одному з підходів перехрестя (рис. 1).

1	Δt_0	1													
2	Δt_1		1												
3	Δt_2			1											
4	Δt_3				1										
5	Δt_4	2				1									
6	Δt_5		2				1								
7	Δt_6			2				1							
8	Δt_7				2				1						
9	Δt_8	3				2				1					
10	Δt_9		3				2				1				
11	Δt_{10}			3				2						1	
12	Δt_{11}				3				2						
13	Δt_{12}	4				3				2					
14	Δt_{13}		4				3				2				
15	Δt_{14}			4				3						2	

Рисунок 1 – Схема руху машин на дозволений сигнал світлофора на одному з підходів перехрестя

Зафіксуємо номера машин та розглянемо проаналізуємо динаміку їх переміщення та положення в мережі в фіксовані часові проміжки.

У початковий момент часу в системі з'являється перший автомобіль у крайній клітинці та починає рухатись зі швидкістю одна клітинка за час Δt .

Введемо наступні функції:

$T_1^d(i; m)$ – тривалість дозволеної фази в залежності від кількості транспортних засобів, що зможе проїхати перехрестя за час горіння дозволеного сигналу, де i – номер підходу перехрестя, $i = \overline{1,4}$.

$T_1^z(i; m)$ – тривалість забороненої фази в залежності від кількості транспортних засобів, що зможе проїхати перехрестя за час горіння дозволеного сигналу, де i – номер підходу перехрестя, $i = \overline{1,4}$;

$T_1^p(m)$ – тривалість світлофорного циклу в залежності від кількості транспортних засобів, що зможе проїхати перехрестя за час горіння дозволеного сигналу.

Тоді виходячи з наведеної схеми, можна отримати наступні залежності для кожного з підходів:

$$\begin{cases} T_1^d(1; m) = ((k_1 + 1) + (m - 1) \cdot I_1) \cdot \Delta t \\ T_1^d(2; m) = ((k_2 + 1) + (m - 1) \cdot I_2) \cdot \Delta t \\ T_1^d(3; m) = ((k_3 + 1) + (m - 1) \cdot I_3) \cdot \Delta t \\ T_1^d(4; m) = ((k_4 + 1) + (m - 1) \cdot I_4) \cdot \Delta t \end{cases}$$

Очевидно, що тривалості заборонених фаз будуть визначатися наступною системою:

$$\begin{cases} T_1^z(1; m) = T_1^d(2; m) + T_1^d(3; m) + T_1^d(4; m) \\ T_1^z(2; m) = T_1^d(1; m) + T_1^d(3; m) + T_1^d(4; m) \\ T_1^z(3; m) = T_1^d(1; m) + T_1^d(2; m) + T_1^d(4; m) \\ T_1^z(4; m) = T_1^d(1; m) + T_1^d(2; m) + T_1^d(3; m) \end{cases}$$

Тоді повний світлофорний цикл визначається за допомогою наступного виразу:

$$T_1^p(m) = \sum_{i=1}^4 T_1^d(i; m) = \sum_{i=1}^4 (((k_i + 1) + (m - 1) \cdot I_i) \cdot \Delta t).$$

Тепер розглянемо визначення параметрів світлофорного регулювання в залежності від довжини черги, що накопичилась на червоній фазі.

Введемо змінний параметр n – кількість транспортних засобів, що накопичується на підході перехрестя за час горіння забороненого сигналу.

Для виведення подальших залежностей побудуємо схему накопичення транспортних засобів на одному з підходів перехрестя (рис. 2).

Введемо наступні функції:

$T_2^z(i; n)$ – тривалість світлофорної фази в залежності від кількості транспортних засобів, що накопичується за час горіння забороненого сигналу, де i – номер підходу перехрестя, $i = \overline{1,4}$.

$T_2^d(i; n)$ – тривалість дозволеної фази в залежності від кількості транспортних засобів, що накопичується за час горіння забороненого сигналу, де i – номер підходу перехрестя, $i = \overline{1,4}$;

$T_2^p(n)$ – тривалість світлофорного циклу в залежності від кількості транспортних засобів, що накопичується за час горіння забороненого сигналу.

1	Δt_0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	Δt_1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Δt_2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Δt_3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Δt_4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Δt_5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Δt_6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Δt_7	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	Δt_8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	Δt_9	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Δt_{10}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	Δt_{11}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	Δt_{12}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	Δt_{13}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	Δt_{14}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	Δt_{15}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	Δt_{16}	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	Δt_{17}	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	Δt_{18}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
20	Δt_{19}	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Рисунок 2 – Схема накопичення машин на одному з підходів при включеному забороненому сигналі світлофорної сигналізації

Тоді виходячи з наведеної схеми, можна отримати наступні залежності для кожного з підходів:

$$\begin{cases} T_2^z(1; n) = (I_1 - 1) \cdot n \cdot \Delta t \\ T_2^z(2; n) = (I_2 - 1) \cdot n \cdot \Delta t \\ T_2^z(3; n) = (I_3 - 1) \cdot n \cdot \Delta t \\ T_2^z(4; n) = (I_4 - 1) \cdot n \cdot \Delta t \end{cases}$$

Тоді повний світлофорний цикл для другого випадку буде визначатися за допомогою наступної залежності:

$$T_2^p(n) = \sum_{i=1}^4 T_2^z(i; n) = \sum_{i=1}^4 ((I_i - 1) \cdot n \cdot \Delta t).$$

Висновки. Таким чином, у роботі запропоновано розробку моделі управління світлофорною сигналізацією міського перехрестя, яка може змінювати свої параметри роботи в залежності від поставлених вхідних умов.

Такою умовою є пропускна здатність дозволеної фази світлофорного регулювання, коли в залежності від обраної для певного перехрестя величини кількості транспортних засобів, що має встигати проїхати за час горіння дозволеного сигналу, підбирається оптимальна її тривалість.

Також, такою умовою є тривалість забороненої фази, світлофорного регулювання, коли її час горіння підбирається таким чином, щоб на підходах до перехрестя не накопичувалось транспортних засобів більше встановленого фіксованого значення.

Дана модель запропонована для х-подібних перехресть зі встановленою 4-х фазною світлофорною системою управління.

Така модель управління дозволить вирішувати дві важливі проблеми перехресть – невідповідну пропускну здатність та зменшення заторів.

Перспективи подальших досліджень. Проведені дослідження показали необхідність удосконалення системи управління світлофорною сигналізацією міських перехресть. Запропонована модель застосовується для окремого перехрестя, що підлягає дослідженню і оптимізації.

У подальшому планується розширення моделі та застосування для випадків перехресть зі встановленою 2-х фазною світлофорною системою управління, що здатна буде охоплювати не тільки одне перехрестя, але й цілу групу взаємопов'язаних перехресть, які будуть групуватися за різними ознаками, наприклад, самим логічним – сусіднім розташуванням.

Це дозволить покращити стан дорожнього руху не тільки на локальних ділянках, але й на транспортній мережі в цілому.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Єресов В. І. Особливості розрахунку режимів світлофорного регулювання при здійсненні управління за сигнальними групами / В. І. Єресов, В. Е. Трушевський // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 4(3). С. 9–13.
2. Поліщук В. П. Організація та регулювання дорожнього руху / за заг. ред. В. П. Поліщука; О. О. Бакуліч, О. П. Дзюба, В. І. Єресов та ін. К., 2014. 467 с.
3. Славич В. П., Дербеденєв А.В. Модель функціонування транспортного затору та визначення часу його подолання // Вісник ХНТУ. 2019. №2(69). С. 169–173.
4. Славич В. П. Модель визначення довжини черги транспортних засобів при заданих параметрах світлофорного регулювання // Проблеми інформаційних технологій. 2014. №02(016). С. 122–124.
5. Славич В. П., Лівандовський В. С. Модель системи управління світлофорною пішохідною сигналізацією // Комунальне господарство міст. 2021. Т. 6, №166. С. 227–231.
6. Трушевський В. Е. Особливості корекції елементів циклу світлофорного регулювання з метою гарантування безпеки руху пішоходів / В. Е. Трушевський, С. В. Грицай // Автошляховик України. 2014. № 5. С. 20–22.
7. Форнальчик Є. Ю. Техніко-технологічний аналіз регульованих перехресть з магістральними вулицями / Є. Ю. Форнальчик, В. В. Гілевич // Наукові нотатки: міжвузівський збірник. Луцьк : ЛНТУ, 2014. № 46. С. 558–564.
8. Шевченко В. В. Обґрунтування ефективного напрямку розвитку систем світлофорного управління з жорсткими циклами регулювання // Вісник машинобудування та транспорту, 2022. Том 16 №2. С. 110–119.
9. Farzaneh M. Modeling traffic dispersion [Text] / M. Farzaneh, H. Rakha / Virginia Polytechnic Institute and State University. November 2005. 139 p.

10. Sacks G. Impact of front-of-pack ‘traffic-light’ nutrition labelling on consumer food purchases in the UK [Текст] / G. Sacks, M. Rayner, B. Swinburn // Health promotion international. 2009. Vol. 24, Issue 4. P. 344–352.
11. Tubaishat M. Adaptive traffic light control with wireless sensor networks / M. Tubaishat, Y. Shang, H. Shi // Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2007. P. 187–191.
12. Zabyshnyi Y. O. Influence of exhaust for air condition in cities / Y. O. Zabyshnyi, Y. M. Semchuk, V. M. Melnyk, B. V. Dolishniy // The scientific heritage. – Hungary, VOL 1, No 3 (3) (2016). P. 28–34.
13. Yu. L. Real-Time Calibration of Platoon Dispersion Model to Optimize the Coordinated Traffic Signal Timing in ATMS Networks / L. Yu. – Texas, Texas Southern University, June 1999. 51.
14. Fornalchyk Ye. The saturation flow volume as a function of the intersection passing speed / Ye. Fornalchyk, I. Mohyla, V. Hilevych // International Scientific Journal «Transport Problems». – 2013. Vol. 8. Issue 3. pp. 43–51.
15. Fornalchyk Ye. The influence of dynamic characteristics of vehicles on the passenger car equivalent and traffic delay / Ye. Fornalchyk, I. Mohyla, V. Hilevych // An International Quarterly Journal «ECONTECHMOD». 2015. Vol. 4. No. 2. pp. 45–50.

REFERENCES

1. Yeresov, V. I. (2014). Peculiarities of the calculation of traffic light control modes when controlling by signal groups / V. I. Yeresov, V. E. Trushevskiy // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal передовых технологии. No. 4(3). P. 9–13.
2. Polishchuk, V. P. (2014). Organization and regulation of road traffic / by. general ed. V. P. Polishchuk; O. O. Bakulich, O. P. Dzyuba, V. I. Yeresov and others. K., 467 p.
3. Slavich, V. P., Derbedenev, A. V. (2019). The model of traffic jam functioning and determination of the time to overcome it // Bulletin of KhNTU. 2019. No. 2(69). P. 169–173.
4. Slavich, V. P. (2014). A model for determining the length of a queue of vehicles with given parameters of traffic light regulation // Problems of information technologies. No. 02(016). P. 122–124.
5. Slavich, V. P., Livandovskiy, V. S. (2021). A model of the traffic light pedestrian signaling control system // Communal management of the city. Vol. 6, No. 166. P. 227–231.
6. Trushevskiy, V. E. (2014). Peculiarities of the correction of elements of the cycle of traffic light regulation in order to guarantee the safety of pedestrian traffic / V. E. Trushevskiy, S. V. Hrytsai // Highway of Ukraine. No. 5. P. 20–22.
7. Fornalchyk, E. Y. (2014). Technical and technological analysis of regulated intersections with main streets / E. Yu. Fornalchyk, V. V. Gilevich // Scientific notes: interuniversity collection. – Lutsk: LNTU, No. 46. P. 558–564.
8. Shevchenko, V. V. (2022). Justification of the effective direction of the development of traffic light control systems with rigid regulation cycles // Bulletin of Machine Engineering and Transport, Volume 16. No. 2. pp. 110–119.
9. Farzaneh, M. (2005). Modeling traffic dispersion / M. Farzaneh, H. Rakha / Virginia Polytechnic Institute and State University. November. 139 p.
10. Sacks, G. (2009). Impact of front-of-pack ‘traffic-light’ nutrition labelling on consumer food purchases in the UK / G. Sacks, M. Rayner, B. Swinburn // Health promotion international. 2009. Vol. 24, Issue 4. P. 344–352.
11. Tubaishat, M. (2007). Adaptive traffic light control with wireless sensor networks / M. Tubaishat, Y. Shang, H. Shi // Proceedings of IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2007. P. 187–191.

12. Zabyshnyi, Y. O. (2016). Influence of exhaust for air condition in cities / Y. O. Zabyshnyi, Y. M. Semchuk, V. M. Melnyk, B. V. Dolishnyi // The scientific heritage. Hungary, VOL 1, No 3 (3) (2016). P. 28–34.

13. Yu. L. (1999). Real-Time Calibration of Platoon Dispersion Model to Optimize the Coordinated Traffic Signal Timing in ATMS Networks / L. Yu. – Texas, Texas Southern University. 51.

14. Fornalchyk, Ye. (2013). The saturation flow volume as a function of the intersection passing speed / Ye. Fornalchyk, I. Mohyla, V. Hilevych // International Scientific Journal «Transport Problems». Vol. 8. Issue 3. pp. 43–51.

15. Fornalchyk, Ye. (2015). The influence of dynamic characteristics of vehicles on the passenger car equivalent and traffic delay / Ye. Fornalchyk, I. Mohyla, V. Hilevych // An International Quarterly Journal «ECONTECHMOD». Vol. 4. No. 2. pp. 45–50.

Slavych V. P., Savchenko M. O. MODEL OF A FOUR-PHASE TRAFFIC FLOW MANAGEMENT SYSTEM

The article presents the development of a mathematical model of a special traffic light signaling control system of a road intersection of the city's transport network.

One of the problems of urban intersections in the case of strict management is such a parameter as the number of vehicles that manage to pass during the time when the permitted traffic light signal is burning. This parameter is important for the efficiency of the traffic light. This parameter can be critical in urban environments, where a large number of cars can create traffic jams if the time dedicated to traffic is not sufficient to accommodate all vehicles. The essence of the system is to determine the main parameters of the traffic light modes depending on the pre-established criteria. As such criteria, the following are accepted in the work: 1) the minimum passing capacity of the approaches to the intersection, which is determined by the number of vehicles that can pass during the time of the permitted traffic light signal - and this value is generalized for all approaches; 2) the maximum loading of the intersection, which is determined by the number of vehicles accumulating during the burning of the prohibited traffic signal, which is also generalized for all approaches. These explanations are suitable for use at any intersections for which it is necessary to adjust the specified two parameters in order to improve the traffic situation, namely for cases when the traffic light control parameters set by default at a certain intersection do not correspond to the existing intensity of traffic flow, as well as for cases when, under the available parameters, there is excessive accumulation on one or several approaches of vehicles, that is, it leads to traffic jams. This model is proposed for x-shaped intersections with an installed 4-phase traffic light control system. Such a management model will allow solving two important problems of the intersection - inadequate bandwidth and reducing congestion.

Key words: traffic flow; road traffic; intersection; traffic flow control system; traffic signal; intersection capacity; transport network.

© Славич В. П., Савченко М. О.

Статтю прийнято до редакції 20.06.2024

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 напрямам журналу. Матеріали, що не оформлені згідно наведених правил, містять плагіат, чи не відповідають напрямам 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

- Koretsky O., Nosov P., Zinchenko S., Pohorletskyi D.** 6
METHOD OF AUTOMATED IDENTIFICATION OF HAZARDOUS FATIGUE FACTORS IN NAVIGATORS BASED ON SLEEP INDICATORS
- Ponomaryova V.** 22
METHOD OF DECISION SUPPORT FOR NAVIGATORS FOR AUTOMATED CONTROL OF VESSEL TRAFFIC SAFETY BASED ON ECDIS DATA
- Зінченко С. М., Товстокорий О. М., Матейчук В. М., Носов П. С.** 41
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОСТІЙНОСТІ СУДНА НА РЕГУЛЯРНОМУ ХВИЛЮВАННІ
- Надточій В. А., Бурунін А. П.** 57
СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРОБКИ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНИМ ПАТРУЛЬНИМ КАТЕРОМ ДЛЯ ОХОРОНИ МІЛКОВОДНОЇ ЗАХИЩЕНОЇ АКВАТОРІЇ

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

- Abramov G. S., Plotnikov V. I.** 68
ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF THE NAVIGATION COMPLEX AND RECOMMENDATIONS FOR INCREASE OF RELIABILITY
- Блінцов В. С., Тарчук А. А., Трибулькевич В. В.** 79
ПРОЄКТНІ ЗАДАЧІ СТВОРЕННЯ ЗАСОБІВ МОРСЬКОЇ РОБОТОТЕХНІКИ ДЛЯ ОХОРОНИ ТА ЗАХИСТУ ОБ'ЄКТІВ МОРСЬКОЇ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

- Алексенко В. Л., Юренин К. Ю., Татарінцева Ю. Г., Фостик П. П., Васильченко Г. Ю., Знамеровська Н. П., Онишко Д. М.** 93
СХЕМОТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ПРИ РЕНОВАЦІЇ ВИПРОБУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ
- Пашинська О. Г., Пашинський В. В., Бойко І. А.** 104
ВПЛИВ РОЗТЯГУВАННЯ З ОДНОЧАСНИМ КРУТІННЯМ НА ОТРИМАННЯ СТРУКТУРИ ЗЕРНИСТОГО ПЕРЛІТУ ПРИ СФЕРОІДІЗУЮЧОМУ ВІДПАЛІ
- Шарко О., Степанчиков Д., Шарко А., Яненко А., Мовчан П.** 117
ЗАСТОСУВАННЯ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СУДНОРЕМОНТІ ТА ТРАНСПОРТНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

Nosov P., Hudz A., Ponomaryova V. 134
DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR ENHANCING MARINE
ENGINEER READINESS FOR THE OPERATION AND REPAIR OF
INJECTORS WITH VISUALIZATION OF THEIR 3D MODELS

Бень А. П. 152
СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В СУДНОВОДІННІ:
СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

Зінченко С. М. 163
ВИКОРИСТАННЯ НАДЛИШКОВОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ
ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Бень А. П., Соколов А. В. 175
СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З ФОРМУВАННЯ
ВАНТАЖНИХ ПЛАНІВ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ

Петровський А. В., Жмур В. М. 185
ЩОДО ПИТАННЯ ПІДВИЩЕННЯ ПРОФЕСІЙНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ
ECDIS

Славич В. П., Савченко М. О. 196
МОДЕЛЬ ЧОТИРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ
ПОТОКОМ

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ 205

CONTENTS

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Koretsky O., Nosov P., Zinchenko S., Pohorletskyi D. METHOD OF AUTOMATED IDENTIFICATION OF HAZARDOUS FATIGUE FACTORS IN NAVIGATORS BASED ON SLEEP INDICATORS	6
Ponomaryova V. METHOD OF DECISION SUPPORT FOR NAVIGATORS FOR AUTOMATED CONTROL OF VESSEL TRAFFIC SAFETY BASED ON ECDIS DATA	22
Zinchenko S. M., Tovstokoryi O. M., Mateichuk V. M., Nosov P. S. MATHEMATICAL MODEL OF VESSEL STABILITY ON REGULAR WAVES	41
Nadtochii, V. A., Burunin A. P. A SYSTEMATIC APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF THE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM OF AN UNMANNED PATROL BOAT FOR THE PROTECTION OF A SHALLOW WATER PROTECTED AQUARIUM	57

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

Abramov G. S., Plotnikov V. I. ANALYSIS OF THE RELIABILITY OF THE NAVIGATION COMPLEX AND RECOMMENDATIONS FOR INCREASE OF RELIABILITY	68
Blintsov V. S., Tarchuk A. A., Trybulkevych V. V. PROJECT TASKS OF CREATING MARINE ROBOTICS FOR PROTECTION AND PROTECTION OF MARINE CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES	79

MATERIALS SCIENCE

Aleksenko V. L., Yurenin K. Yu., Vasylichenko G. Yu., Znamerovska N. P., Tatarintseva Yu. G., Fostyk P. P., Onyshko D. M. SCHEMATIC SOLUTIONS IN RENOVATION OF TEST	93
Pashynska O., Pashynskiy V., Boiko I. THE INFLUENCE OF TENSION WITH SIMULTANEOUS ROTATION ON OBTAINING THE STRUCTURE OF GLOBULAR PEARLITE DURING SPHEROIDIZING ANNEALING	104
Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A., Yanenko A., Movchan P. APPLICATION OF MULTICRITERIA ANALYSIS IN THE STUDY OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN SHIP REPAIR AND TRANSPORT INFRASTRUCTURE	117

NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING

Nosov P., Hudz A., Ponomaryova V. **134**
DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR ENHANCING MARINE
ENGINEER READINESS FOR THE OPERATION AND REPAIR OF
INJECTORS WITH VISUALIZATION OF THEIR 3D MODELS

Ben A. P. **152**
DECISION SUPPORT SYSTEMS IN NAVIGATION: CURRENT STATE AND
PROSPECTS FOR FURTHER DEVELOPMENT

Zinchenko S. M. **163**
USING REDUNDANT CONTROL TO MINIMIZE ENERGY CONSUMPTION

TRANSPORT TECHNOLOGIES

Ben A. P., Sokolov A. V. **175**
DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE FORMATION OF CARGO PLANS
OF CONTAINER SHIPS

Petrovskiy A. V., Zhmur V. M. **185**
REGARDING THE PROFESSIONALISM OF ECDIS USERS

Slavych V. P., Savchenko M. O. **196**
MODEL OF A FOUR-PHASE TRAFFIC FLOW MANAGEMENT SYSTEM

DESIGN REQUIREMENTS FOR SCIENTIFIC WORKS **208**

ДЛЯ НОТАТОК

Наукове видання

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 1 (28)

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. 13,5.
Підписано до друку 29.07.2024.
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