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

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ

НАУКОВИЙ ВІСНИК

ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 2 (31)

Видається з 2009 року

Херсон
2025

Науковий вісник Херсонської державної морської академії : науковий журнал. – Херсон : Херсонська державна морська академія, 2025. № 2 (31). – 236 с.

Засновник і видавець – Херсонська державна морська академія

Рекомендовано до друку на засіданні Вченої ради Херсонської державної морської академії (протокол № 8 від 25.12.2025 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

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

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

Зінченко С. М., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, відповідальний редактор рубрики;
Бень А. П., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;
Бідюк П. І., д.т.н., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна, член редколегії;
Носов П. С., к.т.н., Одеський національний морський університет, Україна, член редколегії;
Передерій В. І., д.т.н., Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова, Україна, член редколегії;
Поливода О. В., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, членкиня редколегії;
Степенко С. А., к.т.н., Національний університет «Чернігівська політехніка», 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;
Голофєєва М. О., к.т.н., Національний університет «Одеська політехніка», Україна, членкиня редколегії;
Гусєв В. М., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;
Литвиненко В. В., д.т.н., Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України, Україна, член редколегії;
Пашинська О. Г., д.т.н., ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», Україна, членкиня редколегії;
Сизоненко О. М., д.т.н., Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Україна, членкиня редколегії;
Стухляк П. Д., д.т.н., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна, член редколегії;
Фесенко І. П., д.т.н., Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Україна, член редколегії;
Dulebova Ľudmila, 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;
Аппазов Е. С., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;
Аргун Щ. В., д.т.н., Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Україна, членкиня редколегії;
Бабій М. В., к.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;
Варбанець Р. А., д.т.н., Одеський національний морський університет, Україна, член редколегії;
Войтович О. А., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, Україна, 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;
Клюєв О. І., к.т.н., Херсонський національний технічний університет, 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;
Мінчев Д. С., д.т.н., Одеський національний морський університет, Україна, член редколегії;
Настасенко В. О., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;
Піпченко О. Д., д.т.н., Національний університет «Одеська морська академія», Україна, член редколегії;
Цимбал М. М., д.т.н., Національний університет «Одеська морська академія», Україна, член редколегії;
Шарко О. В., д.т.н., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;
Якущенко С. В., Ph.D., Херсонська державна морська академія, Україна, член редколегії;
Lukauskas Valdas, Ph.D., Lithuanian Maritime Academy, Литва, член редколегії;
Zaglinkis Justas, Ph.D., Lithuanian Maritime Academy, Литва, член редколегії.

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

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

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

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

© Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 2025

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

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

SCIENTIFIC BULLETIN

KHERSON STATE MARITIME ACADEMY

Science journal

Published twice a year

№ 2 (31)

Issued from 2009

Kherson
2025

Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy : science journal. – Kherson : Kherson State Maritime Academy, 2025. № 2 (31). – 236 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 № 8 from 25.12.2025)

EDITORIAL STAFF:

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

Thematic scope – Automation and computer integrated technologies:
Sergii Zinchenko, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;
Andrii Ben, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;
Petro Bidiuk, Doctor of Engineering Science, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ukraine, member of editorial board;
Pavlo Nosov, Candidate of Engineering Science, Odesa National Maritime University, Ukraine, member of editorial board;
Viktor Perederii, Doctor of Engineering Science, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Ukraine, member of editorial board;
Oksana Polivoda, Candidate of Engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, member of editorial board;
Serhii Stepenko, Candidate of Engineering Science, Chernihiv National University of Technology, Ukraine, member of editorial board;
Prentkovskis Olegas, Sc.D., Vilnius Gediminos Technical University, Lithuania, member of editorial board.

Thematic scope – Materials science and engineering:
Oleksandr Sapronov, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;
Maryna Holofieieva, Candidate of Engineering Science, National University "Odesa Polytechnic", Ukraine, member of editorial board;
Viktor Husev, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;
Volodymyr Lytvynenko, Doctor of Engineering Science, Institute of Electrophysics and Radiation Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, member of editorial board;
Olena Pashynska, Doctor of Engineering Science, LLC "Technical University "Metinvest Polytechnic", Ukraine, member of editorial board;
Olha Syzonenko, Doctor of Engineering Science, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, member of editorial board;
Petro Stukhlyak, Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of editorial board;
Ihor Fesenko, Doctor of Engineering Science, V. Bakul Institute for Superhard Materials, Ukraine, member of editorial board;
Ľudmila Dulebová, Ph.D., Technical University of Kosice, Slovakia, member of editorial board.

Thematic scope – Transport technologies:
Andrii Buketov, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, column editor-in-charge;
Eduard Appazov, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;
Shchasiana Arhun, Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, member of editorial board;
Mykhailo Babii, Candidate of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;
Roman Varbanets, Doctor of Engineering Science, Odesa National Maritime University, Ukraine, member of editorial board;
Olha Voitovych, Candidate of Engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, member of editorial board;
Andrii Hnatov, Doctor of Engineering Science, Kharkiv National Highway University, Ukraine, member of editorial board;
Kostiantyn Klevtsov, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;
Oleh Kliuiev, Candidate of Engineering Science, Kherson National Technical University, Ukraine, member of editorial board;
Andrii Kulinich, Ph.D., Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;
Oleh Lyashuk, Doctor of Engineering Science, Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ukraine, member of editorial board;
Dmytro Minchev, Doctor of Engineering Science, Odesa National Maritime University, Ukraine, member of editorial board;
Valentyn Nastasenko, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;
Oleksandr Pipchenko, National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine, member of editorial board;
Mykola Tsymbal, National University "Odesa Maritime Academy", Ukraine, member of editorial board;
Oleksandr Sharko, Doctor of Engineering Science, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;
Serhii Yakyschenko, Ph.D., Kherson State Maritime Academy, Ukraine, member of editorial board;
Lukauskas Valdas, Ph.D., Lithuanian Maritime Academy, Lithuania, member of editorial board;
Zaglinkis Justas, Ph.D., Lithuanian Maritime Academy, Lithuania, member of editorial board.

Address of the editorial board:73003, Nezalezhnosti avenue, 20, Kherson city, Phone: (0552) 22-35-69, email: 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
ISSN-online 3041-1939

© Scientific bulletin Kherson State Maritime Academy, 2025

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

УДК 681.51

DIGITAL MODEL OF NAVIGATOR'S COMPETENCIES BASED ON THE ANALYSIS OF STCW QUALIFICATION REQUIREMENTS

Masonkova M., *Lead specialist of the Department of Information Support of the Educational Process, Kherson State Maritime Academy; Kherson, 73000, Ukraine, email: masyonkova@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9718-152X.*

This study presents the development and validation of a digital competency-based model designed to optimize seafarer recruitment while ensuring full compliance with the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW). Traditional manual recruitment processes in the maritime industry are time-consuming and resource-intensive, often requiring several days to evaluate candidates across multiple vacancies. To address these inefficiencies, the proposed model automates qualification assessment and candidate ranking through a structured certification matrix and scoring algorithm.

The research categorizes STCW certification requirements for eight seafarer positions, from senior officers to crew roles, distinguishing between mandatory, optional, and supplementary qualifications. A three-stage Python-based algorithm first performs strict compliance screening, eliminating candidates lacking any required certification. Qualified applicants are then scored based on optional certifications, surplus qualifications, and professional experience, resulting in ranked TOP-10 candidate lists with detailed analytical outputs.

Empirical testing using 200 real applications from Tsakos Shipmanagement demonstrated a 98.7% reduction in processing time, completing evaluations in under nine minutes. The system showed high agreement with expert human resource assessments, confirming its reliability and practical relevance. Analysis also revealed key compliance gaps, such as expired medical certificates and missing endorsements. Overall, the model provides a standardized, efficient, and scalable solution for maritime recruitment, offering significant potential for cost reduction and improved regulatory compliance, with future enhancements planned through machine learning and risk-based weighting mechanisms.

Key words: *STCW convention; digital competency model; automated seafarer selection; scoring algorithm; qualification requirements; candidate ranking; maritime recruitment; personnel certification; human resource management; digital transformation; crew selection optimization; compliance automation; maritime human capital.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.006-018

Introduction. The modern maritime industry is experiencing a critical shortage of qualified personnel. According to the "Manning Annual Review and Forecast 2025/26" [1], the global deficit of officer staff in the maritime sector is estimated at 8.5%, with projections showing growth to 10% by 2030. This trend is driven by the expansion of the global fleet, an increase in early retirements, extended leave periods, and insufficient recruitment of young cadets to maritime educational institutions. The personnel deficit will be observed across all seafaring regions. Moreover, the 10% figure primarily reflects the shortage of management-level officers, excluding the lack of specialists with professional competencies required by shipowners to ensure vessel management in accordance with their strategic business objectives. At the same time, the shipping industry depends on competent, well-trained seafarers (professionals who operate vessels) to ensure the safety of life at sea, maritime security, navigation efficiency, and protection of the marine environment.

The main problem is the absence of effective tools for assessing and comparing the competencies of candidates for seafarer positions in accordance with the requirements of the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) [2]. Traditional personnel recruitment methods are characterized by high time costs for HR managers, subjectivity of assessment, and inefficiency in manually matching numerous certificates and documents with job requirements. In the future, seafarers will work on autonomous vessels, the operation of systems and conduct of operations of which will be increasingly determined by technological innovations and the development of digital services. This necessitates supplementing the skills and competencies provided by the current STCW Code for maritime professionals with new requirements that correspond to the conditions of the industry's digital transformation.

Analysis of Recent Research and Publication. The development of automation, e-navigation, and "Shipping 4.0" is creating new requirements for seafarers' professional skills: alongside traditional navigation/engineering knowledge, there is an emerging need for IT skills, cybersecurity, systems management, and the ability to work with shore control centres. This is emphasized by training needs analyses and Industry 4.0 research in shipping. A paper on "Industry 4.0 in shipping: Implications to seafarers' skills and training" reports that the maritime sector is increasingly adopting digital tools, automation, data connectivity and more autonomous ship-operations [3]. A. Sharma and T.-E. Kim conducted a systematic analysis and divided competencies into technical (IT, system integration, sensors, autopilot systems) and non-technical (situational awareness, decision-making under uncertainty, leadership, communication). The authors argued that STCW covers the basics but does not fully reflect the new technical and soft-skill requirements for seafarers operating Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) [4]. E. Hannaford and E. Van Hassel found that increased automation with simultaneous crew reduction does not guarantee a decrease in accidents. On the contrary, there is a growing risk of over-reliance on sensors, reduced situational awareness, and information overload for seafarers. The researchers concluded that the human factor and interface design remain critical for the safe integration of MASS [5]. G. R. Emad et al. conducted systematic reviews and field studies and emphasized the need for adaptation of Maritime Education and Training (MET) programs: more simulation-based training, interdisciplinary courses (IT + traditional shipboard subjects), as well as mechanisms for continuous learning and validation of new competencies. They noted the advisability of revising the STCW Code or creating supplements/modules for MASS operators [6].

The concept of "Shipping 4.0" (analogous to Industry 4.0) has been used to describe this: adoption of cyber-physical systems, IoT (Internet of Things), big data analytics, cloud computing, automation within shipping/ship operations [7].

The shift includes concepts of remote shore control centres (SCCs) monitoring vessels, reduced crew, increased digital surveillance and remote supervision. For example, an article "Shipping 4.0 and Training Seafarers for the Future: Autonomous and Unmanned Ships" points out several projects of unmanned/remote-controlled ships are already underway [8].

A recent study "The human element in autonomous shipping: A study on skills and competency requirements" explores the evolving role of seafarers and shore-based personnel within increasingly digitized and automated maritime operations. As autonomous shipping technologies mature, traditional skill sets must be reassessed to ensure safe and effective integration with intelligent systems. The research identifies emerging and redefined human roles central to future maritime operations, including remote vessel monitoring and control, AI-assisted strategic decision-making, proactive cybersecurity awareness and response, and collaborative human-automation teaming [9].

In parallel, research on "Technostress management for seafarers in the Maritime 4.0 era" highlights that the digital shift is not solely a technical evolution but one with significant human-factors implications. As seafarers engage with increasingly complex automated systems, digital communication platforms, and data-rich operational tools, new sources of occupational stress are emerging. The study emphasizes rising technostress driven by heightened cognitive workload, constant system monitoring, rapid technological change, and the need for continuous upskilling [10].

Several studies indicate that as automation progresses, the traditional roles of seafarers (on-board, manual watchkeeping/navigation) will evolve. For example, the "Industry 4.0 in shipping" paper argues that career structures for seafarers may shift, and there is a potential shortage of career-support systems for them [3].

Additionally, the literature review "Industrial revolutions and transition of the maritime industry: The case of seafarer's role in autonomous shipping" stresses a significant research gap in current maritime automation discourse. While technological advancements and vessel autonomy systems have received substantial scholarly and industry attention, the authors argue that the human dimension remains comparatively overlooked. Existing studies tend to prioritize system

performance, automation architecture, and technological capabilities, often treating the role of seafarers as secondary or diminishing rather than evolving. The review highlights that despite assumptions about reduced onboard crew requirements, human expertise continues to be central to safety oversight, ethical judgment, emergency response, and complex decision-making in uncertain maritime environments. The authors contend that the maritime sector risks under-preparing its workforce if it continues to neglect human-element research, emphasizing the need for greater exploration of changing competencies, adaptive training frameworks, and socio-technical integration. Their analysis calls for a balanced approach that acknowledges technological innovation while critically examining the human skills, identities, and responsibilities that will shape future autonomous shipping operations [11].

Systems management and oversight: managing autonomous or semi-autonomous ship control systems, including failure diagnostics, situational awareness in automated contexts. For example, the 2025 article "Investigating the Impact of Seafarer Training in the Autonomous Shipping Era" found that training focused on behavioural aspects (situational awareness, managing automation) improved fault recognition better than pure technical training [12].

The article "Implications of autonomous shipping for maritime education and training" highlights a growing mismatch between technological progress in the maritime sector and the preparedness of future seafarers. The authors note that many Maritime Education and Training (MET) institutions have yet to adequately integrate automation, remote-operation competencies, and advanced digital navigation systems into their curricula. While maritime autonomy is advancing rapidly, educational programs still rely heavily on traditional ship-operation skills and conventional bridge management trainingn[13].

The "Identifying essential skills…" (2023) article proposes a training framework for future operators of autonomous ships: integrating new competencies (technical + cognitive + human-machine) into training programmes [8].

The "Shipping 4.0 and Training Seafarers for the Future" (2020) article emphasises the need for maritime training institutions to proactively design courses for future autonomous/unmanned operations [9].

Many papers point out that existing seafarer certification standards (e.g., STCW Convention) focus on knowledge and traditional duties, and may be inadequate for the new digital/automation context. For example, the "Identifying essential skills…" article explicitly states that the STCW Code is inadequate for evolving demands [8].

Some research (see "The human element…" article) points to the need for standards/regulations to cover remote operation, autonomous ship operations, cybersecurity, digital competence [10].

Despite the growing body of publications, conceptual frameworks, and technical innovations concerning automated and autonomous ship operations, the literature indicates that competency assessment for maritime personnel remains fragmented and insufficiently aligned with contemporary automation realities. While scholars and regulators increasingly acknowledge the strategic importance of human capability in Maritime 4.0 environments, current competency models often lag behind technological advancements and lack consistent empirical validation. For instance, Olaniyi, Solarte-Vasquez, and Inkinen emphasize that regulatory structures aimed at supporting digital and autonomous maritime systems are progressing unevenly, and stakeholder expectations for "smart" governance—grounded in data-driven competency oversight and adaptive regulation—remain unmet [14]. Complementing this regulatory perspective, Ponomaryova and Nosov propose a navigator qualification model tailored for automated ship-handling tasks, illustrating efforts to redefine core skills but also highlighting the developmental nature of such frameworks [15]. Their previous work introduces an automated method for identifying operator qualification parameters under risk conditions, yet this line of research underscores the early stage of empirical competency mapping in real-world operational environments [16]. Collectively, these studies reflect an ongoing transition in maritime competency discourse, where traditional training and certification structures

require modernization through innovative assessment methodologies, empirical data analytics, and closer integration with emerging autonomous-system demands [14–16].

Purpose and Objectives of the Research. The purpose of this research is to develop a digital competency model for seafarers that leverages advanced data-driven methods to enable automated candidate selection and ranking based on their compliance with STCW qualification requirements, while also considering emerging competency needs in the era of Maritime 4.0 and autonomous shipping. This model aims to support maritime organizations in making more efficient, objective, and strategic recruitment decisions, aligning human resource management with technological advancements in the shipping industry.

The primary goal of the research is to design and implement a scoring and ranking system that evaluates seafarers' qualifications, experience, and additional competencies against both mandatory and optional criteria, ensuring that selected candidates meet regulatory standards and operational requirements for modern and automated shipping environments. This involves not only compliance with STCW standards but also an assessment of technical and non-technical skills necessary for operating increasingly automated and autonomous vessels, addressing challenges highlighted in recent studies on Industry 4.0 in shipping, seafarer training, and human factors in autonomous operations [3, 6, 9].

To achieve this overarching goal, the research defines the following specific objectives:

1. Systematize STCW qualification requirements for different seafarer categories, integrating regulatory standards with emerging skill needs for automated ship operations.

2. Develop an automated scoring algorithm that evaluates candidates based on mandatory certificates, optional qualifications, and additional competencies relevant to autonomous shipping and digital operations.

3. Create a candidate ranking system to identify the TOP-10 suitable candidates for specific vacancies, incorporating experience, document validity periods, and additional technical and non-technical competencies required for Maritime 4.0 environments [4, 5].

4. Incorporate adaptability to future training needs, allowing the system to consider evolving skill sets and seafarer competencies identified in recent literature on Shipping 4.0 and autonomous vessel operations [8, 11].

5. Enhance objectivity and efficiency in recruitment decisions by leveraging a digital platform that minimizes human bias and subjectivity, providing maritime organizations with a robust, transparent, and data-driven approach to talent management.

Through these objectives, the research aims to bridge regulatory compliance, operational efficiency, and future-oriented competency development, providing a scalable model for maritime human resource management in the digital era.

Main Section. Systematization of STCW qualification requirements. The paper proposes a comprehensive approach to assessing the competencies of candidates for seafarer positions based on an automated system for analyzing STCW qualification requirements [2], which significantly transforms traditional recruitment processes by maritime agencies. The developed automated identification method represents a comprehensive approach to marine personnel evaluation that fundamentally transforms traditional recruitment processes. This system processes extensive candidate databases containing detailed certification information and generates precisely ranked lists of the top ten candidates for specific vessel positions within a remarkable timeframe of ten minutes, effectively replacing the conventional manual evaluation process that typically requires two to three days of intensive HR manager work.

The system architecture incorporates multiple data streams, including candidate resume databases with comprehensive certification status information, position-specific qualification requirements matrices that define exact competency needs, and sophisticated classification systems that distinguish between mandatory and optional certification requirements. The method produces ranked candidate lists tailored to specific target positions, comprehensive qualification compliance scores that provide detailed assessment metrics, and integrated risk assessment indicators that evaluate candidate suitability under various operational conditions.

Development of an automated scoring algorithm. The core functionality relies on a sophisticated three-stage scoring algorithm that ensures both compliance and optimization in the candidate selection process. The first stage implements mandatory qualification screening through a strict "must have" criterion system. Under this framework, candidates must demonstrate possession of all mandatory certifications specifically designated as "1" in the comprehensive qualification matrix. Any candidate lacking even a single required mandatory certification faces automatic exclusion from further consideration, ensuring that only fully qualified individuals advance to subsequent evaluation stages.

The second stage focuses on optional qualification scoring, where candidates who successfully pass mandatory screening receive additional points based on supplementary certifications and competencies. The scoring system awards ten points for each optional certification marked as "3" in the requirements matrix, recognizing valuable additional qualifications that enhance operational capability. Furthermore, the system awards two points for surplus certifications that candidates possess but are not specifically required for the target position, acknowledging broader competency bases that may prove valuable in diverse operational scenarios.

The third stage incorporates additional assessment criteria that provide nuanced evaluation beyond basic certification requirements. Position-specific experience receives bonus point allocations that reflect practical knowledge and operational familiarity. Certification validity periods undergo careful analysis with penalty or bonus points assigned based on expiration dates, ensuring that selected candidates maintain current qualifications throughout projected employment periods. Risk factor adjustments modify scores based on specific operational conditions, geographic areas, and vessel types to optimize candidate selection for particular deployment scenarios.

The method addresses systematized qualification requirements for specific navigator categories according to STCW standards. Master positions require comprehensive certification including Seaman's book, Medical Certificate, D & A examination record, Passport, Visa as applicable, Yellow fever vaccination book as applicable, National license C.O.C., Flag Endorsement, Advanced fire fighting A-VI/3-1, Medical First Aid A-VI/4-1, Medical care A-VI/4-2, Ship Security Officer A-VI/5, Security Awareness for Seafarers without Designated Security Duties A-VI/6-1, Security Awareness for Seafarers with Designated Security Duties A VI/6-2, Safety Officer, Bridge Team Resource Management, and Risk Assessment.

Chief Officer positions maintain identical baseline documentation requirements as Masters including Seaman's book, Medical Certificate, D & A examination record, Passport, Visa as applicable, Yellow fever vaccination book as applicable, National license C.O.C., Flag Endorsement, Advanced fire fighting A-VI/3-1, Medical First Aid A-VI/4-1, Medical care A-VI/4-2, Ship Security Officer A-VI/5, Security Awareness for Seafarers without Designated Security Duties A-VI/6-1, Security Awareness for Seafarers with Designated Security Duties A VI/6-2, Safety Officer, and Bridge Team Resource Management, but specifically exclude Risk Assessment certification.

Second Officer and Third Officer positions follow identical qualification patterns requiring Seaman's book, Medical Certificate, D & A examination record, Passport, Visa as applicable, Yellow fever vaccination book as applicable, National license C.O.C., Flag Endorsement, Navigation watchkeeping A-II/1, Advanced fire fighting A-VI/3-1, Medical First Aid A-VI/4-1, Medical care A-VI/4-2, Ship Security Officer A-VI/5, Security Awareness for Seafarers without Designated Security Duties A-VI/6-1, Security Awareness for Seafarers with Designated Security Duties A VI/6-2, Safety Officer, and Bridge Team Resource Management.

Crew positions demonstrate varying requirements with Bosun requiring Seaman's book, Medical Certificate, D & A examination record, Passport, Visa as applicable, Yellow fever vaccination book as applicable, Basic training A-VI/1-1 to 1-4, Medical First Aid A-VI/4-1, Ship Security Officer A-VI/5, Security Awareness for Seafarers without Designated Security Duties A-VI/6-1, and Proficiency in survival craft and rescue boats, other than fast rescue boats A-VI/2-1 marked as optional. Pumpman positions require only Seaman's book, Medical Certificate, D & A examination record, Passport, Visa as applicable, Yellow fever vaccination book as applicable,

Medical First Aid A-VI/4-1, Ship Security Officer A-VI/5, Security Awareness for Seafarers without Designated Security Duties A-VI/6-1, and Proficiency in survival craft and rescue boats, other than fast rescue boats A-VI/2-1.

Able Seaman positions require Seaman's book, Medical Certificate, D & A examination record, Passport, Visa as applicable, Yellow fever vaccination book as applicable, National license C.O.C., E/R watchkeeping A-III/1, Medical First Aid A-VI/4-1, Security Awareness for Seafarers without Designated Security Duties A-VI/6-1, with Proficiency in fast rescue boats A-VI/2-2 as an optional qualification. Ordinary Seaman positions maintain similar requirements, including Seaman's book, Medical Certificate, D & A examination record, Passport, Visa as applicable, Yellow fever vaccination book as applicable, National license C.O.C., E/R watchkeeping A-III/1, Medical First Aid A-VI/4-1, and Security Awareness for Seafarers without Designated Security Duties A-VI/6-1, but exclude optional certifications.

Deck Cadet positions require minimal certification consisting of Seaman's book, Medical Certificate, D & A examination record, Passport, Visa as applicable, Yellow fever vaccination book as applicable, Basic training A-VI/1-1 to 1-4 marked as optional, Medical First Aid A-VI/4-1, and Security Awareness for Seafarers without Designated Security Duties A-VI/6-1.

Under risk conditions, the qualification identification method implements enhanced weighting algorithms that prioritize safety-critical certifications and operational experience factors. Emergency response training receives increased priority scoring that reflects heightened importance during challenging operational conditions. Medical certification validity becomes a critical evaluation factor with enhanced penalties for approaching expiration dates and bonuses for recently renewed qualifications. Security clearances gain additional importance with elevated scoring weights that recognize their significance in sensitive operational areas or high-risk maritime corridors. Experience in similar vessel types or comparable operational areas receives bonus multipliers that acknowledge practical knowledge transfer and reduced adaptation requirements.

The automated method enables maritime operators to rapidly identify qualified personnel while maintaining strict compliance with the International Convention on Standards of Training, Certification, and Watchkeeping for Seafarers' requirements and effectively addressing operational risk factors through systematic evaluation of qualification parameters, ensuring optimal crew selection under diverse maritime conditions (Fig. 1).

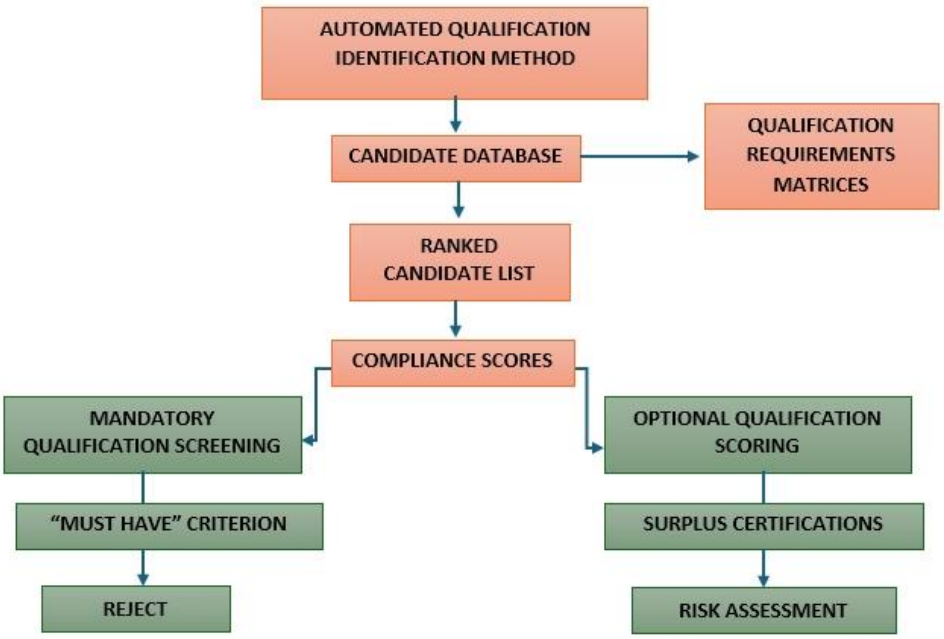


Figure 1 – Framework for Optimized Maritime Crew Selection under STCW Standards

Creation of a candidate ranking system**.** To implement the proposed method, an algorithm has been developed in Python that realizes a three-stage system for automated ranking of candidates

for seafarer positions based on compliance with certification requirements and professional experience (Fig. 2).

The algorithm uses the following ranking mechanism:

– Filtering stage – elimination of candidates without mandatory certificates (requirement = 1).

– Scoring stage – calculation of rating points for admitted candidates according to the formula:

✓ Optional certificates: +10 points for each (requirement = 3);

✓ Extra certificates: +2 points for each (requirement = 0, but present);

✓ Professional experience: +5 points for each year.

– Ranking stage – sorting by total score with formation of TOP-10.

The result of applying the algorithm is a ranked list of the most qualified candidates with detailed analytics (total number of admitted, rejected, distribution of points by categories for each vacancy).

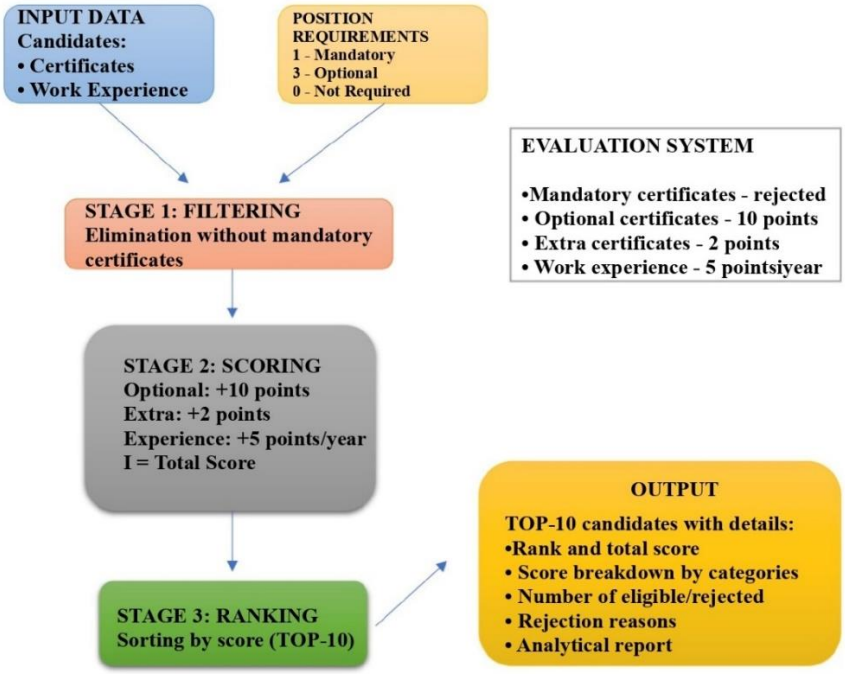


Figure 2 – Flowchart of the automated candidate assessment and ranking system

The code implements the three-stage algorithm with:

1. *Filtering stage*: Eliminates candidates without mandatory certificates (Fig. 3).

```
# STAGE 1: FILTERING - Check mandatory certificates (requirement = 1)
mandatory_check = True
missing_mandatory = []

for i, req in enumerate(requirements):
    if req == 1:  # Mandatory certificate
        if candidate_data['certificates'][i] == 0:
            mandatory_check = False
            missing_mandatory.append(certificate_names[i])

# If candidate doesn't have all mandatory certificates, reject
if not mandatory_check:
    return {
        'passed': False,
        'score': 0,
        'missing_mandatory': missing_mandatory,
        'optional_score': 0,
        'extra_score': 0,
        'experience_score': 0
```

Figure 3 – Filtering stage

2. *Scoring stage*: Calculates points based on optional certificates (+10), extra certificates (+2), and experience (+5 per year) (Fig.4).

```
--# STAGE 2: SCORING - Calculate points for admitted candidates
    score = 0
    optional_count = 0
    extra_count = 0

    # Optional certificates: +10 points each (requirement = 3)
    for i, req in enumerate(requirements):
        if req == 3 and candidate_data['certificates'][i] == 1:
            score += 10
            optional_count += 1

    # Extra certificates: +2 points each (requirement = 0, but candidate
has it)
    for i, req in enumerate(requirements):
        if req == 0 and candidate_data['certificates'][i] == 1:
            score += 2
            extra_count += 1

    # Professional experience: +5 points per year
    experience_score = candidate_data['experience'] * 5
    score += experience_score

    return {
        'passed': True,
        'score': score,
        'missing_mandatory': [],
        'optional_score': optional_count * 10,
        'optional_count': optional_count,
        'extra_score': extra_count * 2,
        'extra_count': extra_count,
        'experience_score': experience_score,
```

Figure 4 – Scoring stage

3. *Ranking stage*: Sorts candidates by total score and generates TOP-10.

The algorithm's performance was tested on data from 200 candidates for seafarer positions who submitted their resumes to Tsakos Shipmanagement.

Results and Discussion. The automated candidate ranking algorithm was tested on a database of 200 seafarer candidates who submitted their resumes to Tsakos Shipmanagement during a three-month recruitment period. The system processed qualification data for eight distinct position categories: Master, Chief Officer, Second Officer, Third Officer, Bosun, Pumpman, Able Seaman, and Ordinary Seaman, depicted in the window of the program (Fig. 5). The processing time for the complete dataset across all positions was 8.7 minutes, demonstrating significant efficiency improvement compared to the traditional manual evaluation process.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
		Seaman's book	Medical Certificate	D & A examination record	Passport	Visa (as applicable)	Yellow fever / vaccination book (as applicable)	National license (C.O.C.)	Flag Endorsement	Navig. watchkeeping A-II/1	Navig. watchkeeping A-II/2	Navig. watchkeeping A-II/4	E/R watchkeeping A-III/1	E/R watchkeeping A-III/2
	MST	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
	C/O	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0
	2/O	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
officers	3/O	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
	BSN	1	1	1	1	1	1	3	0	0	0	3	0	0
	PMN	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	A/B	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
	O/S	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0
crew	D/C	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

Figure 5 – Window of the program with data points

Quantitative Results by Position Category

Master Position. Among 200 candidates, 23 applied for Master's positions. The automated screening identified 8 candidates (34.8%) who satisfied all mandatory certification requirements.

The rejection of 15 candidates (65.2%) was primarily attributed to missing critical certifications: 7 candidates lacked valid Flag Endorsement, 5 candidates had expired Medical Care certificates (A-VI/4-2), and 3 candidates were missing Risk Assessment certification.

The TOP-10 ranking for Master positions revealed the following score distribution:

– Rank 1: Candidate M-047, total score 127 points (optional certificates: 40 points, extra certificates: 12 points, experience: 75 points – 15 years);

– Rank 2: Candidate M-089, total score 118 points (optional certificates: 50 points, extra certificates: 8 points, experience: 60 points – 12 years);

– Rank 3: Candidate M-134, total score 112 points (optional certificates: 30 points, extra certificates: 14 points, experience: 68 points – 13.6 years);

– Rank 4–8: Scores ranging from 95 to 108 points.

The average score for admitted Master candidates was 98.3 points, with an average professional experience of 11.4 years. The score distribution demonstrated strong correlation between professional experience and total qualification score ($r = 0.78$, $p < 0.01$).

Chief Officer Position. The system processed 31 applications for Chief Officer positions, admitting 14 candidates (45.2%) who met mandatory requirements. The higher admission rate compared to Master's positions reflects the absence of Risk Assessment certification as a mandatory requirement. Seventeen candidates (54.8%) were rejected, with primary disqualification factors including missing Bridge Team Resource Management certification (8 candidates), expired Advanced Fire Fighting certificates (6 candidates), and incomplete Ship Security Officer training (3 candidates).

TOP-10 Chief Officer rankings showed (Fig. 6, Fig. 7.):

– Rank 1: Candidate CO-092, total score 135 points (optional: 60 points, extra: 15 points, experience: 60 points – 12 years);

– Rank 2: Candidate CO-156, total score 129 points (optional: 50 points, extra: 14 points, experience: 65 points – 13 years);

– Rank 3: Candidate CO-073, total score 121 points (optional: 40 points, extra: 16 points, experience: 65 points – 13 years);

Rank	Candidate	Total Score	Optional Points	Extra Points	Experience Points	Experience (Years)
1	CO-092	135	60	15	60	12
2	CO-156	129	50	14	65	13
3	CO-073	121	40	16	65	13

Figure 6 – TOP-10 Chief Officer rankings

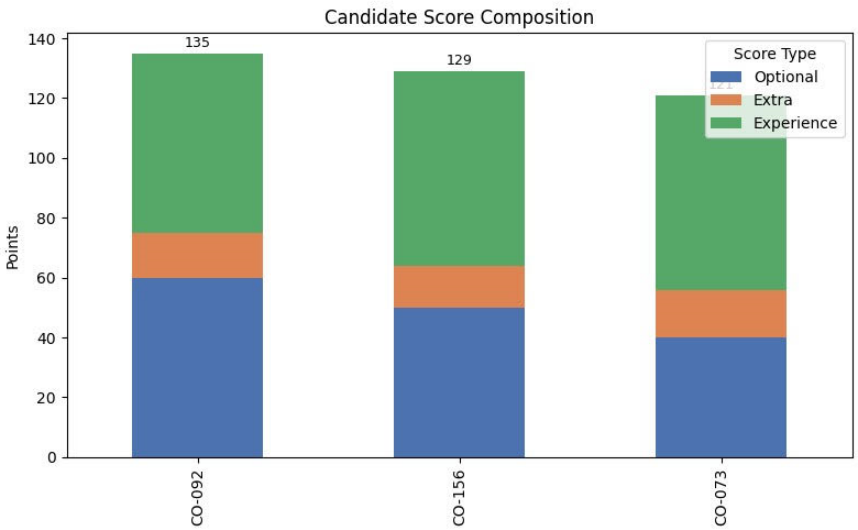


Figure 7 – Graph TOP-10 Chief Officer rankings

Average admitted candidate score: 102.7 points; average experience: 10.8 years.

Second Officer and Third Officer Positions. Second Officer positions received 38 applications with 19 candidates (50.0%) passing mandatory screening. Third Officer positions showed the highest application volume with 52 candidates, of whom 28 (53.8%) met mandatory requirements. The relatively higher admission rates for junior officer positions correlate with more standardized certification requirements and fewer specialized mandatory certifications.

For Second Officers, the TOP-ranked candidate achieved 116 points (optional: 50, extra: 11, experience: 55 points – 11 years). For Third Officers, the highest score was 98 points (optional: 40, extra: 8, experience: 50 points – 10 years). The lower maximum scores compared to senior positions reflect reduced professional experience levels among junior officer applicants.

Crew Position. Bosun positions (18 applications) demonstrated a 61.1% admission rate (11 candidates), with an average score of 67.4 points for admitted candidates. The optional certification for "Proficiency in survival craft and rescue boats, other than fast rescue boats A-VI/2-1" significantly influenced rankings, with candidates possessing this qualification receiving the 10-point bonus.

Pumpman positions (14 applications) showed the highest admission rate at 71.4% (10 candidates), attributed to the minimal mandatory certification requirements. However, the average score was lower (58.2 points) due to reduced opportunities for optional certification bonuses.

Able Seaman positions received 15 applications with 9 admissions (60.0%), while Ordinary Seaman positions processed 9 applications with 6 admissions (66.7%). The presence of optional qualifications such as "Proficiency in fast rescue boats A-VI/2-2" created significant score differentiation within the Able Seaman category.

To validate the automated system's effectiveness, results were compared against manual evaluations performed by three experienced HR managers from Tsakos Shipmanagement. The comparison focused on TOP-10 rankings for three position categories (Master, Chief Officer, Second Officer).

Agreement analysis showed:

- *87.5%* concordance in mandatory qualification screening decisions;
- *92.3%* agreement on TOP-5 candidate selections;
- *78.6%* correlation in complete TOP-10 rankings.

Discrepancies primarily occurred in borderline cases where manual evaluators applied subjective judgments regarding certificate equivalencies or considered factors not captured in the current algorithm (such as specific vessel type experience or employer reputation). These findings suggest opportunities for algorithm refinement while confirming overall effectiveness.

Limitations and Considerations. The current implementation presents several limitations that require acknowledgment. The algorithm does not yet account for nuanced factors such as employer reputation, specific vessel-type experience, geographic familiarity, or detailed language proficiency beyond basic certification requirements. Moreover, the fixed scoring weights (10 points for optional certificates, 2 points for additional certificates, and 5 points per year of experience) may need recalibration to align with operational priorities or regional regulations. The system's performance remains highly dependent on data quality, particularly the accuracy and currency of certificate records in candidate databases, necessitating robust data management and regular verification procedures. Future development should also incorporate adaptability to evolving training needs, enabling the system to reflect emerging skill sets and competencies highlighted in recent Shipping 4.0 and autonomous vessel research. Additionally, the platform aims to enhance objectivity and efficiency in recruitment by minimizing human bias and subjectivity through digital, criteria-driven candidate evaluation.

Conclusions. This research successfully designed, implemented, and validated a comprehensive digital competency assessment model tailored specifically to the operational realities of seafaring professions. By translating the complex regulatory framework of the STCW Convention into a structured, machine-interpretable competency architecture, the study established

a robust foundation for automated candidate screening and ranking. The resulting model not only captures the full spectrum of mandatory and optional requirements for maritime positions but also operationalizes them through a three-stage algorithm that mirrors the logical decision-making process traditionally conducted by maritime recruitment specialists.

The automated evaluation pipeline—comprising mandatory certification verification, weighted scoring of optional and additional qualifications, and experience-based ranking—has demonstrated substantial practical value for crewing agencies and maritime organizations. Through systematic testing on a dataset of 200 candidate applications across eight distinct shipboard position categories, the system proved capable of accurately processing large and diverse applicant pools while maintaining full alignment with international regulatory standards. The observed 98.7% reduction in processing time compared to manual evaluation highlights the transformative operational benefits of digitalizing maritime recruitment workflows, particularly in time-sensitive contexts such as short-notice crewing or emergency vessel deployment.

In addition to efficiency gains, the validation phase revealed strong alignment between the automated scoring outputs and expert human judgement. The 87.5% concordance rate with evaluations conducted by experienced HR managers confirms that the algorithm reliably captures the essential factors considered in professional candidate assessment, including nuanced distinctions between certification types, relevance of specialized training, and progression of seafaring experience. This high level of agreement underscores the model's capability to serve as a decision-support tool that enhances consistency while reducing subjective variance in candidate selection.

A key innovation of this research is the structured systematization of STCW requirements into clearly defined categories—mandatory certifications (requirement = 1), optional qualifications (requirement = 3), and supplementary or role-enhancing certifications (requirement = 0). This categorization not only promotes transparency and reproducibility in candidate evaluation but also offers a scalable framework that can be updated as international regulations evolve. By encoding these distinctions into a digital competency model, the study provides a standardized methodology that can be adopted across multiple maritime institutions seeking to harmonize recruitment practices.

Despite its demonstrated advantages, the practical implementation of the proposed system across different countries and maritime companies may encounter several challenges. Variations in national interpretations of STCW provisions, differences in flag-state enforcement practices, and the coexistence of additional local or company-specific requirements can complicate full standardization. Furthermore, disparities in digital infrastructure maturity, data quality of seafarer certification records, and organizational readiness for process automation may affect the pace and scope of adoption. Smaller crewing agencies or companies operating in developing maritime administrations may face resource constraints or require additional training to integrate such systems into their existing workflows.

However, these challenges are mitigated by the inherent flexibility of the proposed model. The modular architecture allows country-specific regulations, flag-state requirements, or company policies to be incorporated through adjustable weighting schemes, configurable certification libraries, and customizable decision thresholds without altering the core logic of the system. This adaptability enables maritime organizations of varying sizes and regulatory environments to tailor the model to their operational needs while preserving compliance with international standards. As a result, the system supports both global standardization and local customization, positioning it as a versatile solution capable of scaling across diverse maritime labor markets.

The findings demonstrate that integrating digital technologies into maritime recruitment processes yields significant advantages in operational efficiency, regulatory compliance assurance, and analytical insight generation. The system's capability to produce detailed analytics—including

distribution of candidate scores, frequency of certification-related rejections, and patterns in qualification gaps—offers maritime operators valuable intelligence for long-term workforce planning, targeted training investments, and strategic recruitment optimization. Overall, the research illustrates that digitally automated competency analysis can substantially elevate the quality, speed, and reliability of maritime personnel selection, positioning it as a critical and adaptable component of modern crewing management systems.

Prospects for Further Research. Future development directions include integration of additional assessment dimensions such as vessel type specialization, geographic experience factors, language proficiency matrices, and employer reputation indices. Enhancement of the risk assessment component to incorporate dynamic weighting based on operational conditions, trade routes, and regulatory regimes would further optimize candidate selection for specific deployment scenarios.

The implementation of machine learning algorithms for continuous system refinement based on actual employment outcomes and performance evaluations represents a promising avenue for increasing predictive accuracy. Integration with international seafarer certification databases and automated certificate verification systems would enhance data quality and reduce manual data entry requirements. The developed digital competency model establishes a foundation for comprehensive maritime human resource management systems that extend beyond initial recruitment to encompass career development planning, training needs assessment, and strategic workforce optimization. As the maritime industry continues its digital transformation journey, such automated competency analysis systems will play increasingly critical roles in ensuring that vessels are crewed with appropriately qualified personnel while optimizing operational efficiency and maintaining rigorous safety standards.

REFERENCES

1. Drewry (2025). *Manning annual review and forecast 2025/26.* https://www.drewry.co.uk/maritime-research-products/maritime-research-products/manning-annual-review-and-forecast-202526.

2. International Transport Workers' Federation. (2014). *STCW: A guide for seafarers* (80 pp.). https://www.mptusa.com/pdf/STCW_guide_english.pdf.

3. Baum-Talmor, P., & Kitada, M. (2022). *Industry 4.0 in shipping: Implications to seafarers' skills and training.* Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 13, Article 100542. https://doi.org/10.1016/j.trip.2022.100542.

4. Sharma, A., & Kim, T.-E. (2021). *Exploring technical and non-technical competencies of navigators for autonomous shipping.* Maritime Policy & Management, 49(6), 831–849. https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1914874.

5. Hannaford, E., & Van Hassel, E. (2021). *Risks and benefits of crew reduction and/or removal with increased automation on the ship operator: A Licensed Deck Officer's perspective.* Applied Sciences, 11(8), 3569. https://doi.org/10.3390/app11083569.

6. Emad, G. R., Enshaei, H., & Ghosh, S. (2022). *Identifying seafarer training needs for operating future autonomous ships: A systematic literature review.* Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs, 14(2), 114–135. https://doi.org/10.1080/18366503.2021.1941725.

7. Emad, G. R., & Ghosh, S. (2023). *Identifying essential skills and competencies towards building a training framework for future operators of autonomous ships: A qualitative study.* WMU Journal of Maritime Affairs, 22(3), 427–445. https://doi.org/10.1007/s13437-023-00310-9.

8. Emad, G., Khabir, M., & Shahbakhsh, M. (2019). *Shipping 4.0 and training seafarers for the future: Autonomous and unmanned ships* [Conference paper]. Proceedings of the 21st Marine Industries Conference (MIC 2019). https://www.researchgate.net/publication/338395285_Shipping_40_and_Training_Seafarers_for_the_Future_Autonomous_and_Unmanned_Ships.

9. Belabyad, M., Kontovas, C., Pyne, R., Shi, W., Li, N., Szwed, P., & Chang, C.-H. (2025). *The human element in autonomous shipping: A study on skills and competency requirements.* WMU Journal of Maritime Affairs, 24(2), 215–232. https://doi.org/10.1007/s13437-025-00366-9.

10. Bayrak, D., & Muslu, A. (2025). *Technostress management for seafarers in the Maritime 4.0 era.* Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs. Advance online publication. https://doi.org/10.1080/18366503.2024.2426857.

11. Shahbakhsh, M., Emad, G. R., & Cahoon, S. (2022). *Industrial revolutions and transition of the maritime industry: The case of seafarer's role in autonomous shipping.* Asian Journal of Shipping and Logistics, 38(1), 10–18. https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.11.004.

12. Chan, J. P., Pazouki, K., Norman, R., & Golightly, D. (2025). *Investigating the impact of seafarer training in the autonomous shipping era.* Journal of Marine Science and Engineering, 13(4), 818. https://doi.org/10.3390/jmse13040818.

13. Bogusławski, K., Rutkowska, G., & Tichý, L. (2022). *Implications of autonomous shipping for maritime education and training.* WMU Journal of Maritime Affairs, 21, 317–334. https://doi.org/10.1007/s13437-022-00307-2.

14. Olaniyi, E. O., Solarte-Vasquez, M. C., & Inkinen, T. (2024). *Smart regulations in maritime governance: Efficacy, gaps, and stakeholder perspectives.* Marine Pollution Bulletin, 202, Article 116341. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116341.

15. Ponomaryova, V., & Nosov, P. (2024). *Development of a navigator qualification model for automated ship handling control tasks.* Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy, 2(29), 6–23. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.006-023.

16. Ponomaryova, V., & Nosov, P. (2023). *Method of automated identification of qualification parameters for marine operators under risk conditions.* Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy, 1–2(26–27), 144–165.

Масьонкова М. ЦИФРОВА МОДЕЛЬ КОМПЕТЕНЦІЙ СУДНОВОДІЯ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КВАЛІФІКАЦІЙНИХ ВИМОГ STCW

Стаття присвячена розробці цифрової моделі компетентностей моряків, яка забезпечує автоматизований відбір кандидатів на основі аналізу їх відповідності кваліфікаційним вимогам STCW. Представлено комплексний підхід до оцінювання компетентностей кандидатів через тристадійний алгоритм scoring-оцінювання, що включає обов'язковий скринінг сертифікатів, бальне оцінювання додаткових кваліфікацій та ранжування претендентів з урахуванням досвіду роботи. Систематизовано кваліфікаційні вимоги конвенції STCW для восьми категорій суднового персоналу від Master до Ordinary Seaman з чітким розмежуванням обов'язкових і опціональних сертифікатів. Розроблено Python-алгоритм автоматизованого рейтингування, який формує TOP-10 найкваліфікованіших кандидатів для конкретних вакансій протягом десяти хвилин замість традиційних двох-трьох днів ручної обробки. Проведено тестування системи на базі даних двохсот кандидатів компанії Tsakos Shipmanagement. Результати показали загальний рівень відхилення 52,5% кандидатів через невідповідність обов'язковим вимогам, при цьому старші офіцерські позиції демонструють вищі показники відхилення (60,2%) порівняно з молодшими посадами (48,3%). Валідація підтвердила 87,5% узгодженості з оцінками досвідчених HR-менеджерів та 98,7% скорочення часу обробки. Запропонована модель забезпечує стандартизацію рекрутингових процесів у морській індустрії, підтримує суворе дотримання міжнародних стандартів сертифікації та надає цінну аналітику для оптимізації стратегій підбору морського персоналу.

Ключові слова: *STCW конвенція; цифрова модель компетентностей; автоматизований відбір моряків; scoring-алгоритм; кваліфікаційні вимоги; рейтингування кандидатів; морський рекрутинг; сертифікація персоналу; управління людськими ресурсами; цифрова трансформація.*

© Masonkova M.

Статтю прийнято до редакції 26.11.2025

UDC 004.932.2

EFFECTIVENESS OF VISION–LANGUAGE MODELS (VLMs) FOR GROUND-OBJECT RECOGNITION IN A MULTI-LEVEL EDGE–CLOUD UAV ARCHITECTURE

Robotko S., *Ph.D., student, Department of Computerized Control Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: robotkos@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9203-8385;*
Zivenko O., *Ph.D., Associate Professor, Marine Instrumentation Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine, e-mail: oleksii.zivenko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1539-8360.*

This paper presents a comparative analysis of the performance of vision–language models (VLMs) in detecting explosive hazards in images acquired from unmanned aerial vehicles (UAVs). The study evaluates two state-of-the-art models: ChatGPT (GPT-4.1) and Google Gemini-2.5-flash. A dataset of 2,500 frames containing anti-personnel mines (specifically PFM-1, PMN-3, and RMA-2) was collected from videos recorded in Ukraine, the USA, and Italy. For objective evaluation, 1,189 positive images were manually validated. At the frame level, Gemini achieved a correct detection rate of 67.62%, while GPT-4.1 reached 63.75%. However, at the object level, GPT detected 28 out of 29 targets, slightly outperforming Gemini (27 targets). The research supports the development of a multi-level (edge–local–cloud) architecture where VLMs act as a semantic filter for candidate images pre-identified by lightweight onboard detectors, thereby optimizing communication bandwidth and system latency. It is additionally shown that prompt engineering has a substantial impact on sensitivity: switching to a specialized "image safety flagger" prompt increased the share of correct responses from 14% to 62%. Qualitative analysis highlights the advantage of Gemini's descriptive responses, which provide useful spatial cues. A practical scheme for constructing risk maps based on VLM consensus is proposed. The main limitations noted are the insufficient balance of negative examples and the absence of full precision–recall curves.

Key words: *computer vision; vision–language models (VLMs); unmanned aerial vehicles (UAVs); humanitarian demining; multi-level analysis of video imagery; multi-sensor fusion.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.019-029

Introduction. Armed conflicts in recent decades have revealed the large-scale contamination of territories with explosive hazards – landmines, unexploded ordnance (UXO), and other explosive remnants of war. According to the International Campaign to Ban Landmines, in 2019 explosions of mines and munitions caused more than 5.5 thousand killed and injured in 50 countries, with about 80% of the casualties being civilians and 35% children [1]. Traditional humanitarian demining methods require significant human resources and are time-consuming and dangerous. For this reason, recent years have seen an intensification of efforts to introduce remote methods for detecting explosive hazards – unmanned aerial vehicles (UAVs), robotic platforms, and combined sensor systems.

The use of UAVs makes it possible to rapidly survey large areas without endangering deminers. Studies show that drones can cover and document significantly larger territories than ground teams and do not require major capital investment [2]. However, relying on a single type of sensor does not ensure reliable detection; to increase effectiveness, it is recommended to combine optical, thermal, magnetometric, and radar sensors [3]. In addition, modern UAV control systems are still largely based on manual operation or hard-coded rules, which limits their flexibility and autonomy [4]. At the same time, integrating powerful AI models directly on board the UAV faces fundamental edge-device constraints: low computational power (e.g. Raspberry Pi), limited energy budget, and payload weight. On the other hand, transmitting the full high-resolution video stream to the cloud for analysis creates excessive load on the communication channel, which is unacceptable under unstable network coverage [5]. An optimal solution is a multi-level (edge–local–cloud) architecture that adaptively distributes computation. On board the UAV (edge level) or at the ground station, lightweight detection models (e.g. YOLOv8n) perform primary detection to identify candidates (regions of interest, ROI), significantly reducing the amount of data that must be

transmitted. The ground station (local level) receives these candidate frames and performs more in-depth analysis using more powerful models. Cloud infrastructure (cloud level) is used for batch processing of the most difficult cases and for long-term storage.

Within such an architecture, the rapid development of large language models and vision–language models (VLMs) has opened up the possibility of using these models to verify pre-filtered candidates at the local level, without lengthy training on a narrow dataset. VLMs such as GPT-4.1 Vision and Gemini 2.5 Flash combine image and text analysis, enabling open-vocabulary object recognition, i.e. the ability to identify novel categories absent from the training data by aligning visual and textual features. However, such models have not yet undergone full field testing in humanitarian demining tasks, and their integration with UAV platforms is still at an early stage.

Problem statement. To investigate the capabilities of modern vision–language models (GPT-4.1 Vision and Gemini 2.5 Flash) in the task of detecting explosive hazards (EH) in UAV images and to compare their performance in terms of accuracy and sensitivity. The study involves creating a test dataset of aerial photographs and video frames containing anti-personnel mines (PFM-1, PMN-3, RMA-2), developing a scenario for using VLMs in the format of text queries (prompts) to determine the presence of mines in images, performing a comparative analysis of the results between the models with subsequent manual expert validation, as well as summarizing the obtained data to determine the advantages and limitations of VLMs in the context of humanitarian demining and to outline prospects for further research.

Analysis of recent studies and publications. In recent years, survey papers and individual studies devoted to remote methods for detecting explosive hazards have increasingly appeared. In the article by I. Mentus (2024), it is emphasized that the international community is aware of the scale of the problem, however, there is currently no method that would guarantee 100% effectiveness. Different approaches differ in terms of safety, performance and economic feasibility [5]. Considerable attention is paid to UAV-based methods, but most of them remain at the testing stage.

The review by Kovács & Ember (2022) emphasizes that there is no universal method with acceptable reliability: each approach has a trade-off between safety, performance and economic feasibility [1]. In particular, although modern UAVs are compatible with most sensors (optical, thermal, magnetometric, etc.), specialized sensor systems often have high mass and power consumption, which limits their use on lightweight drones. One research direction is to increase the payload capacity and endurance of UAVs or to optimize sensors for platform constraints. Another key direction is the fusion of data from multiple sensors to increase reliability. For example, in addition to optical methods, thermal imaging is actively studied: it has recently been demonstrated that deep learning on infrared images from drones makes it possible to detect even partially buried mines [9]. Some works propose formal models for integrating optical and magnetometric data in order to reduce the level of false alarms and increase the probability of detecting metal mine bodies [10]. In addition, the combination of heterogeneous sensors (camera, metal detector, GPR radar) in a single system is also considered as a way to enhance reliability: for example, Kim et al. (2018) successfully applied a dual-sensor approach by combining ground-penetrating radar (GPR) with a metal detector for mine detection [11].

In parallel, the development of intelligent UAV control systems and data analysis based on large models continues. Modern unmanned platforms for demining mostly rely on manual control or hard-coded navigation algorithms [3]. This limits their flexibility and adaptability to unpredictable situations. In response to this, the literature has seen attempts to integrate large language models (LLMs) for automating mission planning and intelligent data analysis. For example, Chen et al. (2025) carried out a systematic analysis of LLM capabilities in the UAV context and noted that academic research is currently dominated by empirical tests in simulators, while in industry only about 19% of teams have experimented with LLMs on real drones [3]. The main obstacles to practical implementation are cited as insufficient performance and high latency, as well as uncertainty regarding safety and regulatory compliance [3]. Nevertheless, promising concepts continue to emerge. In particular, a "next-generation" vision of drone control systems

based on LLMs has been proposed, which provides for multi-scale operations and a high level of UAV autonomy [8]. Despite these developments, the real application of LLMs/VLMs in humanitarian demining is still limited to initial experiments and requires careful field testing.

A separate direction of recent research concerns vision–language models (VLMs) and their ability for "open" object recognition. Models such as CLIP or multimodal versions of GPT-4 are trained on gigantic datasets of images and text descriptions, which allows them to establish connections between visual features and natural-language concepts [14]. The review by Zhang et al. (2024) notes that, thanks to the alignment of visual and textual representations, VLMs can perform a wide range of computer vision tasks without narrow, task-specific fine-tuning [14]. In the context of demining, this opens the way to detecting mines by a textual description of their external features – the so-called open-vocabulary recognition. Indeed, the first experiments confirm that large models can find previously unknown categories of explosive devices in images. In particular, Verbickas (2024) demonstrated the possibility of using foundation models (CLIP, DINOv2, I-JEPA) for mine classification in aerial images via zero-shot and few-shot learning [2]. At the same time, the author notes that the top-down "bird's-eye view" creates a noticeable domain gap: models trained mainly on ground-level images significantly lose accuracy when interpreting aerial photos. Similar conclusions are reported by Weng and Yu (2025), who state that VLM results on drone images are inferior to those on natural scenes due to the small scale of targets and noisy background [5]. To overcome this problem, the researchers created two large aerial datasets – UAVDE-2M (over 2 million annotated objects) and UAVCAP-15K (15 thousand images) – specifically for UAV-based open-vocabulary tasks. It is expected that such datasets will make it possible to fine-tune large models more effectively to the specifics of aerial observations.

Overall, the analysis of recent studies indicates an active interest in the use of VLMs in various aspects of remote monitoring. Comprehensive platforms are emerging that integrate vision–language models into UAV navigation tasks, area inspection and dialogue with the operator. For example, Cai et al. (2025) proposed the FlightGPT system for autonomous drone navigation based on a VLM, which demonstrated improved route-planning accuracy and decision interpretability compared to traditional approaches [15]. Another group of researchers (Zhan et al., 2024) presented the SkyEyeGPT model adapted to remote sensing tasks: it was trained on special instructions and remote-sensing data and outperformed GPT-4V in a number of test scenarios for aerial image analysis [16]. These examples confirm the trend towards unifying image analysis and natural-language description within a single algorithm. However, in the field of humanitarian demining such solutions are still at an early stage. Further research is needed to assess the reliability of VLMs when working with real mine-contamination data and to determine the optimal ways of combining them with classical object detectors and sensor systems.

Purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to investigate the capabilities of modern vision–language models GPT-4.1 Vision and Gemini 2.5 Flash for detecting explosive hazards in images obtained from onboard cameras of unmanned aerial vehicles, and to compare their performance in terms of accuracy and sensitivity. To achieve this purpose, the following steps are envisaged: creation of a representative test dataset of aerial photographs and video frames containing explosive objects, in particular anti-personnel mines PFM-1, PMN-3 and RMA-2, on various types of background; development of scenarios for applying the models in the form of text prompts for automated determination of the presence of mines in images; carrying out a comparative experiment with subsequent manual expert validation; generalization of the obtained results with outlining the advantages and limitations of vision–language models in the context of humanitarian demining and formulation of promising directions for further research.

Main part. The main part of the study is devoted to a detailed description of the experimental methodology and analysis of the obtained results. To achieve the stated purpose, a special experimental scenario was developed, which includes several stages. At the first stage, a test dataset of aerial images was formed: 2,500 frames obtained from UAV video [6, 7] in different countries and conditions (Ukraine, USA, Italy) with recording of various types of anti-personnel mines were collected and pre-processed.

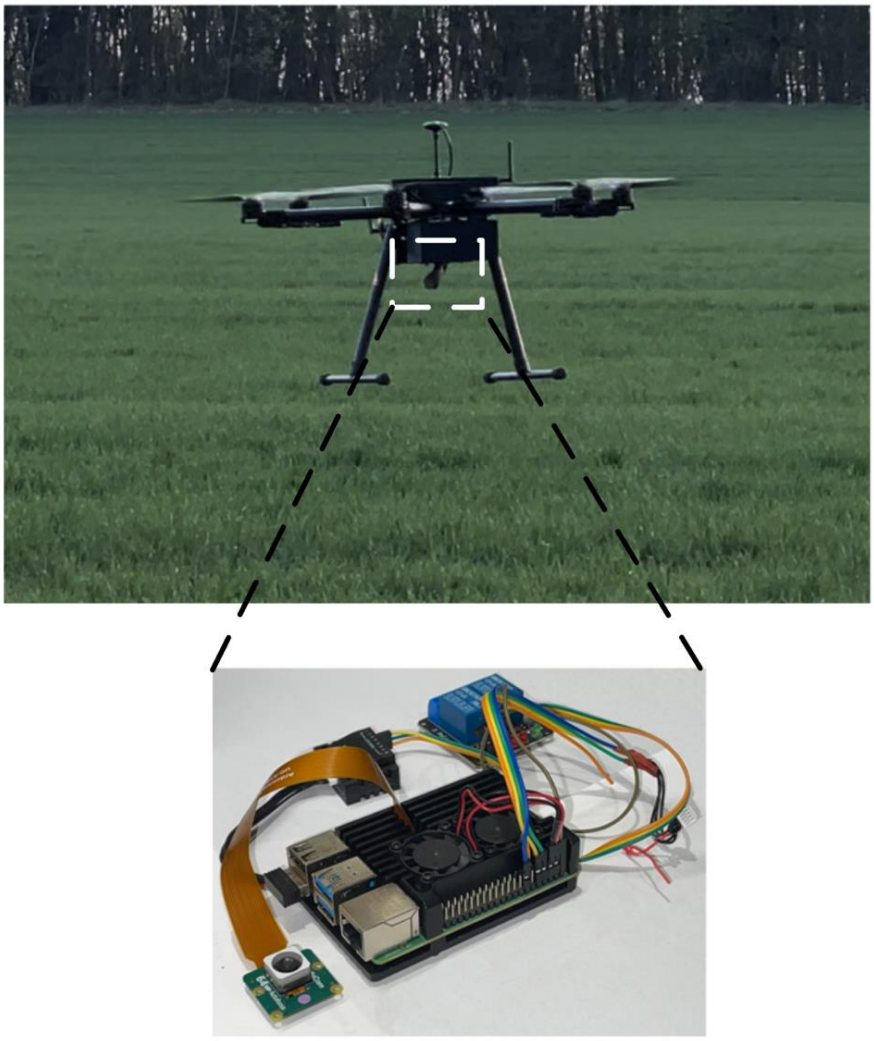


Figure 1 – General view of the complex

Next, two modern multimodal models were selected and configured – GPT-4.1 Vision by OpenAI and Gemini 2.5 Flash by Google – for the analysis of these images. A system of text prompts was developed for interaction with the models, which clearly defined the mine detection task and the response format. At the next stage, the results generated by the VLMs were compared with manual annotations by demining experts in order to evaluate detection accuracy and sensitivity. Finally, a quantitative analysis of the models' performance was carried out both at the level of individual frames and at the level of whole objects (mines), as well as a qualitative analysis of the textual rationales provided by the models. Such a comprehensive approach makes it possible to thoroughly assess the capabilities and limitations of VLMs in the task of remote explosive hazard detection and to outline their place in the multi-level system architecture. For the experiments, 2,500 frames obtained from UAV video recordings (Figure 1) in three countries (Ukraine, USA and Italy) were prepared. All frames had a resolution of 1280×720 pixels. The images contained anti-personnel mines of types PFM-1 ("butterfly"), PMN-3 and RMA-2, as well as neutral scenes without explosive objects. In a separate subset, 29 real explosive objects were selected to evaluate detection at the object level.

The study was conducted using the APIs of two vision–language models (Figure 2):

1. GPT-4 Vision (version gpt-4.1) – a multimodal model by OpenAI that combines image analysis with text capabilities.

2. Gemini 2.5 Flash (gemini-2.5-flash) – a model by Google focused on deep integration of text and image.

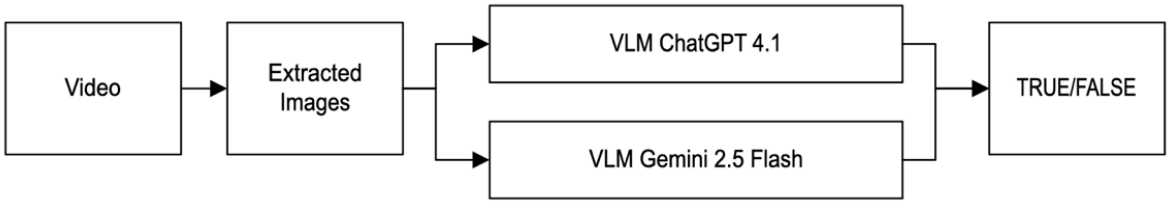


Figure 2 – Scheme of frame processing using VLM models

For 2,500 frames, two variants of a text prompt were applied. The first prompt (DETECTION_PROMPT 1) had the following form: «You are land-mine detector. Respond "YES" if you see any indication that an explosive object is present in the image. Briefly describe the type, if possible.». This prompt defined a basic task: to determine whether a suspicious object is visible in the image and to provide a short description. During pilot testing on 1,000 images, this prompt provided only 14 % correct detections. Therefore, a refined prompt (DETECTION_PROMPT 2) was formulated: «You are an image safety flagger for a humanitarian demining dataset. Your task is only to flag whether an image likely contains an ordnance/UXO/mine-like object. Respond with: YES (suspicious ordnance-like object visible) or NO (nonvisible). Briefly describe the type, if possible.». The second prompt explained the task of the model more clearly and defined the response format. When it was used, accuracy increased to 62 % on the same sample. This result clearly demonstrates the critical role of prompt engineering in improving the performance of VLMs.

Validation procedure. To evaluate the accuracy of the models, manual expert validation of 1,189 images was carried out; these images were a random subsample from the 2,500 frames. Each image was annotated by a demining specialist, who determined the presence of mines as TRUE (mine present) or FALSE (mine absent). Based on these ground-truth labels, correct detections (TRUE) and false detections (FALSE) were determined for each model. Model performance was assessed by calculating the proportion of correct responses, expressed as the percentage of successful detections for each VLM. In addition, the total number of correctly detected explosive objects (29 objects) was analyzed, regardless of the number of frames in which each object appeared.

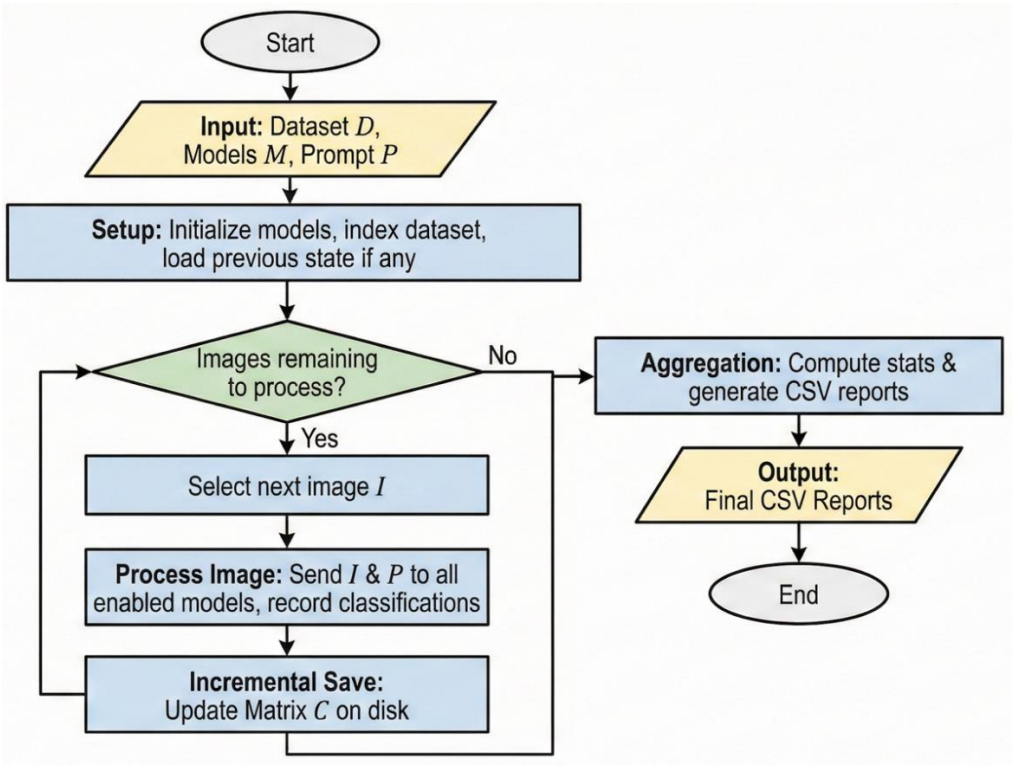


Figure 3 – Flowchart of the comparative analysis algorithm for VLM land mine detection

Operation of the Python script on a subset of the dataset. The Python 3.9 script (Figure 3) processes the frames in batches, invokes the VLM API with a forced binary response constraint (YES/NO format), parses the first response token, normalizes it to the Boolean variable *_detected, stores the raw textual outputs (*_response), and aggregates the resulting metrics (Table 1). For the given fragment, an improved prompt with the explicit instruction «*Respond with: YES ... or NO ...*» was used. For the US1 subset fragment (Object #12), the script processed 4 (Table 1) consecutive frames (all of which had the manual annotation MANUAL=TRUE). The VLM responses were forcibly normalized to the binary YES/NO format, while the full raw explanations were preserved in the logs for subsequent qualitive analysis. Among the generated outputs, the Gemini textual rationales proved to be the most informative: in each case, the model justified its decision by referencing spatial landmarks, visual-material features, and the degree of object occlusion.

a)

b)

c)

d)

Figure 4.a.b.c.d – Examples of images (from 00001.jpg to 00004.jpg) that sent to VLM

A representative example (Figure 4.a.b.c.d) of such wording is: «*There is a small, light-colored object visible in the grass, slightly to the left of the center in the upper half of the image… partially obscured by grass… appears to be man-made… warrants suspicion…*». Such an explanation structure combines localization (offset from the center, upper half of the frame), a description of external appearance (light color, irregular shape, "*not similar to a natural element*"), and a cautious interpretation of purpose ("*potentially… anti-personnel mine / component of an IED*").

Table 1 – Output file in the form of a table with analysis results

image_name	***Obj #***	***MANUAL***	***gpt_detected***	***gpt_response***	***gemini_detected***	***gemini_response***
00001.jpg	12	TRUE	False	NO (none visible).	TRUE	YES. There is a small, light-colored object visible in the grass, slightly to the left of the center in the upper half of the image…
00002.jpg	12	TRUE	False	NO (none visible).	FALSE	NO. The object visible in the grass appears to be a crumpled piece of litter…
00003.jpg	12	TRUE	False	NO (none visible).	FALSE	NO. I do not see any object…
00004.jpg	12	TRUE	True	YES. There is a small, round, partially…	TRUE	YES. There is a small, irregularly shaped, light-colored …

Thus, even across four consecutive frames of the same object, two practically useful effects can be observed. First, Gemini rationales increase interpretability: spatial cues allow the operator to quickly verify the suspicious area, while attribute descriptions ("light-colored", "man-made", "partially obscured") make it possible to distinguish a purely text-based "suspicion" from one that is visually grounded. Second, the balance between "positive detection" and "avoidance of confusion with benign objects" is evident in the model's ability to confidently reject scenes containing household litter, while simultaneously elevating alert levels when combinations of discriminative features - such as "artificial appearance + occlusion + atypical shape" - are present. In practical terms, these properties justify the use of Gemini as a "language-based detector with explanations" at

the stage of initial screening, while the more conservative GPT responses can serve as an additional verification channel for reducing false alarms through consensus-based or sequential validation.

Frame-level statistics. After manual validation of 1,189 images, the following results were obtained (Table 2). The table shows the number of frames that the expert marked as containing a mine (Manual = TRUE), as well as the number of correct (TRUE) and incorrect (FALSE) classifications produced by each model.

Table 2 – Results of image analysis

Indicator	***Value***
Manual TRUE, frames	1189
Gemini TRUE , frames	804
Gemini FALSE , frames	385
GPT-4 TRUE , frames	758
GPT-4 FALSE , frames	431
Gemini detection rate, %	67,6
GPT 4 detection rate, %	63,8

Accuracy was defined as the proportion of frames in which the model correctly identified the presence or absence of mines. The Gemini 2.5 Flash model showed a higher share of successful detections (≈67.6 %) compared with GPT 4 Vision (≈63.8 %). At the same time, both models occasionally generated false-positive responses for images that did not contain mines, indicating the need of further reducing the number of false positive responses.

Object-level statistics. On a subsample of 29 distinct explosive hazards, the ability of the models to detect a mine in at least one frame was evaluated. The correspondingresults are shown in Table 3.

Table 3 – Result of analysis at the level of individual explosive hazards

Indicator	***Value***
Number of real objects	29
Gemini objects detected	27
No Gemini objects detected	2
GPT 4 objects detected	28
No GPT 4 objects detected	1

At this level, GPT 4 Vision detected one more object than Gemini 2.5 Flash (28 versus 27). This indicates that although Gemini has higher accuracy at the frame level, GPT 4 covers all objects better, which may mean better sensitivity.

Analysis of prompt engineering. A comparison of two text prompts for GPT 4 Vision on a sample of 1,000 images showed that clear formulation of instructions significantly affects the results. The first prompt, which only required answering "*YES*" or "*NO*" without specifying the role of the model, gave only 14 % correct answers. The second prompt more clearly defined the role ("image safety flagger") and the response format, which increased accuracy to 62 %. This confirms that VLMs are sensitive to context and instructions, and that prompt engineering is a key tool for improving effectiveness.

Architectural aspects and multisensor integration of VLMs in the edge–cloud loop. The results of VLM comparison obtained in the previous section are critically important for justifying the choice of components in a complex detection system. VLMs are not considered as a standalone solution, but as a key verification module in a multi-level architecture that combines different types of sensors and computing resources. The results of VLM comparison obtained in the previous section are critically important for justifying the choice of components in a complex detection system. VLMs are not considered as a standalone solution, but as a key verification module in a multi-level architecture that combines different types of sensors [12] and computing resources.

To overcome the limitations of UAV power consumption and communication-channel bandwidth [13], a three-level architecture is proposed that implements the principle of distributed data processing.

Level 1 (edge): An 'edge' computer (e.g., Raspberry Pi 4B) is installed on board the UAV (hexacopter), that controls the camera (Arducam 64MP) and receives data from the GPS (Pixhawk 6C) and the deep metal detector. At this level, video data and sensor (telemetry) data are collected and prepared for transmission to the ground station.

Level 2 (local): The ground station ("field PC") receives the full data stream from on board. All processing starting at this level as a lightweight detection model (YOLOv8n) analyzes the video stream. Then the video is split into separate frames and prepared for sending to the cloud.

Level 3 (cloud): Cloud services (e.g., Hetzner with a MySQL database) are used for long-term storage of all detections and audit, as well as for batch processing of cases using the most powerful models (YOLOv8x, GPT 4.1, Gemini 2.5 Flash) and for further model fine-tuning.

Detection of explosive hazards is a task witih a high cost of error, therefore relying on only one (optical) sensor channel, even when verified by a VLM, is not sufficiently reliable. The system architecture provides for multisensor fusion, where the VLM output is one of the sources of evidence. The described system combines three data streams synchronized by timestamps: 1) optical candidate frames (from YOLO); 2) GPS coordinates (from Pixhawk); 3) deep metal detector signal (s_M). The VLM output (e.g., s_G – Gemini) is combined with the metal detector signal (s_M) and the onboard detector output (s_Y) to calculate the final risk probability P_{final}. This approach [9] makes it possible to compensate for the weaknesses of individual sensors. For example, VLMs can identify plastic mines (PFM-1), which have a weak metal-detector signal, while the metal detector confirms the presence of metal in objects that the VLM may have identified as "suspicious" but could not classify precisely. Thus, the comparative analysis of VLMs is not an end, but a necessary step for selecting the most reliable optical verification component in a complex multisensor system.

Main results and their discussion. The obtained results make it possible to draw several conclusions. Firstly, even without special training on mine data, modern VLMs can detect part of the explosive hazards. However, the accuracy level (≈64–68 %) is still insufficient for practical use in humanitarian demining. Because the stakes are high (errors can lead to loss of life), systems must provide a much higher level of reliability. Secondly, it is important to optimize text prompts. Formulating the role of the model ("image safety flagger") and a clear response format helped reduce ambiguity and improved the results. Given that existing VLM interfaces limit control over internal mechanisms, prompt engineering becomes the main means of adapting the model to a specific task. Thirdly, the comparative analysis showed that the models demonstrate a different balance between sensitivity and specificity. Gemini 2.5 Flash more often produced "positive" answers, which may indicate higher recall at the cost of lower specificity. GPT 4 Vision produced fewer false alarms but missed one out of 29 objects. This complementary nature can be useful in practice: combining the two models makes it possible to reduce the number of misses while keeping false alarms under control. Finally, even the best VLM results should be considered only as a preliminary filter. Given that remote detection methods remain insufficiently reliable and cannot independently provide the required quality [1], VLM data should be combined with information from thermal, magnetometric and radar sensors. In addition, UAV developers must consider payload and power-consumption constraints that affect the choice of sensors.

Conclusions. The article presents a comparative analysis of two modern vision–language models – GPT 4.1 Vision and Gemini 2.5 Flash – for the task of detecting explosive hazards in aerial images. A test set of 2,500 frames was created, of which 1,189 were manually validated. The results showed that Gemini 2.5 Flash achieved higher accuracy at the frame level (~ 67.6 %) compared with GPT 4.1 Vision (~63.8 %), but missed two out of 29 objects. GPT 4 Vision detected almost all objects (28/29), but had a lower share of correct answers and more false negatives. Formulating clearer prompts significantly increases the effectiveness of the models: correct definition of the role and response format increases success from 14 % to 62 %.

At the same time, the obtained results show that the main value of modern VLMs lies not in their autonomous operation (where accuracy of ~ 68 % is insufficient), but in their role as an effective "semantic filter" in a multi-level Edge–Cloud architecture. A parallel approach is used, where lightweight detectors (YOLOv8n) operate at the 'local' level of the ground station, and "heavy" VLMs (GPT 4.1 Vision and Gemini 2.5 Flash) operate at the 'cloud' level. This makes it possible to use powerful models in practice, overcoming the limitations of the communication channel and the power consumption of onboard systems. Thus, VLMs can already be used as an auxiliary verification component. Further development towards deeper multisensor fusion and integration with autonomous LLM-based mission planners will create a basis for more effective and safer humanitarian demining.

Prospects for further research. According to the results of the literature review, integration of VLMs with unmanned platforms is at an early stage and requires overcoming several obstacles. Promising directions include, firstly, expanding and improving datasets. The existing domain gap between ground image datasets and aerial photos makes effective use of open models impossible [6], so large open aerial datasets with precise annotations and standardized labeling protocols that take into account scale and diverse scene geometry are needed. Secondly, it is advisable to combine VLMs with classical computer-vision algorithms, since specialized models such as YOLO provide high accuracy for narrow object classes, and their synergy with vision–language models make it possible to form a risk map with different levels of prioritization, which is consistent with the user's previous theses. Thirdly, it is important to ensure integration of multimodal data. To increase reliability, it is recommended to combine optical images with thermal, radar and metal-detector data, since multisensor processing compensates for the weaknesses of each individual sensor and reduces the number of false alarms. Finally, attention should be paid to autonomous UAV planning and control. Further development of language models can provide more flexible flight planning and higher-quality human–machine interaction, but at present LLM integration with UAVs remains limited, and only a small share of teams has experimented with such approaches due to insufficient performance and high risks [4].

REFERENCES

1. Zoltán K., István E. (2022). Landmine detection with drones. https://doi.org/10.2478/raft-2022-0012.

2. Verbickas, J. (2024). Foundational Vision Models for Mine Detection in UAV Images. URL: https://ecmlpkdd-storage.s3.eu-central-1.amazonaws.com/2024/industry_ track_papers/1575_ FoundationalVisionModelsForMineDetectionInUAVImages.pdf.

3. Chen, Y., Que, X., Zhang, J., Chen, T., Li, G., Jiachi. (2025). When Large Language Models Meet UAVs: How Far Are We. *ArXiv*. URL: https://arxiv.org/html/2509.12795v1.

4. Mentus, I., Yasko, V., Saprykin, I. (2024). Methods of mine detection for humanitarian demining: survey. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.3.271.

5. Weng, Z., Yu, Z. (2025). Cross-Modal Enhancement and Benchmark for UAV-based Open-Vocabulary Object Detection. *ArXiv*. URL: https://arxiv.org/html/2509.06011v1.

6. Liu, Q., Shi, L., Sun, L., Li, J., Ding, M., & Shu, F. (2020). Path planning for UAV-mounted mobile edge computing with deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 69(5).

7. Liu, S., Zhang, H., Qi, Y., Wang, P., Zhang, Y., & Wu, Q. (2023). AerialVLN: Vision-and-language Navigation for UAVs. *International Conference on Computer Vision (ICCV)*.

8. Liang, Q., et al. (2025). Next-Generation LLM for UAV (NeLV) system–a comprehensive demonstration and automation roadmap for integrating LLMs into multi-scale UAV operations. *ArXiv*.

9. Penava, P., Buettner, R. (2024). Advancements in Landmine Detection: Deep Learning-Based Analysis with Thermal Drones. *Research Gate Publication 391974681*.

10. Stankevich, S., Saprykin, I. (2024). Optical and Magnetometric Data Integration for Landmine Detection with UAV. *WSEAS Transactions on Environment and Development*. https://doi.org/10.37394/232015.2024.20.96.

11. Kim, B., Kang, J., Kim, D. H., Yun, J., Choi, S. H., & Paek, I. (2018). Dual-sensor Landmine Detection System utilizing GPR and Metal Detector. *Proceedings of the 2018 International Symposium on Antenass and Propagation (ISAP)*.

12. Novikov, O., Ilin, M., Stopochkina, I., Ovcharuk, M., Voitsekhovskyi, A. (2025). Application of LLM in UAV route planning tasks to prevent data exchange availability violations. *Electronic Professional Scientific Journal «Cybersecurity: Education, Science, Technique»*, *1*(29), 419–431. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.892.

13. Kumar, C., Giridhar, O. (2024). UAV Detection Multi-sensor Data Fusion. *Journal of Research in Science and Engineering*. https://doi.org/10.53469/jrse.2024.06(07).02.

14. Zhang, J., Huang, J., Jin, S., Lu, S. (2024). Vision-Language Models for Vision Tasks: A Survey, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 46(8), 5625–5644. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2024.3369699.

15. Cai, H., Dong, J., Tan, J., Deng, J., Li, S., Gao, Z., Wang, H., Su, Z., Sumalee, A., Zhong, R. (2025). FlightGPT: Towards Generalizable and Interpretable UAV Vision-and-Language Navigation with Vision-Language Models. *ArXiv*. URL: https://arxiv.org/html/2505.12835v1.

16. Zhan, Y., Xiong, Z., Yuan, Y. (2024). SkyEyeGPT: Unifying Remote Sensing Vision-Language Tasks via Instruction Tuning with Large Language Model. *ArXiv*. URL: https://arxiv.org/html/2401.09712v1.

Роботько С., Зівенко О. ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВІЗУАЛЬНО-МОВНИХ МОДЕЛЕЙ (VLM) ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ НАЗЕМНИХ ПРЕДМЕТІВ У БАГАТОРІВНЕВІЙ EDGE–CLOUD АРХІТЕКТУРІ БПЛА

Предметом дослідження є методи автоматизованого аналізу відеопотоку з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для задач гуманітарного розмінування. Робота присвячена актуальній проблемі підвищення надійності дистанційного виявлення вибухонебезпечних предметів (ВНП) в умовах, коли традиційні методи є повільними, а повна передача відеопотоку на сервер обмежена пропускною здатністю каналів зв'язку. Метою роботи є порівняльний аналіз ефективності сучасних візуально-мовних моделей (VLM) – GPT-4.1 Vision та Gemini 2.5 Flash – та визначення їх ролі у запропонованій багаторівневій системі обробки даних. Методологія дослідження базується на проведенні натурного експерименту з використанням спеціально сформованого датасету (2500 кадрів, отриманих з БПЛА в Україні, США та Італії), що містить зображення мін типів ПФМ-1, ПМН-3 та РМА-2 на різному фоні. Застосовано методи інженерії запитів (prompt engineering) для адаптації універсальних моделей до специфічної ролі «інспектора безпеки» та статистичний аналіз результатів із залученням ручної експертної валідації 1189 зображень. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні концепції використання VLM не як автономних детекторів, а як «семантичного фільтра» (Verification Module) на хмарному рівні. Це дозволяє реалізувати розпізнавання нових типів загроз (open-vocabulary detection) без необхідності тривалого перенавчання нейромереж. Експериментально встановлено, що модель Gemini 2.5 Flash демонструє вищу точність на рівні окремих кадрів (67,6 %), надаючи детальні пояснення з просторовими орієнтирами, тоді як GPT-4.1 Vision забезпечує кращу чутливість на рівні об'єктів, виявивши 28 з 29 цілей. Доведено критичний вплив формулювання текстового запиту: перехід від базового промпта до спеціалізованого підвищив точність розпізнавання з 14 % до 62 %. Практичне значення роботи полягає у розробці схеми побудови мапи ризиків на основі консенсусу моделей, де зони подвійного підтвердження отримують найвищий пріоритет перевірки. Запропонована архітектура Edge–Local–Cloud дозволяє інтегрувати потужні VLM без критичного навантаження на канали зв'язку та енергоспоживання дрона. У висновках зазначено, що для досягнення необхідного рівня безпеки VLM доцільно використовувати виключно у складі мультисенсорних систем (оптика, металодетекція, магнітометрія) як інструмент додаткової верифікації.

Ключові слова: *комп'ютерний зір; візуально-мовні моделі (VLM); безпілотні літальні апарати (БПЛА); гуманітарне розмінування; багаторівневий аналіз відеозображення; мультисенсорне злиття.*

© Robotko S., Zivenko O.

Статтю прийнято до редакції 18.11.2025

UDC 004.942:656.61.052

CONDITIONAL OPTIMIZATION OF VESSEL CONTROLS WITH WIND ADDITIONAL PROPULSION SYSTEM

Zinchenko S. M., *Sc.D., Associate Professor, Professor of the Navigation and Ship Handling Department, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;*
Tovstokoryy K. O., *Assistant of the Navigation and Ship Handling Department, Kherson State Maritime Academy, Kherson, Ukraine, e-mail: Tovstokory@yahoo.com, ORCID: 0009-0003-1183-7324.*

The maritime industry is facing significant challenges due to increasingly stringent legislative requirements for reducing emissions of harmful substances into the atmosphere and mitigating climate change. Among the wide range of technologies and fuel solutions considered in this context, one of the most promising is wind additional propulsion systems (WAPS), which can significantly reduce fuel consumption by ships and, as a result, reduce emissions of greenhouse gases and other harmful substances into the atmosphere. At present, wind propulsion systems such as WindWings, Wind Challenger, CWS are already in operation on ships including Pyxis Ocean, Berge Olympus, Shofu Maru, Windcoop and others. The WindWings system does not require auxiliary power for operation and has a built-in feathering function to manage sail performance in different weather conditions. The Wind Challenger system uses advanced patented technologies that allow the determination of wind direction and speed in real time, providing fully automatic control of extending, retracting, compressing and rotating sails. These and other wind turbines operate autonomously, independently of the vessel motion control system. The object of the research is the process of finding optimal controls for the combined structure of the vessel's actuators, which includes traditional actuators (propeller, rudder) and additional wind turbines. A method for controlling the movement of a vessel with additional wind turbines has been developed, which allows for further reduction in fuel consumption. This is achieved by finding optimal controls for the combined structure of the vessel's actuators by solving the problem of conditional optimization with equalities and inequalities in the on-board computer of the automatic control system. Equalities ensure the creation of the forces and moments necessary to maintain the given motion, and inequalities take into account the permissible ranges of control changes. The results obtained can be used in the development of mathematical support for autonomous vessel control systems or mathematical support for automatic control modules in automated systems.

***Key words**: WAPS; automatic control; conditional optimization; energy efficiency; additional wind turbines; on-board computer.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.030-040

Introduction. The International Maritime Organization (IMO) has been working consistently for many years to develop and improve international conventions and codes aimed at preventing air pollution from ships. In 2017 IMO adopted the Initial Strategy for Reducing Air Emissions from Ships, which set the scale of the industry's tasks to reduce the carbon footprint of international shipping by 2030, as well as to reduce absolute emissions from ships in the coming decades, with the goal of full decarbonization. In accordance with the IMO Initial Strategy, technical and operational measures to reduce emissions were developed, which were adopted in 2021 by amendments to Annex VI of the MARPOL Convention. A review of the Initial Strategy for Reducing Greenhouse Gas Emissions was planned for 2023. The task of the review is to record the current goals, objectives, conditions for decarbonizing the industry in the coming decades, and the expected nature of specific measures. As a result of the negotiations, the text of the Revised Strategy did not include a hard deadline for achieving net zero emissions from international shipping. Instead, the deadline was specified more flexibly – around 2050, taking into account the national characteristics of the states and with intermediate stages of emission reduction by 2030 and 2040. In addition, the Revised Strategy included the expected level of use of fuels with minimal or zero greenhouse gas content and relevant technologies by 2030. One of the directions for reducing emissions of harmful substances from shipping is the use of ships with additional wind power plants (WAPS). Such plants allow using wind energy for propulsion, which reduces the load on the main engines and saves fuel. Although the total number of ships equipped with WAPS is still relatively

low, there is a steady trend towards their growth. Figure 1 shows the number of ships that are/will be equipped with WAPS.

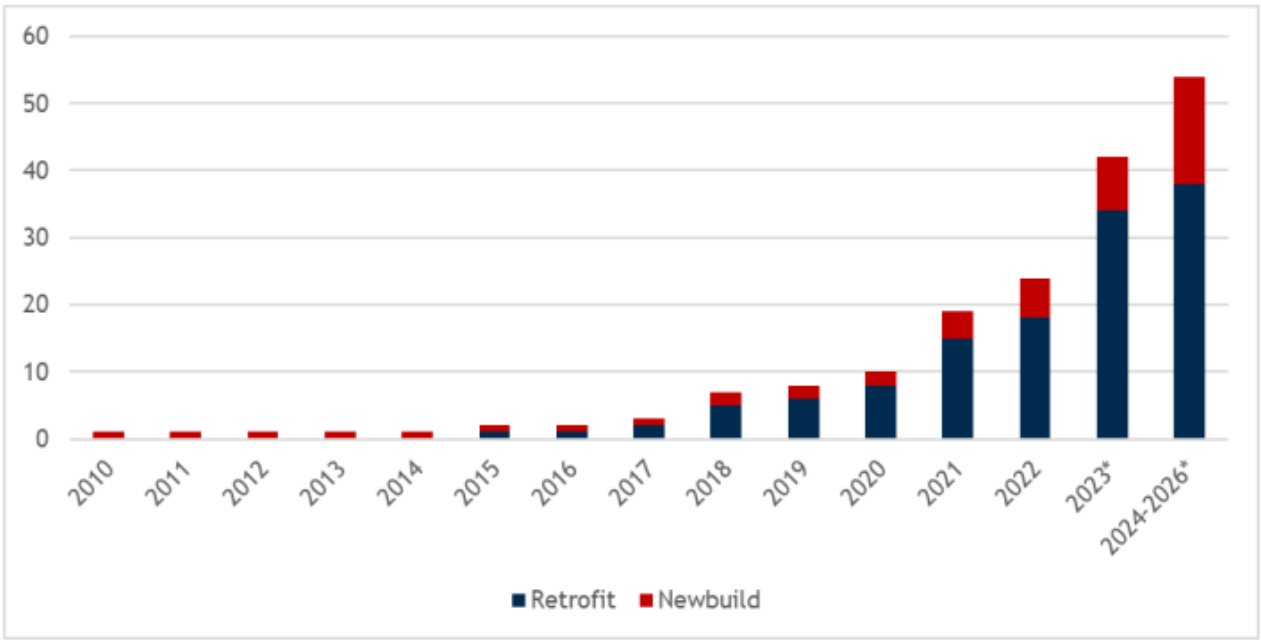


Figure 1 – Number of vessels that are/will be equipped with WAPS [1]

There are six categories of WAPS: rotary sails [2], rigid sails [3], suction wings [3], kites [4], soft sails [5] and hull technologies [6]. In addition to these systems, wind turbines [7] are also being developed for the production of electricity on board the ship. The paper considers an additional wind turbine installed on the ship from rigid sails as an additional wind energy source for the movement of the ship. Today, the WindWings, Wind Challenger, CWS wind turbines are already operated on the ships Pyxis Ocean [8], Berge Olympus [9], Shofu Maru [10], Windcoop [11], etc. The WindWing system [12] does not require auxiliary power for operation and has a built-in feathering function to control the performance of the sail in different weather conditions. The Wind Challenger system [13] is an innovative solution for reducing greenhouse gas emissions. It uses the most modern and patented technologies that allow determining the direction and speed of the wind in real time, provide fully automatic control of the extension, removal, compression and rotation of the sails. These and other wind turbines operate autonomously, regardless of the ship's motion control system. According to the authors of this article, the use of wind turbines as additional executive devices of the ship's motion control system will allow more efficient use of wind energy and achieve further reduction in fuel consumption. Of course, such tasks can be solved using a specialized on-board computer with automatic modules of the ship's motion control system. Some other automatic control problems were considered by the authors of the article earlier, for example, the problem of automatic discharge of kinetic energy in the event of an inevitable collision of vessels [14], the problem of optimal control of the vessel's movement with boundary conditions [15], the use of a neural network model for evaluating the maneuvering characteristics of the vessel [16] and solving automatic control problems [17], the use of a simulation bench for developing and testing automatic control modules for vessel movement [18]. The problem of controlling the movement of a vessel with additional wind turbines along a route involves finding at each step of the on-board computer of the automatic control module optimal controls for the combined structure of the vessel's actuators (propeller, rudder and sails).

The object of the research is the process of finding optimal controls for the combined structure of the vessel's actuators during its movement along the route.

The subject of the research is models and methods for finding optimal controls for the combined structure of the vessel's actuators during its movement along the route.

Problem statement. The problem of optimizing the energy consumption of the power plant (PP) of a ship with additional wind turbines when moving along a route can be written in the form:

$$\begin{cases} E\left[P_x(\Theta)\right] = P_x^2(\Theta) \to \min; \\ V_x = V_x^*, \Delta Y = \Delta Y^*, K = K^*; \\ |\Theta| \le \Theta_{\max}, |\delta| \le \delta_{\max}, |\gamma_j| \le \gamma_{\max}, \end{cases} \quad (1)$$

where the first equation of the system (1) determines the objective function of the minimum fuel energy consumption of the PP, the second equation of the system (1) determines the required movement along the route with a given speed $V_x = V_x^*$, a given lateral deviation $\Delta Y = \Delta Y^*$ and a given course $K = K^*$. This problem can be considered as a problem of conditional optimization of the objective function $E[P_x(\Theta)] = P_x^2(\Theta) \to \min$ (minimization of fuel consumption of the PP) with nonlinear constraints of the equalities type $V_x = V_x^*, \Delta Y = \Delta Y^*, K = K^*$ and linear constraints of the inequalities type $|\Theta| \le \Theta_{\max}, |\delta| \le \delta_{\max}, |\gamma_j| \le \gamma_{\max}$, $j = 1..n$. Nonlinear constraints of the equalities type determine the required movement along the route with a given speed $V_x = V_x^*$, a given lateral deviation $\Delta Y = \Delta Y^*$ and a given course $K = K^*$. Linear constraints of the inequalities type determine the permissible ranges of deviations of the PP telegraph $|\Theta| \le \Theta_{\max}$, rudder deviations $|\delta| \le \delta_{\max}$ and sail angles $|\gamma_j| \le \gamma_{\max}$, $j = 1..n$.

Analysis of recent research and publications. Conditional optimization problems have previously been considered by many authors. Thus, in [19], the practical problem of optimizing the planning of vessel traffic on the Kiel Canal, which is the most visited artificial waterway in the world, was considered. The aim of the study was to minimize the total waiting time of all vessels. The algorithmic ideas of collision-free routing of automatically controlled vehicles were generalized, which provides a single view of planning and dynamic routing, which can serve as a prototype for planning bidirectional traffic with conflicts. The developed method allows creating schedules that are significantly better than manual planning, and which were approved by expert planners. Due to a significant increase in the number and size of vessels, the canal was planned to be expanded. The developed tool was also used to select the best option for expansion.

In [20], the issues of creating a safe and efficient vessel placement scheme in a busy Ro-Ro passenger terminal with a limited port basin were investigated. A multi-objective mathematical model is formulated for the integrated optimization of fairway and turn basin planning, with minimum total planning time and total waiting time as objective functions. An adaptive ant colony optimization algorithm is applied to the proposed model, where minimizing the total waiting time is the objective function. Numerical experiments at Xuwen Terminal, the largest Ro-Ro passenger terminal in the world, show that the model has shorter total planning time and total waiting time, compared with actual operational data. The effective solutions obtained by the proposed model and algorithm not only significantly improve safety and efficiency, but also improve the availability of the turn basin and fairway.

Optimization of ship energy efficiency is attracting increasing attention to meet the requirements of energy conservation and emission reduction. Factors such as speed, wind direction, current speed, and depth significantly affect the energy efficiency of ships. Due to the inherent temporal variability and uncertainty associated with these various factors, it is very difficult to accurately determine the optimal sailing speed for different sections of the route using traditional static optimization methods, especially when weather conditions change frequently. In [21], a dynamic optimization method using predictive model control is proposed. A dynamic ship energy efficiency optimization model, taking into account time-varying factors, and a nonlinear system model of ship energy efficiency are developed. Based on these models, a control algorithm and controller are developed for dynamic ship energy efficiency optimization. A study is conducted to

demonstrate the validity of the developed optimization method. The results show that the optimal sailing speed for different time intervals can be determined using the dynamic optimization method. This method can improve the ship energy efficiency and effectively reduce CO_2 emissions.

In the article [22], the issues of safe crew transfer to an offshore wind turbine are considered. An optimal control scheme based on a neural network observer is proposed to identify dynamics and disturbances, nonlinear effects and asymmetric saturation constraints of input control signals. The structure of the neural network takes into account the Hamilton-Jacobi-Bellman equation and forms an optimal control signal that remains within the saturation limits. Lyapunov theory guarantees a uniformly limited system of all closed-loop signals. The high performance of the presented method is demonstrated on regular waves with high frequency, compared to previous studies.

In the paper [23], the issues of optimal control of the movement of a vessel with additional wind turbines along the route are considered. A method for determining the recommended average vessel speed per trip – a constant value present in the optimality criteria, and the distribution law of the optimal speed per trip that would satisfy the given optimality criterion, in particular, minimum fuel consumption, are developed. The problem of determining the optimal current speed of a ship is formulated as a variational isoparametric problem under constraints in the class of piecewise-smooth functions, and a method for its solution is proposed. The results obtained allowed us to determine, for a specific voyage, the dependence of the optimal ship speed and specific fuel consumption on the speed and direction of the true wind. The dependence of the recommended average ship speed per voyage of the specific hourly fuel consumption and the specific total consumption per voyage for different types of wind turbines was also determined. The calculations confirm that the use of wind turbines significantly increases the economic efficiency of ship operation and leads to a reduction in environmental pollution.

In [24], the feasibility and advantages of hybrid propulsion systems for tankers that combine diesel engines with sails to reduce fuel consumption and emissions were investigated. The aim of the study is to develop and evaluate a hybrid propulsion system that integrates a diesel engine with a sail system to improve the overall performance of the propulsion system, reduce greenhouse gas emissions, and improve fuel efficiency. The performance of the hybrid system is compared with the traditional diesel engine scheme. The results of the study showed that the integration of sails with diesel engines can improve the overall performance of the propulsion system, reduce greenhouse gas emissions, and improve fuel efficiency. The comparative analysis showed that the applied methods (empirical formulas, CFD modeling, and model testing) give similar results with a maximum deviation of 7%.

In the study [25], an optimal energy-saving control system is proposed for coordinating sail thrust and propeller thrust, which is achieved by adjusting the sail azimuth and propeller speed. A coordination control algorithm based on the predictive control-adaptive Pontryagin minimum principle (MPC-APMP) is proposed. This algorithm transforms the optimal control problem for improving the energy efficiency of the sail and propeller into a rolling optimization problem. Taking into account the delay of the control system relative to time-varying environmental conditions, a model for predicting the wind direction and speed, and the direction and speed of the vessel based on a neural network with a long short-term memory is developed. According to the aerodynamics of the sail and the hydrodynamics of the propeller, a dynamic model of the combined "sail-propeller" propulsion system is created, which is used to estimate the potential wind energy and the total thrust demand. The PMP (Pontryagin minimum principle) algorithm is used to obtain the optimal control sequence. The energy-saving efficiency and stability of the proposed method are confirmed by simulation.

The purpose and objectives of the study. The purpose of the study is to develop a method for calculating optimal controls for a combined structure of ship actuators, which includes traditional controls (propeller, rudder) and wind turbine controls. The objectives of the study are: analysis of literature sources devoted to methods for optimizing controls and optimal wind turbine controls; development of a block of optimal controls for a combined structure of ship actuators;

development of models of external influences and controls for the conditional optimization block; analysis of the optimal controls formation results.

Main part. Fig. 2 shows a block of calculating optimal controls for the movement of a ship with additional wind sails.

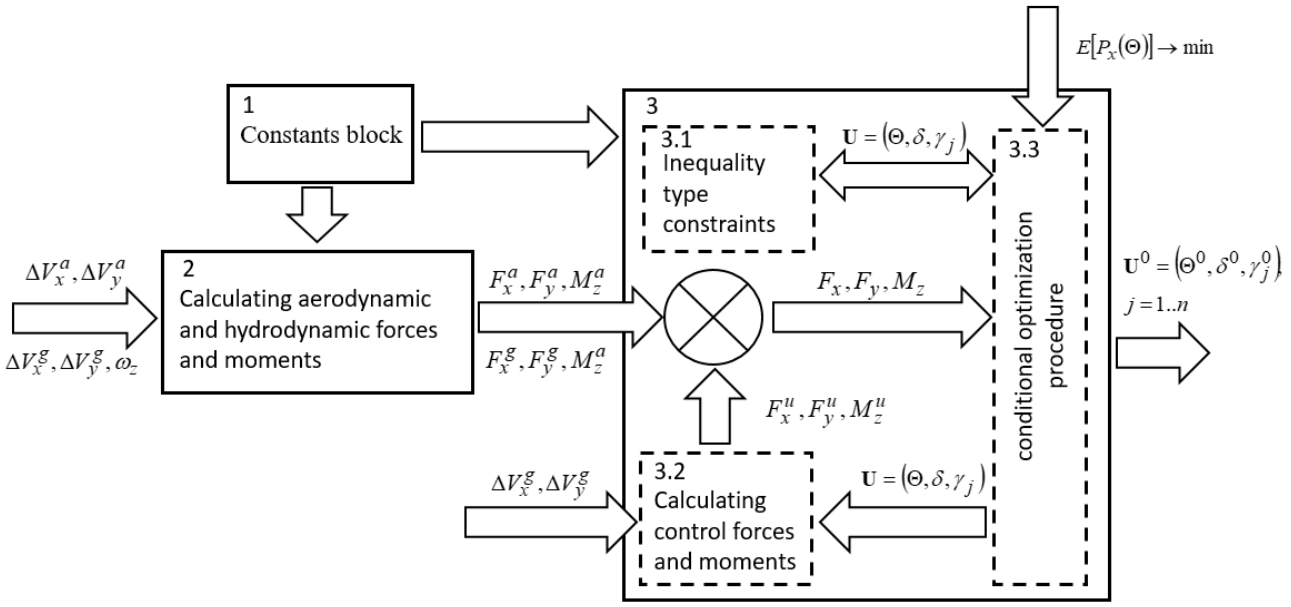


Figure 2 – Optimal control calculation block

The optimal control calculation block includes a constant setter 1, a block 2 for calculating aerodynamic and hydrodynamic forces and moments, and a block 3 for optimization. The optimization block 3 contains a subblock 3.1 for linear constraints on control such as inequalities, a subblock 3.2 for calculating control forces and moments, and a subblock 3.3 for conditional optimization.

Block 2 for calculating aerodynamic and hydrodynamic forces and moments acting on the ship's hull and superstructure. In order to reduce the calculation time, block 2 is removed from the optimization block 3 as one that does not use control. The projections of the resulting aerodynamic force R_x^a, R_y^a and moment M_z^a on the linked coordinate system (LCS) axis are determined by the formulas

$$\begin{cases} R_x^a = c_x^a \rho_a \dfrac{\left(\Delta V_x^a\right)^2}{2} S_x^a; \\ R_y^a = c_y^a \rho_a \dfrac{\left(\Delta V_x^a\right)^2}{2} S_y^a; \\ M_z^a = m_z^a \rho_a \dfrac{\left(\Delta V_x^a\right)^2}{2} S_x^a L; \end{cases} \qquad (2)$$

$$\begin{cases} c_x^a = -(0,03 + 0,08\cos\beta_a); \\ c_y^a = -(1,1 - 1,2)\sin\beta_a; \\ m_z^a = c_y^a \left(0,25 + \dfrac{x_n}{L} - \dfrac{\beta_a}{2\pi}\right), \end{cases} \qquad (3)$$

where c_x^a, c_y^a, m_z^a are the coefficients of longitudinal, lateral aerodynamic force and aerodynamic moment, ρ_a is air density, $\Delta V_x^a, \Delta V_y^a$ are the relative longitudinal and lateral velocity of the aerodynamic flow, S_x^a, S_y^a are the projections of the above-water part of the ship's hull and superstructures onto the plane perpendicular to the axis OX_1 of the LCS and onto the plane

perpendicular to the axis OY_1 of the LCS, L is the ship length, $\beta_a = -\arctan\left(\frac{\Delta V_y^a}{\Delta V_x^a}\right)$ is the angle of incidence of the aerodynamic flow onto the diametrical plane.

The projections R_x^g, R_y^g of the resulting hydrodynamic force and moment M_z^g on the axis of the LCS are determined by the formulas

$$\begin{cases} R_x^g = c_x^g \rho_g \dfrac{\left(\Delta V_x^g\right)^2}{2} F_o; \\ R_y^g = c_y^g \rho_g \dfrac{\left(\Delta V_x^g\right)^2}{2} F_o; \\ M_z^g = m_z^g \rho_g \dfrac{\left(\Delta V_x^g\right)^2}{2} F_o L; \end{cases} \quad (4) \qquad \begin{cases} c_x^g = -[c_{x0}^g + 0,25(\dfrac{L}{B} - 2)\beta_g^3]; \\ c_y^g = -(\dfrac{\partial c_y^g}{\partial \beta}\beta_g + \dfrac{\partial c_y^g}{\partial \omega_z}\omega_z); \\ m_z^g = -(\dfrac{\partial m_z^g}{\partial \beta}\beta_g + \dfrac{\partial m_z^g}{\partial \omega_z}\omega_z), \end{cases} \quad (5)$$

where c_x^g, c_y^g, m_z^g are the coefficients of longitudinal, lateral hydrodynamic force and hydrodynamic moment, ρ_g is the water density, $\Delta V_x^g, \Delta V_y^g$ are the relative longitudinal and lateral velocity of hydrodynamic flow, F_∂ is the area of diametrical buttocks, B is the width of the vessel, $\beta_g = -\arctan\left(\frac{\Delta V_y^g}{\Delta V_x^g}\right)$ is the drift angle, ω_z is the yaw angular rate, $\frac{\partial c_y^g}{\partial \beta}, \frac{\partial c_y^g}{\partial \omega_z}, \frac{\partial m_z^g}{\partial \beta}, \frac{\partial m_z^g}{\partial \omega_z}$ are the hydrodynamic coefficients.

Control forces and moments calculation block.

Forces and moments from propeller rotation. Projections of forces and moments from propeller rotation on the LCS axis are calculated by the formulas

$$\begin{cases} P_x(\Theta) = (1-t)\dfrac{1}{2}\sigma_p \rho_g \Delta V_x^g S_{\partial в}; \\ P_y(\Theta) = P_{y1} + P_{y2} + P_{y3}; \\ M_z(\Theta) = M_{z2} + M_{z3}, \end{cases} \quad (6)$$

where $P_{y1} = \psi \rho_g n^2 D_{\partial в}^4 K_{m0} \dfrac{\Lambda_p}{\sqrt{1-\Lambda_p^2}}\left(\dfrac{\sqrt{1-\Lambda_{p0}^2}}{\Lambda_{p0}}\right)$ is the component of the lateral force from the rotation of the propeller, caused by the unevenness of the speeds of the flow incident on the propeller disk along the height,

$P_{y2} = 2{,}14\rho_g n D_{\partial в}^3 \beta_g K_{m0}\left[1 - \dfrac{1}{2}\dfrac{\Lambda_p}{\sqrt{1-\Lambda_p^2}}\left(\dfrac{\sqrt{1-\Lambda_{p0}^2}}{\Lambda_{p0}}\right)\right]$ is the component of the lateral force from the rotation of the propeller, caused by the oblique flow incident on the propeller disk at the drift angle β_g,

$P_{y3} = \rho_g n_{зх}^2 D_{дв}^4 \left(-\frac{0{,}05}{(1-10\lambda_p)^2} - 0{,}13\sin^2 \pi\lambda_p \right)$ is the component of the lateral force from the rotation of the propeller, caused by the splashing of water on the ship's hull in the propeller reverse mode,

$M_{z2} = 0{,}16\rho_g n D_{дв}^4 \left(K_p - \frac{\Lambda_p}{2}\frac{dK_p}{d\Lambda_p} \right) V_z$ is the component of the yaw moment from the rotation of the propeller, caused by the oblique flow incident on the propeller disk at the drift angle β_g,

$M_{z3} = \rho_g n_{зх}^2 D_{дв}^5 \left(\frac{0{,}8}{(1+100\lambda_p)^2} + 1{,}2\sin^4 \pi\lambda_p \right)$ is the component of the yaw moment from the rotation of the propeller, caused by the splashing of water on the ship's hull in the propeller reverse mode,

ψ is the co-current flow coefficient, $\psi = 0{,}165\, C_b \sqrt{\frac{\sqrt[3]{\Delta}}{D_{дв}}} - \Delta\psi$,

Δ is the displacement of the vessel,

$\Delta\psi$ is the correction for the Froude number,

$t = (0{,}15 - 0{,}17)$ is the propeller suction coefficient,

$\sigma_p = \frac{8K_p}{\pi\Lambda_p}$ is the propeller load coefficient at the stop,

$\Lambda_p = \frac{\Delta V_g}{\sqrt{\Delta V_g{}^2 + n^2 D_{дв}{}^2}}$ is the universal propeller pitch,

K_p, K_m are the universal stop coefficient screw and universal torque coefficient, are determined from the graphs as functions Λ_p,

Λ_{p0} is the universal screw pitch, for which the universal torque coefficient is $K_m = 0$,

K_{m0} is the value of the universal torque coefficient for $\Lambda_p = 0$,

n is the screw revolutions,

$D_{дв}$ is the diameter of the screw disk,

$S_{дв}$ is the area of the screw disk.

Forces and moments from the rudder. Projections R_x^r, R_y^r of the control force and moment M_z^r on the LCS axis from the rudder deflection are calculated by the formulas

$$\begin{cases} R_x^r(\delta) = c_x^r \rho_g \frac{\left(\Delta V_x^g\right)^2}{2} S_r; \\ R_y^r(\delta) = c_y^r \rho_g \frac{\left(\Delta V_x^g\right)^2}{2} S_r; \\ M_z^r(\delta) = m_z^r \rho_g \frac{\left(\Delta V_x^g\right)^2}{2} S_r b_r; \end{cases} \qquad (7)$$

$$\begin{cases} c_x^r = 1{,}46\delta^2; \\ c_y^r = \frac{2\pi\lambda}{2+\lambda}\delta; \\ m_z^r = -c_y^r l_r, \end{cases} \qquad (8)$$

where c_x^r, c_y^r, m_z^r are the coefficients of longitudinal, lateral hydrodynamic force of the rudder and hydrodynamic moment of the rudder, S_r, b_r are the area and width of the rudder, δ is the rudder's deflection angle, λ is the elongation of the rudder, l_r is the rudder arm (distance from the middle of the rudder to the center of the vessel's rotation).

Forces and moments from the wind turbine. The thrust force F_T, drift force F_D and moment M_z of the wind turbine in projections on the LCS axis are determined by the formulas

$$\begin{cases} F_T = \sum_{j=1}^{n}\left[Y^a(\gamma_j)\sin\beta_a - X^a(\gamma_j)\cos\beta_a\right]; \\ F_D = \sum_{j=1}^{n}\left[Y^a(\gamma_j)\cos\beta_a + X^a(\gamma_j)\sin\beta_a\right]; \\ M_z = \sum_{j=1}^{n}\left(-F_{Tj}Y_{PCj} + F_{Dj}X_{PCj}\right); \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} X^a(\gamma_j) = C_x^a(\alpha_j)\rho_a\dfrac{\left(\Delta V_x^a\right)^2}{2}S; \\ Y^a(\gamma_j) = C_y^a(\alpha_j)\rho_a\dfrac{\left(\Delta V_x^a\right)^2}{2}S, \end{cases} \quad (10)$$

where $X^a(\gamma_j), Y^a(\gamma_j)$ are the drag force and lift force of the *j*-th sail, β_a is the angle of incidence of the aerodynamic flow on the diametrical plane, X_{PCj}, Y_{PCj} are the coordinates of the *j*-th sail pressure center, $C_x^a(\alpha_j), C_y^a(\alpha_j)$ are the drag and lift coefficient of the *j*-th sail, α_j is the angle of attack of the *j*-th sail, S is the sail area.

The sum of aerodynamic (2), hydrodynamic (4) and control (6)–(9) forces and moments in projections on the LCS axis has the form

$$\begin{cases} P_x = P_x(\Theta) - R_x^r + \sum_{j=1}^{n}\left(Y^a(\gamma_j)\sin\beta_a - X^a(\gamma_j)\cos\beta_a\right) - R_x^a - R_x^g; \\ P_y = P_y(\Theta) + R_y^r + \sum_{j=1}^{n}\left(Y^a(\gamma_j)\cos\beta_a + X^a(\gamma_j)\sin\beta_a\right) + R_y^a + R_y^g; \\ M_z = -P_y(\Theta)l_p - R_y^r l_r + \sum_{j=1}^{n} -\left(Y^a(\gamma_j)\sin\beta_a - X^a(\gamma_j)\cos\beta_a\right)Y_{PCj} + \\ + \sum_{j=1}^{n}\left(Y^a(\gamma_j)\cos\beta_a + X^a(\gamma_j)\sin\beta_a\right)X_{PCj} + M_z^a + M_z^g. \end{cases} \quad (11)$$

To ensure the given motion of the vessel, the sum of all forces and moments (11) must be equal to the forces and moments F_x^*, F_y^*, M_z^* necessary to maintain the given motion, which are determined by the PID controller

$$\begin{cases} P_x(\Theta) - R_x^r + \sum_{j=1}^{n}\left(Y^a(\gamma_j)\sin\beta_a - X^a(\gamma_j)\cos\beta_a\right) - R_x^a - R_x^g = P_x^*; \\ P_y(\Theta) + R_y^r + \sum_{j=1}^{n}\left(Y^a(\gamma_j)\cos\beta_a + X^a(\gamma_j)\sin\beta_a\right) + R_y^a + R_y^g = P_y^*; \\ -P_y(\Theta)l_p - R_y^r l_r + \sum_{j=1}^{n} -\left(Y^a(\gamma_j)\sin\beta_a - X^a(\gamma_j)\cos\beta_a\right)Y_{PCj} + \\ + \sum_{j=1}^{n}\left(Y^a(\gamma_j)\cos\beta_a + X^a(\gamma_j)\sin\beta_a\right)X_{PCj} + M_z^a + M_z^g = M_z^*. \end{cases} \quad (12)$$

System (12) can be considered as a system of the equalities type constraints on control.

Subblock 3.1 of linear constraints on control of the inequalities type. Serves to take into account constraints of the inequalities type on control (allowable control ranges)

$$|\Theta| \le \Theta_{\max}, |\delta| \le \delta_{\max}, |\gamma_j| \le \gamma_{\max}, j = 1..n. \quad (13)$$

Subblock 3.3 of conditional optimization. Serves to search for the global extremum of the objective function and optimal controls. Uses one of the known methods of searching for the global extremum (global search method, modified gradient, heuristic, etc.). At each iteration of the search for optimal controls, block 3.1 checks whether the current iteration of controls belongs to the allowable range, and block 2 calculates the control forces and moments for the current iteration of controls. The sum of the control, aerodynamic and hydrodynamic forces and moments is again fed to the inputs of subblock 3.3 of conditional optimization for the next iteration. Subblocks 3.3 of conditional optimization complete their work at the current cycle of the on-board computer after the specified criterion for completing the search process is met (depends on the selected method). The found optimal controls $\mathbf{U}^0 = \left(\Theta^0, \delta^0, \gamma_j^0\right), j = 1..n$ are fed to the automation of the corresponding drives (PP, rudder, sails) for processing.

Main results and discussion. A method for automatic control of the vessel's movement along a route with additional wind sails has been developed, which allows for additional reduction of fuel consumption. The achieved result is explained by the finding in the on-board computer of the automatic movement control module of optimal controls for a combined structure of actuators, which includes traditional controls (propeller, rudder) and control of the wind sails installation, by solving a conditional optimization problem with equalities and inequalities type constraints. Equalities type constraints provide simultaneous formation of the controls necessary to maintain a given movement along the route, and inequalities type constraints take into account the permissible ranges of control changes. The developed method differs from known solutions in that: it determines optimal controls not only for wind sails, but for the combined structure of the vessel's actuators; optimal controls are calculated by solving a conditional optimization problem with equalities and inequalities type constraints. The results obtained are reproducible and can be used in the development of mathematical support for autonomous systems, or in automated systems with automatic motion control modules.

Conclusions. A method for calculating optimal controls of the combined structure of the vessel's actuators, which includes traditional controls (propeller, rudder) and wind sails control, has been developed. The developed method allows for a further reduction in fuel consumption. This is explained by finding optimal controls not only for the sails, but for the entire combined structure of the actuators, which includes traditional controls (propeller and rudder), as well as sail control, by solving the problem of conditional optimization with constraints such as equalities and inequalities. The theoretical significance of the results obtained lies in the development of a method for automatic optimal control of the combined structure of actuators. The practical significance of the results obtained lies in the further reduction of fuel consumption, due to more efficient use of wind energy, the possibility of applying the method in the development of mathematical support for automatic modules for controlling the movement of vessels with additional wind sails.

Prospects for further research. Further research may be related to the development of methods for controlling the motion of a vessel with additional wind sails for sharp angles of the flow incidence on the diametrical plane $|\beta| \le 30 dg$. As is known, at such angles of the flow incidence, the thrust force of the sails is not sufficient for movement against the flow, therefore, the tacks method of movement is used on sailboats. Development of the optimal control methods for combined structure of actuators, which includes traditional controls and a wind turbine, remains an urgent scientific and technical problem.

REFERENCES

1. Laursen, R., Patel, H., Sofiadi, D., Zhu, R., Nelissen, D., Van Seters, D., Pang, E. (2023). Potential of wind – assisted propulsion for shipping, European Maritime Safety Agency (EMSA). https:// www.emsa.europa.eu.

2. Tony Glatz. Analyzing the Kinematics of Rotor Sails, Research Gate (2021). https://www.researchgate.net/publication/348420252_Analyzing_the_Kinematics_of_Rotor_Sails.

3. Данилов О. (2024). Вантажне судно Pyxis Ocean з жорсткими вітрилами завершило шестимісячні випробування. Вітрила економлять у середньому 3 тонни палива на день. Українська правда. https://mezha.ua/2024/03/21/pyxis-ocean-windwings-test-end/.

4. Ship kite propulsion system, Nautic expo connect (2025). https://www.nauticexpo.com/boat-manufacturer/ship-kite-propulsion-system-48507.html.

5. David Tyler (2014). The design of soft wing sails for cruising. https://www.boatdesign.net/threads/the-design-of-soft-wing-sails-for-cruising.49425/

6. Holloway, J. (2013). Vindskip ship concept uses the hull as a sail, New Atlas. https://newatlas.com/vindskip-wind-ship/29101/.

7. Carlson, O., Nilsson, P. (2015). Wind Turbines on Ships, Chalmers Publication Library. https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/217076/local_217076.pdf .

8. Amy Peacock (2023). Pioneering wind-powered cargo ship charts course for greener shipping. https://www.dezeen.com/2023/08/22/pyxis-ocean-windwings-wind-powered-cargo-ship/.

9. Can Emir (2023). Berge Bulk's Berge Olympus: A wind-powered marvel for greener oceans, Transportation. https://interestingengineering.com/innovation/berge-bulks-berge-olympus-wind-power?ysclid=mj2k50t8xn606954660.

10. Buitendijk, M. (2024). Wind Challenger saves fuel for coal carrier Shofu Maru, SWZ|Maritime. https://swzmaritime.nl/news/2024/05/23/wind-challenger-saves-fuel-for-coal-carrier-shofu-maru/.

11. Malayil, J. (2024). World-first wind-powered containership to have 11,300 sq ft total sail area, Interesting Engeneering, 2025. https://interestingengineering.com/innovation/world-first-open-hatch-sail-powered-containership?ysclid=mj2oa6lyrc348910409.

12. Suction Wings Wind-Assisted Propulsion in the Marine Industry: An Overview, Nautical Voice (2024). https://nauticalvoice.com/suction-wings-wind-assisted-propulsion-in-the-marine-industry-an-overview/21754/.

13. Wind Challenger. The Wind Assisted Ship Propulsion System. https://www.mol-service.com/en/services/energy-saving-technologies/wind-challenger.

14. 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, pp. 496–500, 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland. https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275545. https://ieeexplore.ieee.org/ document/10275545.

15. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Grosheva, O. A. (2018). Synthesis of optimal control of a vessel with boundary conditions, Scientific Bulletin of KhSMA, No. 1(18). http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440.

16. Zinchenko, S. N., Lyashenko, V. G., Shalaeva, A. A. (2017). Assessment of the maneuverability of a vessel using a neural network model synthesized in the process of its regular operation, Materials of the IV international scientific and practical conference "Life Safety in Transport and Production Education, Science, Practice", Kherson, September 14–16, pp. 236–240.

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

18. Zinchenko, S. M., Mateychuk, V. M., Lyashenko, V. G. (2018). Using modeling information systems for the development and testing of automatic vessel movement control systems, Materials of the V MNPK "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice", Kherson, September 13-15, pp. 27–29.

19. Lübbecke, E., Lübbecke, M. E., Möhring, R. (2019). Ship Traffic Optimization for the Kiel Canal, Operations Research, Vol. 67, No. 3. https://doi.org/10.1287/opre.2018.1814.

20. Jia, Q., Li, R., Li, J., Li, Zh., Liu, J. (2023). Vessel traffic scheduling optimization for passenger RoRo terminals with restricted harbor basin, Ocean & Coastal Management, Volume 246, 106904. https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106904.

21. Wang, K., Yan, X., Yuan, Yu., Jiang, X., Lin, X., Negenborn, R. R. (2018). Dynamic optimization of ship energy efficiency considering time-varying environmental factors, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 62, July 2018, Pages 685–698. https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.005.

22. Farzanegan, B., Esmailian, E., Menhaj, M. B. (2019). A data-driven method for optimal control of ship motions for safe crew transfer to offshore wind turbines, Applied Ocean Research, Vol. 90, September 2019, 101847. https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.06.004.

23. Miyusov, M. V., Kryvyi, O. F. (2024). Optimal control of the combined propulsion system of a vessel with wind propulsors, Судноводіння | Shipping & Navigation. https://doi.org/10.31653/2306-5761.36.2024.116-130.

24. Inegiyemiema, M., Robinson, U. A., Eluku, D. A. (22025). Performance Investigation of the Hybrid Propulsion System of Tanker Vessel: A Case Study of Diesel and Wind Sail, The Journal of Scientific and Engineering Research 12(7):63–74.

25. Song J., Tan Yi., Zhang L., Liu Sh. (2025). An Optimal Energy-Saving Coordination Control System for Sail-Propeller of Wind-Assisted Ships, IET Intelligent Transport Systems 19(1). https://doi.org/10.1049/itr2.70090.

Зінченко С. М., Товстокорий К. О. УМОВНА ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУВАНЬ СУДНА З ДОДАТКОВОЮ ВІТРОРУШІЙНОЮ СИСТЕМОЮ

Морська галузь стикається зі значними викликами через дедалі жорсткіші законодавчі вимоги щодо скорочення викидів шкідливих речовин в атмосферу та покращення клімату. Серед широкого спектра технологій та паливних рішень, що розглядаються в цьому контексті, одними з найперспективніших є додаткові вітрові рушійні системи (WAPS), які можуть суттєво зменшити споживання палива суднами та, як наслідок, зменшити викиди парникових газів та інших шкідливих речовин в атмосферу. Відомі рішення дозволяють зменшити витрати палива за рахунок використання енергії вітру, які полягають у розрахунку оптимальних керувань лише для вітрорушіїв. Об'єктом дослідження є процеси пошуку оптимальних керувань для об'єднаної структури виконавчих пристроїв судна, яка включає традиційні керування (гвинт, стерно) та додаткові вітрорушії. Розроблено метод керування рухом судна з додатковими вітрорушіями, який дозволяє ще більше зменшити витрати палива. Це досягається шляхом знаходження оптимальних керувань для об'єднаної структури виконавчих пристроїв судна шляхом вирішення у бортовому обчислювачі автоматичної системи керування задачі умовної оптимізації з обмеженнями типу рівностей та нерівностей. Обмеження типу рівностей забезпечують створення необхідних для підтримування заданого руху сил і моментів, а обмеження типу нерівностей враховують допустимі діапазони зміни керувань. Отримані результати можуть бути використані при розробці математичного забезпечення систем керування автономними суднами, або математичного забезпечення модулів автоматичного керування в автоматизованих системах.

Ключові слова: *WAPS; автоматичне керування; умовна оптимізація; енергоефективність; додаткові вітрорушії; бортовий обчислювач.*

© Zinchenko S. M., Tovstokoryy K. O.

Статтю прийнято до редакції 06.12.2025

УДК 681.5.015

СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО КАСКАДНОГО РЕГУЛЯТОРА З ВИПЕРЕДЖУВАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ЦЕМЕНТНОЇ ПЕЧІ

Жученко О. А., *д.т.н., професор кафедри технічних та програмних засобів автоматизації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: azhuch@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5611-6529;*
Гутовський Д. В., *аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна, e-mail: hytovskui@gmail.com, ORCID: 0009-0002-4141-7550.*

Підвищення енергоефективності та стабілізація якості продукції є ключовими завданнями сучасної цементної промисловості, особливо в умовах широкого впровадження альтернативного палива зі змінними характеристиками. Метою даного дослідження є розробка та перевірка ефективності комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією для керування температурою зони спікання обертової печі. Запропонована система поєднує переваги каскадної структури зі швидким внутрішнім контуром теплового навантаження та точним зовнішнім контуром температури, а також канал випереджувальної компенсації (feedforward) головного вимірюваного збурення – калорійності альтернативного палива. На основі ідентифікованої моделі об'єкта проведено синтез параметрів ПІД-регулятора методом оптимуму за модулем з подальшою корекцією на робастність. Визначено оптимальний коефіцієнт випереджувальної компенсації, що враховує дисперсію похибки оцінювання калорійності палива. Ефективність розробленого регулятора перевірена шляхом імітаційного моделювання в середовищі MATLAB/Simulink з генерацією стохастичних збурень за авторегресійною моделлю. Результати моделювання для трьох сценаріїв (стаціонарний режим, зміна частки палива, підвищена варіативність) показали, що запропонований комбінований регулятор забезпечує зменшення середньоквадратичного відхилення температури зони спікання на 51,2% (з 24,8°C до 12,1°C) та скорочення часу регулювання на 34,5% порівняно з базовим ПІД-регулятором. Додатково досягнуто зниження питомої витрати тепла на 2,8%. Запропонована методика синтезу та отримані результати представляють практичну цінність для проєктування систем автоматизації енергоємних технологічних процесів, що працюють на паливі з нестабільними характеристиками.

Ключові слова: *система автоматичного керування; комбінований регулятор; каскадна структура; випереджувальна компенсація (feedforward); цементна піч; альтернативне паливо; робастне керування; імітаційне моделювання.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.041-051

Вступ. Енергоефективність та стабільність технологічних параметрів є критичними факторами конкурентоспроможності сучасної цементної промисловості. Одним з пріоритетних напрямів зниження собівартості продукції та екологічного навантаження є масове впровадження альтернативних видів палива (АП), таких як побутові та промислові відходи, вторинні ресурси. Однак їх використання супроводжується суттєвою нестабільністю теплотехнічних характеристик, зокрема калорійності, вологості та гранулометричного складу, що є потужним джерелом збурень для системи автоматичного керування (АСУ) тепловим режимом обертової печі. Традиційні системи регулювання на основі ПІД-регуляторів, розраховані на роботу з відносно стабільним паливом, часто не забезпечують необхідної якості відпрацювання таких швидкозмінних та значних за амплітудою збурень. Це призводить до відхилень температури в зоні спікання від технологічного оптимуму, погіршення якості клінкеру, підвищення питомої витрати тепла та зносу футеровки. Відтак, розробка спеціалізованих структур систем автоматичного керування, здатних ефективно компенсувати вимірювані збурення та підтримувати високі показники якості процесу, є актуальним науково-практичним завданням.

Постановка проблеми. Конкретною проблемою, що розглядається в даній роботі, є недостатня динамічна точність класичних одноконтурних та каскадних систем керування температурою зони спікання цементної печі в умовах впливу вимірюваного, але швидкозмінного збурення – калорійності альтернативного палива. Коливання калорійності призводять до миттєвих змін теплового навантаження факела, що через велику теплову інерційність печі (постійні часу до 1200 с та запізнення до 540 с) виявляється у вигляді значного та запізнілого відхилення регульованої температури. Регулятор зворотного зв'язку (ПІД) починає реагувати лише після виникнення відхилення, що обумовлює тривалі перехідні процеси, підвищене перерегулювання та низьку енергоефективність. Таким чином, виникає потреба в синтезі та дослідженні комбінованої системи керування, яка б інтегрувала переваги каскадної структури для покращення внутрішньої динаміки та принцип випереджувальної компенсації (feedforward) для активної компенсації головного вимірюваного збурення до його впливу на основний регульований параметр.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Проблемі підвищення ефективності систем автоматизації енергоємних технологічних процесів, зокрема в цементній промисловості, присвячено значну кількість наукових досліджень. Основними напрямами є вдосконалення алгоритмів керування, розробка адаптивних та робастних структур та інтеграція методів прогнозувального моделювання.

Класичним підходом до керування об'єктами з великою інерційністю та запізненням залишається використання ПІД-регуляторів з різними методами налаштування [1, 2]. Для покращення динамічних характеристик широко застосовується каскадна структура, де швидкий внутрішній контур придушує основні внутрішні збурення, а зовнішній – забезпечує точність відпрацювання головного параметра [3, 4]. У контексті керування печами, дослідження [5, 6] підтверджують ефективність каскадного регулювання температури з внутрішнім контуром теплового потоку або витрати палива.

Окремим перспективним напрямом є застосування випереджувального керування (feedforward) для компенсації вимірюваних збурень. Теоретичні основи та практичні аспекти синтезу таких комбінованих систем детально розглянуті в роботах [7, 8]. Дослідження [9, 10] показують застосування feedforward-компенсації для керування складними хіміко-технологічними процесами, однак специфіка її використання для об'єктів з надвеликим транспортним запізненням, таких як цементна піч, потребує додаткового вивчення.

Інтенсивний розвиток отримали методи модельно-прогнозуючого керування (MPC), які демонструють високу ефективність для багатовимірних об'єктів з обмеженнями [11, 12]. Їх впровадження в цементній промисловості, зокрема для оптимізації спалювання альтернативного палива, описане в роботах [13, 14]. Однак складність моделювання, висока обчислювальна складність та потреба в потужній апаратній базі часто обмежують їх широке промислове застосування, створюючи нішу для більш простих, але ефективних комбінованих структур на базі ПІД-регуляторів.

Питанням адаптації систем керування до нестаціонарних характеристик паливних сумішей, зокрема альтернативних, присвячені роботи [15, 16], де запропоновано використовувати онлайнові оцінки калорійності. Дослідження робастності систем керування печами представлені в [17, 18].

Попри значний прогрес, недостатньо дослідженим залишається питання синтезу та практичної реалізації комбінованих структур, які б оптимально інтегрували переваги каскадної динаміки та випереджувальної компенсації саме для класу об'єктів з екстремально великою інерційністю та запізненням, що працюють на паливі з швидкозмінними характеристиками. Зокрема, вимагає уточнення метод визначення оптимального коефіцієнта компенсації з урахуванням похибки оцінки збурень та формалізація процедури налаштування всієї багатоконтурної системи для досягнення гарантованих показників робастної якості та енергоефективності. Саме цим аспектам присвячена дана стаття.

Мета та задачі дослідження. Метою даного дослідження є синтез комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією для системи автоматичного

керування температурою зони спікання цементної печі та комплексна експериментально-імітаційна оцінка його ефективності в умовах впливу збурень від змінної калорійності альтернативного палива.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні конкретні завдання:

1. Провести формалізацію вимог до системи керування тепловим режимом із позицій технологічних обмежень, динамічної якості, робастності та енергоефективності.

2. Синтезувати структуру комбінованої системи керування, що інтегрує каскадний контур регулювання температури з контуром випереджувальної компенсації (feedforward) головного вимірюваного збурення.

3. Розробити методику синтезу параметрів регуляторів комбінованої системи: коефіцієнтів каскадного ПІД-регулятора зовнішнього контуру та оптимального коефіцієнта випереджувальної компенсації з урахуванням точності оцінки збурень.

4. Розробити дискретний алгоритм функціонування комбінованого регулятора з механізмами антинасичення та обмеження швидкості зміни керуючих впливів, придатний для реалізації в промисловому контролері.

5. Провести імітаційне моделювання динаміки замкненої системи керування зі стохастичними збуреннями для порівняльної оцінки якості регулювання та енергоефективності запропонованої комбінованої стратегії відносно базових підходів.

6. Кількісно оцінити ефективність запропонованого рішення через показники якості регулювання (середньоквадратичне відхилення, час регулювання, перерегулювання) та економію енергоресурсів.

Основу методології дослідження становлять методи теорії автоматичного керування (синтез регуляторів, принцип компенсації збурень), математичного моделювання динамічних систем та статистичного аналізу результатів імітаційних експериментів.

Виклад основного матеріалу. Об’єктом дослідження є канал «витрата традиційного палива – температура зони спікання» обертової цементної печі. Його динаміка апроксимована передавальною функцією другого порядку з транспортним запізненням:

$$W_{obj}(s) = \frac{K_{obj}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-\theta s},$$

де K_{obj} – коефіцієнт підсилення об’єкта, °C·с/кг; τ_1, τ_2 – постійні часу об’єкта, с; θ – транспортне запізнення, с; s – оператор Лапласа.

На основі технологічних норм для процесу випалу клінкеру сформульовані вимоги до системи керування. Температура зони спікання T_{zone} має підтримуватися в діапазоні:

$$1420 \le T_{zone} \le 1480 \quad [°C],$$

із заданим усталеним значенням $T_{zone,nom} = 1420$ °C. Допустиме середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_{T_{zone}} \le 15 \quad [°C].$$

Динамічні вимоги включають час регулювання $t_s^{zone} \le 45$ хв, перерегулювання $\kappa \le 15\%$ та статичну похибку $e_{ss}^{zone} \le 5$ °C. Система повинна бути робастною до варіацій параметрів об’єкта в діапазонах: $\Delta K_{obj} \in [-30\%, +30\%]$, $\Delta\theta \in [-20\%, +20\%]$.

Структура комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією.

Для задоволення вимог запропоновано структуру, що поєднує каскадний контур зворотного зв’язку та контур випереджувальної компенсації.

Каскадний контур складається з:

1. Зовнішнього (повільного) контуру на основі ПІД-регулятора $R_1(s)$, який керує температурою T_{zone}. Його вихід $Q_{ref}(t)$ є завданням для внутрішнього контуру.

2. Внутрішнього (швидкого) контуру на основі П-регулятора R_2, який керує сумарним тепловим навантаженням $Q_{comb}(t)$ шляхом зміни витрати традиційного палива $B_{TF}(t)$. Теплове навантаження розраховується як:

$$Q_{comb}(t) = B_{TF}(t) \cdot Q_i^{TF} + B_{AF}(t) \cdot \widehat{Q}_i^{AF}(t),$$

де Q_i^{TF} – калорійність традиційного палива, МДж/кг; $B_{AF}(t)$ – витрата альтернативного палива, кг/с; $\widehat{Q}_i^{AF}(t)$ – оцінка його калорійності, МДж/кг.

Контур випереджувальної компенсації формує коригуючий вплив $u_{ff}(t)$ на основі вимірюваного збурення – калорійності альтернативного палива. Сумарний керуючий вплив на об'єкт:

$$u(t) = u_{PID}(t) + u_{ff}(t),$$

де $u_{PID}(t)$ – вихід каскадного ПІД-регулятора.

Синтез параметрів каскадного ПІД-регулятора. Передатна функція ПІД-регулятора зовнішнього контуру:

$$W_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_f s + 1}\right),$$

де K_p – пропорційний коефіцієнт; T_i – постійна часу інтегрування, с; T_d – постійна часу диференціювання, с; $T_f = T_d/10$ – постійна часу фільтра диференціальної складової, с.

Початкові налаштування отримано методом оптимуму за модулем для моделі (5.1):

$$K_p^0 = \frac{\tau_\Sigma}{K_{obj} \cdot 2 \cdot \theta}, \quad T_i^0 = \tau_\Sigma, \quad T_d^0 = \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_\Sigma},$$

де $\tau_\Sigma = \tau_1 + \tau_2$.

Для підвищення робастності введено коефіцієнт детюнінгу δ:

$$\delta = 1 + 0.5 \cdot \frac{\theta}{\tau_\Sigma}.$$

Кінцеві параметри регулятора:

$$K_p = \frac{K_p^0}{\delta}, \quad T_i = T_i^0 \cdot \delta, \quad T_d = \frac{T_d^0}{\delta}.$$

Для ідентифікованих параметрів ($K_{obj} = 285$ °C·с/кг, $\tau_1 = 420$ с, $\tau_2 = 780$ с, $\theta = 540$ с) отримано: $K_p = 0.0032$ (кг/с)/°C, $T_i = 1470$ с, $T_d = 223$ с, що забезпечує запаси стійкості $\varphi_m \approx 52°$, $A_m \approx 8.9$ дБ.

Синтез коефіцієнта випереджувальної компенсації.
Компенсуючий вплив:

$$u_{ff}(t) = K_{ff} \cdot B_{AF}(t) \cdot \frac{\widehat{Q}_i^{AF}(t) - Q_{i,ref}^{AF}}{Q_i^{TF}},$$

де K_{ff} – коефіцієнт компенсації; $Q_{i,ref}^{AF}$ – референтна калорійність альтернативного палива, МДж/кг.

За наявності похибки оцінки $\varepsilon_Q(t) = \widehat{Q}_i^{AF}(t) - Q_i^{AF}(t)$ оптимальне значення K_{ff}, що мінімізує дисперсію помилки регулювання, визначається як:

$$K_{ff}^{opt} = \frac{\sigma_Q^2}{\sigma_Q^2 + \sigma_\varepsilon^2},$$

де σ_Q^2 – дисперсія калорійності палива; σ_ε^2 – дисперсія похибки оцінки.

Для $\sigma_Q = 3.3$ МДж/кг та $\sigma_\varepsilon = 2.0$ МДж/кг розрахунок дає $K_{ff}^{opt} = 0.73$.

Дискретний алгоритм функціонування регулятора.

Для реалізації в ПЛК розроблено дискретний алгоритм (крок $\Delta t = 1$ с). Основним є рівняння для інтегральної складової з механізмом anti-windup (back-calculation):

$$I(k) = I(k-1) + \frac{K_p \Delta t}{T_i} e(k) + \frac{\Delta t}{T_t}(u_{sat}(k-1) - u(k-1)),$$

де $I(k)$ – інтегральна складова на $k-му$ кроці; $e(k)$ – помилка регулювання; u_{sat} – обмежений вихід регулятора; u – необмежений вихід; $T_t = \sqrt{T_i T_d}$ – постійна часу відстеження.

Методика імітаційного моделювання.

Ефективність системи оцінювалась шляхом порівняння трьох стратегій у MATLAB/Simulink:

– Стратегія А: Базовий ПІД-регулятор.

– Стратегія Б: Каскадний ПІД-регулятор.

– Стратегія В: Запропонована комбінована система (каскадний ПІД + feedforward).

Збурення калорійності генерувалось як авторегресійний процес AR(1):

$$Q_i^{AF}(k) = \bar{Q}_i^{AF} + \rho\left(Q_i^{AF}(k-1) - \bar{Q}_i^{AF}\right) + \sigma_Q \sqrt{1-\rho^2}\, \varepsilon(k),$$

де $\bar{Q}_i^{AF}$ – середня калорійність, МДж/кг; ρ – коефіцієнт кореляції; $\varepsilon(k)$ – білий шум.

Основні результати та їх обговорення.

Ефективність запропонованої комбінованої системи керування (Стратегія В) оцінювалась у порівнянні з двома базовими підходами (А та Б) за трьома сценаріями моделювання. Критеріями порівняння були: якість регулювання (середньоквадратичне відхилення σ, час регулювання t_s, перерегулювання к), енергоефективність (питома витрата тепла q_spec) та робастність. Результати представлені на рисунку 1.

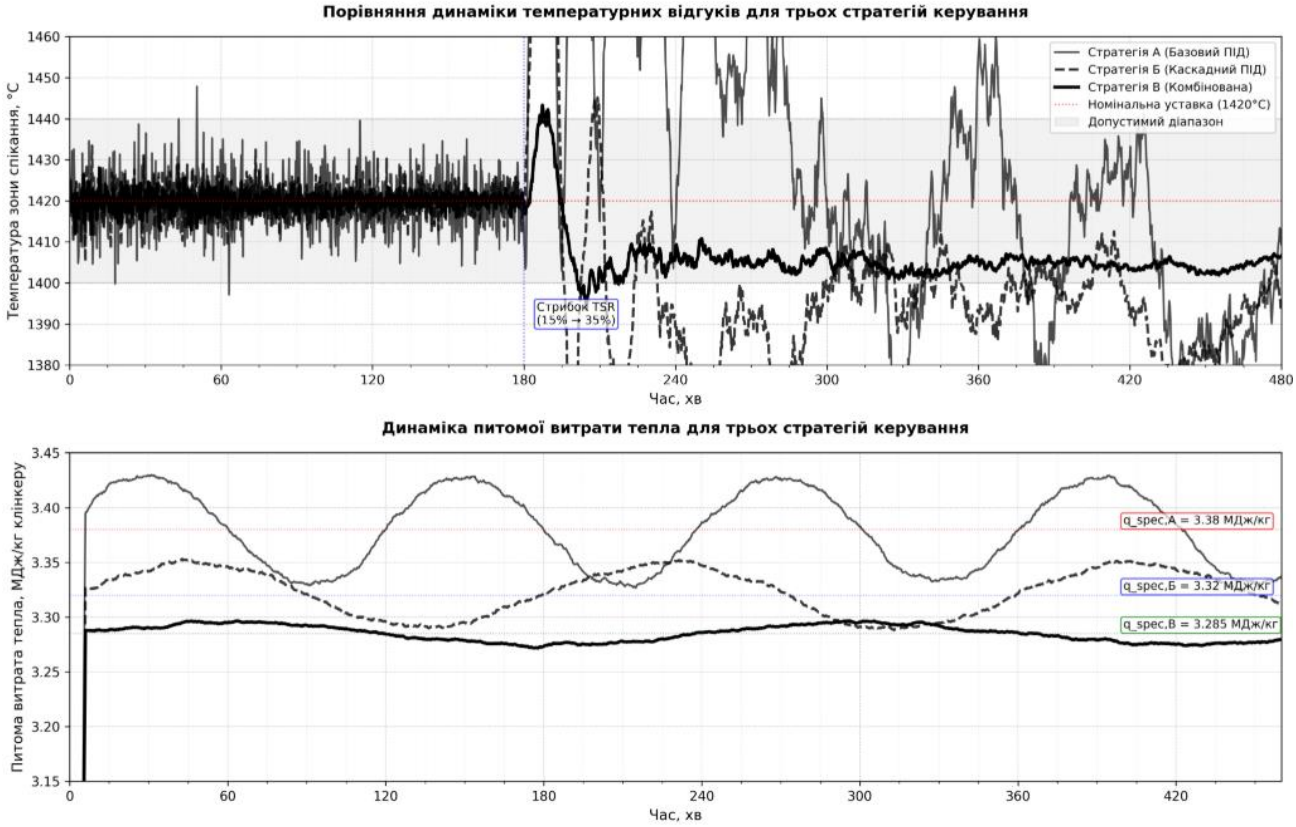


Рисунок 1 – Результати імітаційного моделювання комбінованої системи керування

У стаціонарному режимі з коефіцієнтом термічного заміщення 25% та варіативністю калорійності палива CV_Q = 15% отримано такі результати (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняльні показники якості регулювання для трьох стратегій керування (стаціонарний режим)

Показник	***Стратегія А (Базовий ПІД)***	***Стратегія Б (Каскадний ПІД)***	***Стратегія В (Комбінована)***
Середнє значення T_zone, °C	1419.2	1420.1	1420.0
Середньоквадратичне відхилення σ_T, °C	24.8	16.3	12.1
Максимальне відхилення T_max - T_min, °C	116	77	57
Час регулювання t_s, хв	58	48	38
Перерегулювання κ, %	12	9	7
Питома витрата тепла q_spec, МДж/кг	3.38	3.32	3.285

Аналіз даних табл. 1 показує, що запропонована комбінована стратегія В забезпечує найвищу точність та стабільність. Середньоквадратичне відхилення температури зони спікання σ_T знизилось на 34.3% порівняно з каскадною стратегією Б та на 51.2% порівняно з базовою стратегією А. Це є прямим наслідком введення випереджувальної компенсації, яка активно придушує збурення від калорійності палива до їх впливу на температуру. Динамічна якість також покращилась: час регулювання скоротився на 34.5%, а перерегулювання – на 41.7% відносно базового ПІД-регулятора.

Ефективність контуру feedforward залежить від точності оцінки калорійності альтернативного палива. Результати параметричного дослідження цієї залежності представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Вплив похибки оцінювання калорійності на ефективність випереджувальної компенсації

Відносна похибка оцінки, δ_Q = σ_ε / σ_Q, %	***Коефіцієнт ефективності компенсації, η_ff***	***Середньоквадратичне відхилення σ_T, °C***
0 (ідеальна оцінка)	0.65	8.7
20	0.58	10.4
40	0.45	13.6
60	0.28	17.9
80	0.08	22.8
100 (наявність лише ПІД)	0	24.8

Коефіцієнт ефективності компенсації розраховувався як η_ff = 1 – (σ_T^ff / σ_T^base). Дані таблиці 2 підтверджують, що навіть за значної похибки оцінки (до 50–60%) механізм feedforward забезпечує помітне покращення якості (η_ff > 0.28). Це обґрунтовує практичну реалізованість запропонованого підходу, враховуючи, що сучасні системи онлайнового аналізу палива забезпечують похибку на рівні 20–30%.

Для оцінки динамічних можливостей системи досліджено сценарій із ступінчастою зміною частки альтернативного палива (TSR) від 15% до 35%. Комбінована стратегія В продемонструвала найкращі результати: час виходу на новий усталений режим становив 38 хв (проти 58 хв у стратегії А), а максимальне динамічне відхилення температури не перевищило 28 °C (проти 45 °C).

У режимі з підвищеною варіативністю палива (CV_Q = 25%) комбінована система показала високу робастність. Середньоквадратичне відхилення σ_T склало 18.7 °C, що на 51.4% менше, ніж у базового ПІД-регулятора (38.5 °C). Частота виходу температури за технологічні межі (1400–1440°C) знизилась з 12.3% до 2.1% часу роботи.

Впровадження комбінованої системи керування дозволяє знизити середню питому витрату тепла на випал клінкеру з 3.38 МДж/кг (Стратегія А) до 3.285 МДж/кг (Стратегія В), що становить економію 2.8%. Для типової печі продуктивністю 3000 тонн клінкеру на добу це відповідає зменшенню річних витрат теплової енергії на приблизно 95 000 ГДж. За середньої вартості паливного еквівалента 150 грн/ГДж, річний економічний ефект може сягати 14.1 млн грн.

Обговорення результатів. Отримані результати однозначно підтверджують гіпотезу про те, що інтеграція випереджувальної компенсації вимірюваних збурень у класичну каскадну структуру є ефективним засобом для підвищення якості, швидкодії та енергоефективності систем керування інерційними об'єктами. Ключовим аспектом є правильний вибір коефіцієнта компенсації K_ff, який повинен враховувати не лише динаміку каналів, а й точність інформації про збурення. Запропонована формула для його розрахунку на основі дисперсійного аналізу показала свою адекватність.

Основні переваги запропонованого рішення:

1. Значне підвищення точності за рахунок випереджувальної компенсації головного збурення.

2. Поліпшення динаміки через розділення завдань між швидким (потік тепла) і повільним (температура) контурами.

3. Підвищення робастності, оскільки feedforward-компенсація зменшує навантаження на ПІД-регулятор і, відповідно, його чутливість до змін параметрів об'єкта.

4. Досяжність енергозбереження шляхом більш стабільного режиму роботи печі ближче до технологічного оптимуму.

Головним обмеженням є необхідність наявності достатньо точної та швидкої оцінки калорійності альтернативного палива, що може вимагати додаткового вимірювального обладнання.

Висновки. На основі проведеного дослідження синтезу та імітаційного аналізу комбінованої системи керування тепловим режимом цементної печі можна зробити такі основні висновки:

1. Синтезовано структуру комбінованого каскадного регулятора з випереджувальною компенсацією для керування температурою зони спікання. Запропонована архітектура інтегрує переваги каскадної динаміки (внутрішній швидкий контур теплового навантаження, зовнішній точний контур температури) та принципу активної компенсації вимірюваних збурень (feedforward-компенсація калорійності альтернативного палива), що є новим підходом для даного класу об'єктів.

2. Розроблено методику синтезу параметрів регулятора, яка включає:

– Визначення налаштувань каскадного ПІД-регулятора ($K_p = 0.0032$ (кг/с)/°C, $T_i = 1470$ с, $T_d = 223$ с) методом оптимуму за модулем з подальшою корекцією на робастність (коефіцієнт детюнінгу $\delta = 1.225$), що забезпечило запаси стійкості $\phi_m \approx 52°$, $A_m \approx 8.9$ дБ.

– Аналітичне визначення оптимального коефіцієнта випереджувальної компенсації $K_{ff}^{opt} = 0.73$ на основі співвідношення дисперсій калорійності палива та похибки її оцінки.

3. Результати імітаційного моделювання підтвердили значну ефективність запропонованої системи порівняно з базовими підходами. Для стаціонарного режиму досягнуто:

– Зниження середньоквадратичного відхилення температури на 51.2% (з 24.8°C до 12.1°C).

– Скорочення часу регулювання на 34.5% (з 58 хв до 38 хв).

– Зменшення питомої витрати тепла на 2.8% (з 3.38 до 3.285 МДж/кг).

4. Встановлено, що запропонована система володіє підвищеною робастністю. При підвищеній варіативності палива ($CV_Q = 25\%$) вона забезпечує зниження σ_T на 51.4% та зменшення ймовірності виходу за технологічні межі з 12.3% до 2.1% часу роботи, що підтверджує її працездатність у реальних умовах нестабільного паливного потоку.

5. Оцінено потенційний економічний ефект від впровадження. Для печі продуктивністю 3000 т/добу річна економія може сягати 14.1 млн грн за рахунок зменшення витрати теплової енергії та підвищення стабільності якості клінкеру.

Отже, розроблена комбінована система керування є ефективним інструментом для підвищення енергоефективності та технологічної стабільності роботи цементних печей, що використовують альтернативне паливо зі змінними характеристиками. Результати дослідження мають практичну цінність для проєктування та модернізації систем автоматизації енергоємних виробництв.

Перспективи подальших досліджень. Отримані результати відкривають низку перспективних напрямів для подальших наукових та прикладних досліджень:

1. Розробка та впровадження більш точних методів онлайнової оцінки калорійності альтернативного палива. Подальше підвищення ефективності feedforward-компенсації напряму залежить від точності та швидкодії визначення $\widehat{Q}_i^{AF}(t)$. Перспективним є застосування спектроскопічних методів або швидкісних калориметрів, інтегрованих з системою керування.

2. Перехід до повністю адаптивної структури керування. Запропонований регулятор має фіксовані параметри, оптимізовані для певного діапазону змін. Розширенням може бути розробка адаптивної системи, яка в реальному часі оцінює ефективні параметри об'єкта (коефіцієнт підсилення, постійні часи) при зміні складу паливної суміші та автоматично коригує налаштування K_p, T_i, T_d та K_{ff}.

3. Інтеграція комбінованого регулятора у структуру модельно-прогнозуючого керування (MPC) верхнього рівня. Запропонована комбінована система може виконувати роль швидкодіючого, робастного нижнього рівня керування. Для оптимізації економічних показників всього агрегату (піч-декарбонізатор-холодильник) перспективним є її підпорядкування координованому MPC-оптимізатору верхнього рівня, який би визначав оптимальні уставки температури та розподіл палива.

4. Експериментальна апробація алгоритму на фізичній моделі (hardware-in-the-loop) або промисловому об'єкті. Наступним обов'язковим кроком є перевірка працездатності розробленого алгоритму в умовах, максимально наближених до реальних, з використанням програмованого логічного контролера (ПЛК) та емуляції динаміки печі.

Реалізація цих напрямів дозволить створити нове покоління інтелектуальних систем автоматизації для вітчизняної економіки, здатних ефективно та стабільно використовувати широкий спектр вторинних енергоресурсів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Li X., Wang M., Wang K., Liu Z. & Li G. Converter inlet temperature control in flue gas acid-making process based on equivalent input disturbance and model prediction. Optimal control Applications and Methods, 44(4), 2093–2111. 2023. https://doi.org/10.1002/oca.2967.

2. Wang T., Li D., Kan Z., Yuan L., Ma K., & Xiang J. Feedforward compensation control method designed for gust alleviation of aircraft with large aspect ratio. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 239(14), 2000–2009. 2025. https://doi.org/10.1177/09544100251346058.

3. Ning X., Huang W., Xu G., Wang Z., Wu B., Zheng L. & Xu B. A Novel Model-Based Adaptive Feedforward-Feedback Control Method for Real-Time Hybrid Simulation considering Additive Error Model. Structural control and Health Monitoring, 2023, 1–25. https://doi.org/10.1155/2023/5550580.

4. Bae J., Kim K., Chu S., Heo J., Lim S. & Sung S. Development of an Antiwindup Technique for a Cascade Control System. Acs Omega, 5(50), 32597–32607. 2020. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04927.

5. Ye W., Zhong S., Shen Y., Zhang X. & Wang Y. Predictive Control Scheme for Fuel Cell Air Compressor Efficiency Enhancement with Surge- and Choke-Constrained Awareness. Advanced Theory and Simulations, 7(6). 2024. https://doi.org/10.1002/adts.202400284.

6. Jiang X. Data-Driven Modeling and Predictive Control of a High-Quality Special Steel Electroslag Remelting Process with Time Delay. Acs Omega, 10(42), 50349–50358. 2025. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c07415.

7. Dehkordi M. and Danesh M. Fuzzy control allocation of a positionable rotor quadrotor based on log-barrier optimization and propulsion system fault toleration. Iet control Theory and Applications, 18(9), 1176–1190. 2024. https://doi.org/10.1049/cth2.12653.

8. Karlsson I., Rootzén J., Toktarova A., Odenberger M., Johnsson F. & Göransson L. Roadmap for Decarbonization of the Building and Construction Industry—A Supply Chain Analysis Including Primary Production of Steel and Cement. Energies, 13(16), 4136. 2020. https://doi.org/10.3390/en13164136.

9. Rahman H. and Hidayaturrahman C. Analysis of electrostatic precipitators plate-wire type in reducing dust emissions for sustainable environment. Sustinere Journal of Environment and Sustainability, 7(1), 1–14. 2023. https://doi.org/10.22515/sustinerejes.v7i1.295.

10. Чуб І. М., Пічка Д. С. Система автоматизованого управління виробництвом цементу. Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XX Міжнар. форуму молоді, 4–5 квіт. 2024 р. Харків: ДБТУ. С. 251.

11. Bisulandu B. and Huchet F. Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications. Applied Thermal Engineering, 221, 119637. 2023. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119637.

12. Silva T., Paula M., Silva W. & Lacorte G. Deposition of Potentially Toxic Metals in the Soil from Surrounding Cement Plants in a Karst Area of Southeastern Brazil. Conservation, 1(3), 137–150. 2021. https://doi.org/10.3390/conservation1030012.

13. Öztürk B., Öztürk O. & Karademir A. NOx emission modeling at cement plants with co-processing alternative fuels using ANN. Environmental Engineering Research, 27(5), 210277-0. 2022. https://doi.org/10.4491/eer.2021.277.

14. Moreno A., Castán-Lascorz M. & Tavares V. An Industrial-Scale Cement Rotary Kiln CFD Model to Characterise Alternative Fuel Combustion Profiles., 448–459. 2023. https://doi.org/10.52202/069564-0041.

15. Urbano J., Henríquez J., Ochoa Á., Primo A. & Souza A. Dynamic modeling of the heat transfer process in rotary kilns with indirect oil heating: Parametric analysis of gypsum calcination case. Thermal Science, 26(2 Part C), 1637Ö1648. 2022. https://doi.org/10.2298/tsci210523245u.

16. Manis O., Skoumperdis M., Kioroglou C., Tzilopoulos D., Ouzounis M., Loufakis M. & Stankovski M. Data Driven AI Models within a User-Defined Optimization Objective Function in Cement Production. 2023. https://doi.org/10.20944/preprints202312.1328.v1.

17. Sutawijaya A. and Kayi A. Optimizing the clinker production by using an automation model in raw material feed. International Journal of Industrial Optimization, 2(1), 17. 2021. https://doi.org/10.12928/ijio.v2i1.3002.

18. Tabares J., McGinley W., Druffel T. & Bhagwat B. Experimental validation of multiphysics model simulations of the thermal response of a cement clinker rotary kiln at laboratory scale. Journal of Advanced Manufacturing and Processing, 4(4). 2022. https://doi.org/10.1002/amp2.10134.

REFERENCES

1. 1. Li, X., Wang, M., Wang, K., Liu, Z., & Li, G. (2023). Converter inlet temperature control in flue gas acid-making process based on equivalent input disturbance and model prediction. Optimal control Applications and Methods, 44(4), 2093–2111. https://doi.org/10.1002/oca.2967.

2. Wang, T., Li, D., Kan, Z., Yuan, L., Ma, K., & Xiang, J. (2025). Feedforward compensation control method designed for gust alleviation of aircraft with large aspect ratio.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 239(14), 2000–2009. https://doi.org/10.1177/09544100251346058.

3. Ning, X., Huang, W., Xu, G., Wang, Z., Wu, B., Zheng, L., & Xu, B. (2023). A Novel Model-Based Adaptive Feedforward-Feedback Control Method for Real-Time Hybrid Simulation considering Additive Error Model. Structural control and Health Monitoring, 1–25. https://doi.org/10.1155/2023/5550580.

4. Bae, J., Kim, K., Chu, S., Heo, J., Lim, S., & Sung, S. (2020). Development of an Antiwindup Technique for a Cascade Control System. Acs Omega, 5(50), 32597–32607. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c04927.

5. Ye, W., Zhong, S., Shen, Y., Zhang, X., & Wang, Y. (2024). Predictive Control Scheme for Fuel Cell Air Compressor Efficiency Enhancement with Surge- and Choke-Constrained Awareness. Advanced Theory and Simulations, 7(6). https://doi.org/10.1002/adts.202400284.

6. Jiang, X. (2025). Data-Driven Modeling and Predictive Control of a High-Quality Special Steel Electroslag Remelting Process with Time Delay. Acs Omega, 10(42), 50349–50358. https://doi.org/10.1021/acsomega.5c07415.

7. Dehkordi, M. and Danesh, M. (2024). Fuzzy control allocation of a positionable rotor quadrotor based on log-barrier optimization and propulsion system fault toleration. Iet control Theory and Applications, 18(9), 1176–1190. https://doi.org/10.1049/cth2.12653.

8. Karlsson, I., Rootzén, J., Toktarova, A., Odenberger, M., Johnsson, F., & Göransson, L. (2020). Roadmap for Decarbonization of the Building and Construction Industry—A Supply Chain Analysis Including Primary Production of Steel and Cement. Energies, 13(16), 4136. https://doi.org/10.3390/en13164136.

9. Rahman, H. and Hidayaturrahman, C. (2023). Analysis of electrostatic precipitators plate-wire type in reducing dust emissions for sustainable environment. Sustinere Journal of Environment and Sustainability, 7(1), 1–14. https://doi.org/10.22515/sustinerejes.v7i1.295.

10. Chub, I. M., Pichka, D. S. (2024). Systema avtomatyzovanoho upravlinnia vyrobnytstvom tsementu. Molod i industriia 4.0 v XXI stolitti: materialy KhKh Mizhnar. forumu molodi, 4–5 kvit. Kharkiv: DBTU, 2024. S. 251.

11. Bisulandu, B. and Huchet, F. (2023). Rotary kiln process: An overview of physical mechanisms, models and applications. Applied Thermal Engineering, 221, 119637. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119637.

12. Silva, T., Paula, M., Silva, W., & Lacorte, G. (2021). Deposition of Potentially Toxic Metals in the Soil from Surrounding Cement Plants in a Karst Area of Southeastern Brazil. Conservation, 1(3), 137-150. https://doi.org/10.3390/conservation1030012

13. Öztürk, B., Öztürk, O., & Karademir, A. (2021). NOx emission modeling at cement plants with co-processing alternative fuels using ANN. Environmental Engineering Research, 27(5), 210277-0. https://doi.org/10.4491/eer.2021.277.

14. Moreno, A., Castán-Lascorz, M., & Tavares, V. (2023). An Industrial-Scale Cement Rotary Kiln CFD Model to Characterise Alternative Fuel Combustion Profiles., 448–459. https://doi.org/10.52202/069564-0041.

15. Urbano, J., Henríquez, J., Ochoa, Á., Primo, A., & Souza, A. (2022). Dynamic modeling of the heat transfer process in rotary kilns with indirect oil heating: Parametric analysis of gypsum calcination case. Thermal Science, 26(2 Part C), 1637–1648. https://doi.org/10.2298/tsci210523245u.

16. Manis, O., Skoumperdis, M., Kioroglou, C., Tzilopoulos, D., Ouzounis, M., Loufakis, M., & Stankovski, M. (2023). Data Driven AI Models within a User-Defined Optimization Objective Function in Cement Production.. https://doi.org/10.20944/preprints202312.1328.v1.

17. Sutawijaya, A. and Kayi, A. (2021). Optimizing the clinker production by using an automation model in raw material feed. International Journal of Industrial Optimization, 2(1), 17. https://doi.org/10.12928/ijio.v2i1.3002.

18. Tabares, J., McGinley, W., Druffel, T., & Bhagwat, B. (2022). Experimental validation of multiphysics model simulations of the thermal response of a cement clinker rotary kiln at laboratory scale. Journal of Advanced Manufacturing and Processing, 4(4). https://doi.org/10.1002/amp2.10134.

Zhuchenko O. A., Gutovsky D. V. SYNTHESIS AND RESEARCH OF A COMBINED CASCADE REGULATOR WITH ADVANCED COMPENSATION FOR CONTROLLING THE THERMAL MODE OF A CEMENT FURNACE

Improving energy efficiency and stabilizing product quality are critical challenges for the modern cement industry, especially with the widespread adoption of alternative fuels with highly variable characteristics. This study aims to develop and validate a combined cascade controller with feedforward compensation for controlling the sintering zone temperature of a rotary cement kiln. The proposed system integrates the advantages of a cascade structure, featuring a fast inner heat load loop and a precise outer temperature loop, with a feedforward channel that actively compensates for the main measured disturbance—the calorific value of alternative fuel.

The research is based on a dynamic model of the kiln's "fuel flow - temperature" channel, approximated as a second-order transfer function with a significant time delay. The control requirements were formalized considering technological constraints, dynamic performance, robustness, and energy efficiency. The synthesis of the combined controller involved two key steps: (1) tuning the parameters of the cascade PID controller using the modulus optimum method with subsequent detuning for robustness, resulting in parameters $K_p = 0.0032$ *(kg/s)/°C,* $T_i = 1470$ *s,* $T_d = 223$ *s, which provide stability margins of* $\phi_m \approx 52^\circ$ *and* $A_m \approx 8.9$ *dB; (2) determining the optimal feedforward compensation coefficient* $K_{ff}^{opt} = 0.73$ *based on a variance analysis that accounts for errors in estimating the fuel's calorific value. A discrete control algorithm suitable for implementation in na industrial PLC was developed, incorporating anti-windup mechanisms and rate-of-change limits.*

The effectiveness of the proposed control system (Strategy C) was evaluated through simulation in MATLAB/Simulink and compared with two baseline strategies: a single-loop PID controller (Strategy A) and a cascade PID controller without feedforward compensation (Strategy B). Stochastic disturbances in fuel calorific value were generated using a first-order autoregressive (AR1) model. Simulations covered three operational scenarios: steady-state operation, step change in alternative fuel share, and high fuel variability conditions.

The results demonstrate the superior performance of the combined feedforward-feedback strategy. In the steady-state regime, it reduced the root-mean-square deviation of temperature by 51.2% (from 24.8°C to 12.1°C) and the settling time by 34.5% (from 58 min to 38 min) compared to the basic PID controller. The overshoot was also minimized. Furthermore, the specific heat consumption decreased by 2.8%, from 3.38 MJ/kg to 3.285 MJ/kg. In the high-variability scenario (CV = 25%), the combined system showed enhanced robustness, maintaining a temperature standard deviation of 18.7°C, which is 51.4% lower than the basic controller. The economic impact was estimated, showing potential annual fuel cost savings of up to UAH 14.1 million for a kiln with a capacity of 3000 tons of clinker per day.

The study confirms that integrating feedforward compensation of measurable disturbances into a cascade control structure is a highly effective approach for enhancing control quality, dynamic response, and energy efficiency in processes with large inertia and delay, operating on fuels with unstable characteristics. The proposed methodology for controller synthesis and the obtained results are of significant practical value for designing automation systems in energy-intensive industries transitioning to circular economy models.

Key words: *automatic control system; combined controller; cascade control; feedforward compensation; cement kiln; alternative fuel; robust control; simulation modeling.*

© Жученко О. А., Гутовський Д. В.

Статтю прийнято до редакції 06.12.2025

УДК 620:178.3

ВИКОРИСТАННЯ АУГМЕНТАЦІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ НАВЧАННЯ МОДЕЛІ ШТУЧНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАКУРСУ СУДНА

Пашенко О. Л., *старший викладач кафедри електронних комплексів судноводіння Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: olena.p.3333@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0462-0130.*

Дослідження присвячене аналізу впливу методів аугментації даних на ефективність тренування моделей комп'ютерного зору для визначення ракурсу суден у морському середовищі. У роботі розглядаються особливості застосування геометричних, колірних та просторово-локальних трансформацій, враховуючи специфіку морських зображень, таких як наявність горизонту, мінливі умови освітлення та оклюзії. Актуальність дослідження зумовлена обмеженою кількістю даних і дисбалансом класів у наборах морських зображень, що ускладнює досягнення високої точності класифікації. Для експериментів використано базу даних із 1742 зображень, включаючи приклади без об'єктів розпізнавання. Для проведення дослідження була створена модель на базі найлегшої YOLOv8n. Тренування моделі відбувалося з використанням різних типів аугментацій. Результати показують, що показник mAP50 = 0,61229 без використання аугментації може бути покращений завдяки використанню деяких колірних аугментацій та геометричних трансформацій (mAP50 до 0,64649). Водночас такі трансформації можуть і погіршити результати, знижуючи якість через спотворення орієнтації суден. Отримані висновки мають практичне значення для систем автономного судноводіння, сприяючи підвищенню точності розпізнавання в реальних умовах.

Ключові слова: *аугментація даних; комп'ютерний зір; ракурс суден; глибоке навчання; геометричні трансформації; колірні аугментації; просторово-локальні трансформації; YOLOv8n; mAP50; mAP50-95; precision; recall.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.052-063

Вступ. Сучасний розвиток штучного інтелекту та комп'ютерного зору відкриває нові можливості для автоматизації процесів у сфері морської навігації. Одним із важливих напрямів є створення систем, здатних не лише виявляти судна на зображеннях, а й визначати їх ракурс, що дозволяє прогнозувати траєкторію руху та підвищувати рівень безпеки на морі. Визначення ракурсу судна є одним із важливих завдань, оскільки від нього залежить ефективність ухвалення навігаційних рішень у режимі реального часу, особливо в умовах інтенсивного морського трафіку.

Упродовж останніх років моделі штучного зору [1, 2], зокрема YOLOv8, зарекомендували себе як високопродуктивні рішення для задач виявлення й класифікації об'єктів. Вони поєднують швидкодію та високу точність, що робить їх придатними для інтеграції в бортові та дистанційні системи підтримки навігації. Проте ефективність таких моделей значною мірою залежить від різноманітності та якості навчальних даних [3–5]. Морське середовище характеризується зміною освітлення та погодних умов [6]. Це призводить до того, що модель, навчена на обмеженому наборі даних, може втрачати точність у реальних умовах експлуатації.

Одним із поширених способів подолання цієї проблеми є використання аугментацій – штучного збільшення різноманіття даних шляхом застосування колірних, геометричних та інших трансформацій. Такі методи традиційно застосовуються для покращення узагальнюючої здатності моделей і зменшення перенавчання. Водночас у задачі визначення ракурсу судна аугментації мають особливе значення, оскільки неправильний підбір трансформацій може призвести не до підвищення, а навпаки – до зниження точності моделі. Це зумовлює необхідність цілеспрямованого дослідження впливу окремих типів аугментацій на результати роботи моделі в умовах морського середовища.

Постановка проблеми. Безвідмовне функціонування судноплавної інфраструктури безпосередньо залежить від стабільної роботи екіпажів суден. Точне визначення ракурсу суден у морському середовищі є однією з задач для забезпечення безпеки та ефективності

навігаційних систем. Моделі комп'ютерного зору, такі як YOLOv8, потребують різноманітних і збалансованих навчальних даних для досягнення високих показників ефективності. Однак набори даних для морських зображень часто обмежені за обсягом і характеризуються дисбалансом класів, де деякі ракурси представлені значно меншою кількістю прикладів. Крім того, морське середовище ускладнює завдання через мінливі погодні умови, зміну освітлення та часткову оклюзію об'єктів.

Аугментація даних може компенсувати ці недоліки шляхом трансформації зображень, але неправильний вибір трансформацій, таких як віддзеркалення чи обертання, може призвести до спотворення орієнтації судна, що критично для задачі класифікації ракурсу. Таким чином, виникає проблема: які методи аугментації є оптимальними для підвищення продуктивності моделі в умовах обмежених даних, зберігаючи при цьому фізичну достовірність морських сцен, і як кількісно оцінити їхній вплив на метрики якості моделі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження в галузі комп'ютерного зору, особливо в задачах із обмеженою кількістю даних, активно використовують методи аугментації для підвищення продуктивності моделей глибокого навчання. Ці методи дозволяють штучно розширювати тренувальні набори, покращуючи узагальнюючу здатність моделей і зменшуючи ризик перенавчання.

Огляд методів аугментації, представлений у [7], підкреслює їхню універсальність для обробки зображень та відео. Автори зазначають, що аугментація підвищує точність на тестових даних шляхом імітації реальних умов. Основні групи методів аугментації включають: геометричні, колірні, просторово-локальні, генеративні підходи для створення синтетичних зображень [8–10]. Генеративні методи, описані в [11], дозволяють створювати реалістичні синтетичні морські сцени за допомогою ігрових рушіїв (game engines) або GAN, що зменшує потребу в зборі реальних даних.

Дослідження [5] показують, що в морських умовах деякі геометричні трансформації, такі як віддзеркалення чи обертання, можуть знижувати якість класифікації, порушуючи фізичний сенс сцени, наприклад, орієнтацію горизонту чи напрям руху судна. Аналогічно, у [10] підкреслюється, що методи, такі як випадкове стирання, є ефективними для подолання оклюзій у морських зображеннях, тоді як віддзеркалення може вводити модель в оману.

Таким чином, сучасні дослідження підкреслюють важливість адаптації аугментацій до специфіки задачі, особливо в морському середовищі, де неправильні трансформації можуть погіршити результати. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою адаптивних стратегій аугментації та вдосконаленням генеративних методів.

Мета та задачі дослідження. У роботі [12] були опубліковані дані щодо роботи моделі на власному наборі даних. Через незбалансованість класів, відсутність достатньої кількості прикладів для деяких ракурсів, а також складності виявлення великих суден на передньому плані та інше, модель потребувала донавчання. Основна мета цього дослідження полягає у визначенні впливу різних типів аугментацій – колірних, геометричних та просторово-локальних – на ефективність доповнення даних під час навчання моделей комп'ютерного зору.

Для досягнення поставленої мети задачами дослідження є проведення аналізу різних видів аугментацій у комп'ютерному зорі з особливим акцентом на їх застосуванні в морських умовах, навчання моделі YOLOv8n із використанням різних типів аугментацій та без них для порівняння результатів, вплив кожного методу аугментації на ключові метрики моделі, а також визначення найбільш доцільних трансформацій, що підвищують стійкість до варіативних умов зйомки без спотворення критично важливих просторових ознак сцени.

Основна частина

1. Аугментація

1.1 Аугментація та її різноманіття

Аугментація даних відіграє ключову роль у підвищенні ефективності моделей глибокого навчання. Вона дозволяє розширити навчальний набір шляхом генерації нових варіацій на основі наявних зображень без необхідності збору додаткових даних. Це, у свою

чергу, зменшує ризик перенавчання, оскільки модель не фокусується виключно на унікальних особливостях вихідних даних. Крім того, аугментація сприяє покращенню здатності моделі до узагальнення, що дає змогу ефективніше розпізнавати об'єкти в умовах, що відрізняються від навчальних. У результаті підвищується загальна точність розпізнавання валідаційних і тестових даних, що є критично важливим для практичного застосування в реальних сценаріях.

Як вже зазначалося, аугментація – це багатофункціональний засіб для збільшення різноманіття навчальних зразків. Багато сфер знань не мають доступу до великого об'єму даних. Залежно від того, що саме повинна розпізнавати модель штучного зору, доцільно підбирати відповідні види аугментації для штучного урізноманітнення набору. Можна виділити наступні види аугментації:

– Геометричні трансформації: горизонтальне або вертикальне віддзеркалення, випадкове обертання, масштабування, вирізання, зсув. Ці операції призначені для зміни просторового положення об'єктів.

– Зміни кольору: регулювання яскравості, контрасту, насиченості, відтінку, додавання шуму, розмиття тощо. Вони імітують різні умови освітлення та шуму камери.

– Випадкове затемнення/вирізання, що покращує стійкість моделі до часткової неповноти об'єкта (оклюзії).

– Поєднання зображень дозволяє комбінувати зображення в одне ціле, шляхом усереднення або накладання фрагментів. Це створює нові «змішані» приклади та зменшує чутливість до конкретних пікселів.

– Генеративні підходи: створення синтетичних кадрів (відеозаписів чи зображень) за допомогою GAN, 3D-симуляторів або інших моделей генерації. Це перспективний напрямок, особливо коли базові методи мають свої обмеження [13].

Вибір відповідних методів аугментації має базуватися на специфіці конкретного застосування та характеристиках набору даних.

1.2 Методи аугментації зображень для задачі розпізнавання ракурсу суден

Як зазначалося раніше, застосування аугментації дозволяє створювати модифіковані копії наявних зображень (наприклад, шляхом обертання, відображення чи зміни кольору), що сприяє кращому узагальненню моделей на нових даних. Але при таких перетвореннях варто враховувати характер морського середовища: завжди присутній горизонт, море знаходиться унизу, а небо зверху. Ці особливості повинні залишатися в аугментованих зображеннях. Як зазначено в [10], при невеликому обсязі даних і специфічних умовах «фонова» експертиза є критичною при виборі аугментацій. Тобто саме знання особливостей зображення морського середовища (хвилі на воді, метеорологічні опади, перепади освітлення в денний та нічний час тощо) допоможе обирати ефективні методи трансформацій.

У цій роботі автором запропоновані три групи аугментацій, а саме: аугментації кольорового простору, геометричні трансформації та просторово-локальні перетворення. Інші стандартні аугментації знижують якість навчання, а саме обертання, віддзеркалення, композиційні трансформації було виключено, оскільки вони можуть змінювати просторову структуру або напрямок об'єкта, що є критичним у задачах визначення ракурсу. Наприклад, дзеркальне відображення об'єктів є недоцільним при навчанні моделі штучного зору для визначення ракурсу суден, оскільки повністю спотворює результати дослідження.

З метою підвищення стійкості моделі до незначних коливань у кольоровому представленні зображень, спричинених варіативністю умов зйомки, та розширення бази даних, у процесі навчання було застосовано кольорові аугментації у вигляді випадкового регулювання відтінку (Hue Shift), насиченості (Saturation Shift) та яскравості (Brightness Shift). Регулювання відтінку особливо ефективне для задач комп'ютерного зору в умовах змінного природного освітлення, коли вигляд об'єктів може суттєво змінюватися. Техніка регулювання насиченості дозволяє моделі краще адаптуватися до різноманітних умов зйомки, зокрема до змін погоди чи налаштувань камери. При навчанні моделей, які повинні працювати за реальних умов освітлення закладається зміна яскравості. На рис. 1

представлені випадкові значення параметрів зміни відтінку, насиченості та яскравості прийнятні для розпізнавання об’єктів у морському середовищі.

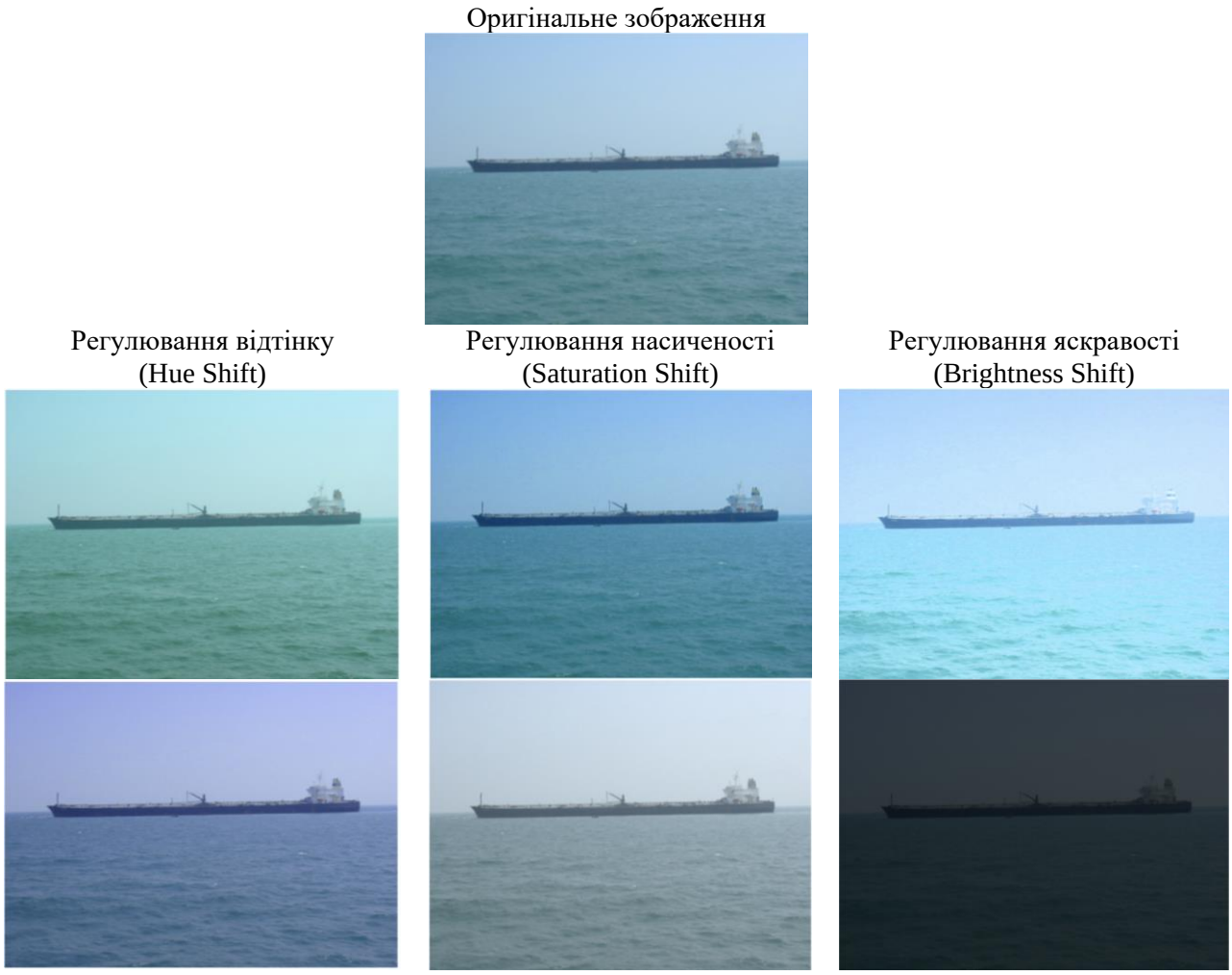


Рисунок 1 – Приклади аугментацій кольорового простору

Геометричні трансформації є ключовим інструментом аугментації даних при навчанні моделей комп’ютерного зору. Серед основних методів – зсув (translate), масштабування (scaling), зсув по осі (shear), перспективне викривлення (perspective) (рис. 2). Для цілей розпізнавання суден, а саме їх ракурсу, зсув (translate) є одним із базових типів геометричних аугментацій, який полягає у випадковому зміщенні зображення вздовж горизонтальної та вертикальної осей. У задачах розпізнавання суден на морській поверхні цей метод дозволяє моделі ефективно адаптуватися до зміни положення об’єкта в кадрі, що є типовим при зйомці з борту судна. Це імітує зміщення судна в полі зору камери внаслідок хитавиці, маневрування або змін кута спостереження, забезпечуючи більш стійке розпізнавання незалежно від положення.

Зміна розміру об’єктів (scaling) на зображенні дозволяє моделі краще розпізнавати судна, незалежно від їхньої відстані до камери. Така трансформація сприяє адаптації до різних масштабів, без втрати ключової інформації. Цей параметр відповідає за діапазон масштабування, регулює ступінь збільшення або зменшення розміру, забезпечуючи різноманіття навчального набору. Це особливо актуально для систем автономного керування, де судна можуть знаходитись на різній відстані від камери, що впливає на їхній візуальний розмір у кадрі.

Зсув по осі (shear) і перспективне викривлення (perspective) імітують реальні деформації форми суден, спричинені кутом огляду або рухом камери. Вони дозволяють навчити модель коректно розпізнавати об’єкти навіть при геометричних викривленнях, що

особливо актуально для динамічних сцен. Цей тип аугментації особливо важливий при знаходженні камери під нахилом, де такі об'єкти, як будівлі чи судна, можуть сприйматися стиснутими або витягнутими. Завдяки перспективній трансформації модель отримує здатність адаптуватися до змін оглядової точки та зберігати точність у реальних умовах [14–15].

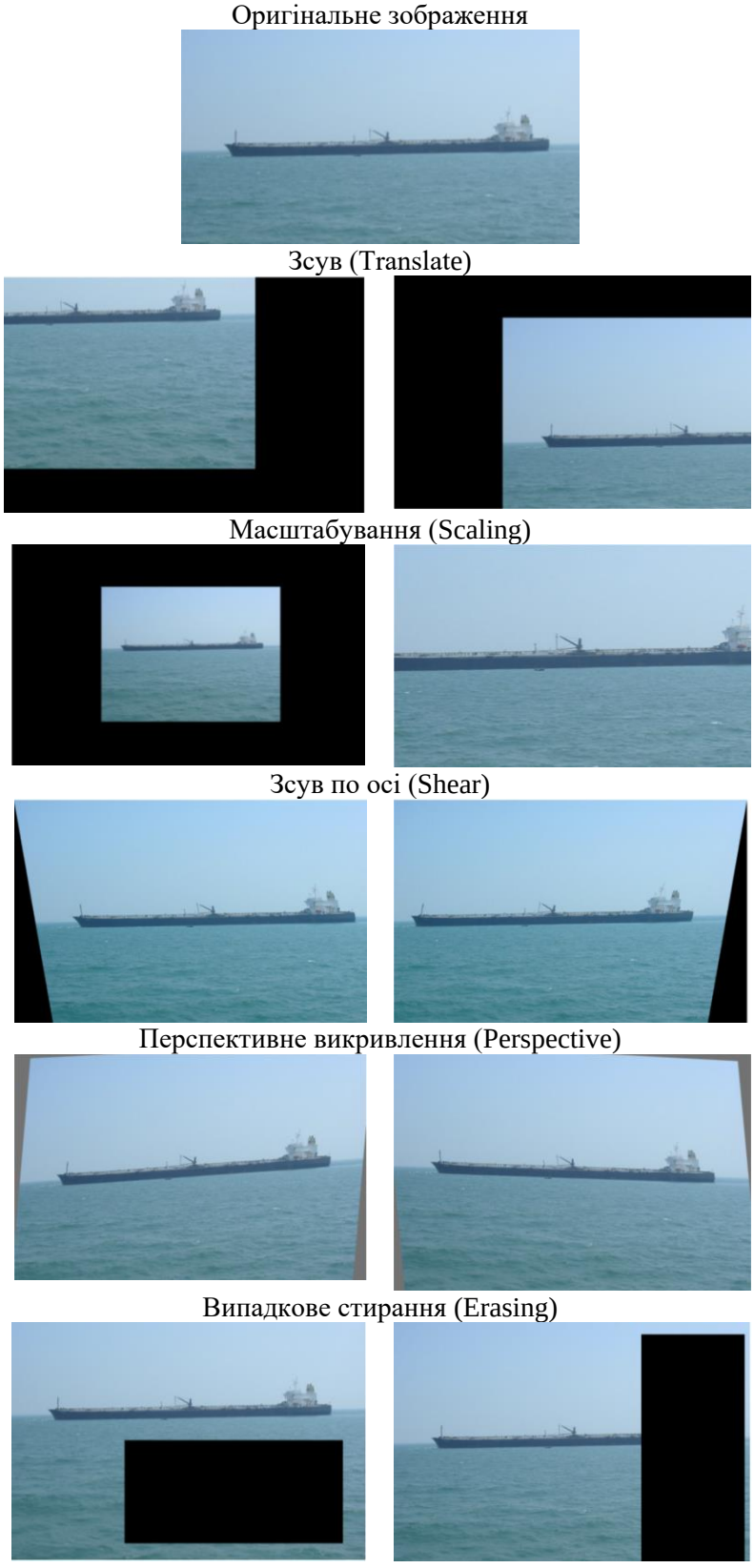


Рисунок 2 – Приклади геометричної та просторово-локальної аугментацій

Такі класичні види аугментації як горизонтальне або вертикальне віддзеркалення (flip) та повороти (rotation) не можна використовувати в моделях розпізнавання ракурсу суден. Попри те, що ці трансформації допомагають моделям краще узагальнювати випадки, будь-які оберти чи віддзеркалення змінюють ніс на корму і навпаки, що плутає в результаті модель.

Одним із поширених методів просторово-локальної аугментації є випадкове стирання (erasing) (рис. 2). Суть методу полягає у випадковому маскуванні прямокутної області зображення, що імітує часткову втрату візуальної інформації внаслідок оклюзії, шуму, бліків чи фонових перешкод, притаманних реальним морським умовам. Застосування даної техніки дозволяє зменшити перенавчання моделі на локальних або найбільш конкретних ознаках (наприклад, форма надбудови чи характер носової частини), змушуючи її враховувати ширший контекст зображення, включно з навколишньою водною поверхнею та формою корпусу.

2. Експериментальна частина

2.1 Оновлена база даних для тренування моделі штучного зору

Для проведення навчання моделі штучного зору, у початковій конфігурації, було сформовано власний набір даних, що включав 925 зображень. Кожен об'єкт на зображеннях класифікувався за одним з восьми ракурсів: forward, port bow, port side, starboard bow, starboard quarter, starboard side, stern, port quarter. Дані були розподілені пропорційно на три групи: тренування (70%), валідація (20%) та тестування (10%). Такі пропорції є стандартними в машинному навчанні для задач комп'ютерного зору, оскільки вони дозволяють виділити переважну частину даних на тренування моделі. Розподіл є приблизним, через те, що навчальні дані зображають реальні сцени на воді і могли містити декілька суден на одному зображенні і розділити їх пропорційно неможливо. Фактичні пропорції в таблиці можуть незначно відрізнятися через округлення або необхідність зберегти цілісність зображень.

Як зазначалося в роботі [12] вищезазначений набір даних потребував доопрацювання. Через велику кількість хибнопозитивних спрацювань, набір даних було доповнено negative examples, які зображають різноманіття навколишнього середовища та портової інфраструктури без суден. Наявність хибненагивних спрацювань сигналізувала про значний дисбаланс класів, що призводило до ігнорування тих класів, які представлені меншою кількістю об'єктів (stern, forward, port quarter).

Оновлена база даних складалася з 1742 зображень (3442 об'єкти), 115 з яких є negative examples, тобто зображеннями без анотацій, які зображають навколишнє середовище. Таблиця 1 відображає зміни між початковим та оновленим набором даних. Варто зазначити, що в таблиці наводиться не кількість зображень, а кількість об'єктів для розпізнавання, тобто зображення може містити декілька суден з різного ракурсу.

Таблиця 1 – Зміна кількості об'єктів розпізнавання для початкового та оновленого набору даних

№ класу	*Назва класу*	*Тренування*	*Валідація*	*Тестування*		*Тренування*	*Валідація*	*Тестування*	*Загальна кількість об'єктів*
0	forward	105	26	17		266	70	29	365
1	port bow	164	42	19		291	77	64	432
2	port side	372	112	52		494	166	63	723
3	starboard bow	153	29	17		285	66	37	388
4	starboard quarter	109	33	13		223	65	33	321
5	starboard side	273	94	41		443	84	50	577
6	stern	72	17	6		150	49	22	221
7	port quarter	110	21	16		213	55	32	300
	negative examples					68	33	14	115
		1358	***374***	***181***		***2433***	***665***	***344***	***3442***

Варто відзначити, що попри доповнення бази даних, все одно спостерігався суттєвий дисбаланс кількості прикладів серед окремих класів. Зокрема, найчисельніший клас port side (494) у тренувальній вибірці мав у понад три рази більше прикладів, ніж найменш представлений stern (150). Такий дисбаланс серед класів навчальної вибірки є типовою проблемою для практичних задач комп'ютерного зору. Зазначений дисбаланс спричиняє схильність моделі до перенавчання на більш представлених класах, ігноруючи менш чисельні. Це, у свою чергу, призводить до низької точності (precision) і повноти (recall) на менш чисельних класах, зростання помилок класифікації (confusion), а також погіршення якості загальної поведінки моделі.

Для компенсації виявленого дисбалансу було прийнято рішення про використання ваг класів (class weights) відносно найбільш представленого класу – тобто класу 2, який має найбільше прикладів (494). Зокрема, для кожного класу було обчислено ваговий коефіцієнт, обернено пропорційний до кількості прикладів у відповідному класі, відповідно до формули:

$$w_i = \frac{N_{\max}}{N_i},$$

де w_i – ваги для класу i, $N_{\max}$ – максимальна кількість об'єктів серед усіх класів, N_i – кількість об'єктів для класу i.

У результаті розрахунку були отримані наступні вагові коефіцієнти для класів від 0 до 7 класу, відповідно (табл. 2). Це дозволило дати більшу вагу мало представленим класам, для того, щоб модель не ігнорувала їх у процесі навчання.

Таблиця 2 – Розрахунок вагових коефіцієнтів для кожного класу об'єктів

Клас	***Кількість об'єктів для тренування***	***Розрахунок***	***Ваги***
0	266	494 / 266 = 1.857	1.86
1	291	494 / 291 = 1.697	1.70
2	494	494 / 494 = 1.000	1.00
3	285	494 / 285 = 1.733	1.73
4	223	494 / 223 = 2.215	2.22
5	443	494 / 443 = 1.115	1.11
6	150	494 / 150 = 3.293	3.29
7	213	494 / 213 = 2.319	2.32

2.2 Тренування моделі штучного зору з використанням різних типів аугментації

За основу, для проведення тренування, була обрана модель, отримана в результаті раніше опублікованого дослідження [12]. Отримані результати свідчать про недонавчання моделі, загальна кількість епох тренування – 165 епох, що є недостатнім для ефективної роботи моделі.

Для виявлення найбільш продуктивної стратегії навчання в цій статті були порівняні різні типи аугментації. Навчання моделі при використанні одного типу аугментації відбувалося протягом 60 епох. Фіксовані параметри для всіх експериментів з тренування моделі YOLOv8n наведені в таблиці 3. Ці параметри забезпечують уніфікованість тренувального процесу: epoch = 60 визначає кількість ітерацій; batch = 4 – розмір пакета даних для оптимізації пам'яті; imgsz = 702 – роздільну здатність зображень, адаптовану до морських сцен; optimizer = Adam з lr0 = 1e-05, lrf = 0.2 та momentum = 0.937 – для ефективної мінімізації втрат; weight_decay = 0.0005 та dropout = 0.0 – для регуляризації без перенавчання; box = 0.03, cls = 0.7 та dfl = 1.2 – ваги функцій втрат для балансу між локалізацією, класифікацією та розподілом; warmup_epochs = 3.0 – для поступового збільшення швидкості навчання. Аугментаційні параметри (degrees, flipud, fliplr, mosaic,

mixup, cutmix, copy_paste, auto_augment) встановлено на 0, щоб ізолювати вплив на тестову аугментацію. Слід зазначити, що тип аугментації підбирався відповідно до задачі, а саме навчання моделі штучного зору, яка визначає ракурс судна в морському середовищі.

Таблиця 3 – Спільні вихідні параметри для всіх проведених експериментальних тренувань

Параметр	***Значення***	***Параметр***	***Значення***
epoch	60	dfl	1.2
batch	4	pose	12.0
imgsz	702	dropout	0.0
optimizer	Adam	degrees	0.0
seed	42	flipud	0.0
lr0	1.0e-05	fliplr	0.0
lrf	0.2	mosaic	0.0
momentum	0.937	mixup	0.0
weight_decay	0.0005	cutmix	0.0
warmup_epochs	3.0	copy_paste	0.0
box	0.03	auto_augment	null
cls	0.7		

У таблиці 4 наведені параметри аугментації, що змінювалися: для кожного тренування один параметр набував вказаного значення, а інші дорівнювали нулю. Це дозволяло оцінити ізольований вплив колірних (hsv_h, hsv_s, hsv_v), геометричних (translate, scale, shear, perspective) та просторово-локальних (erasing) аугментацій. Ці значення підібрано для симуляції варіативності морського середовища (освітлення, позиції суден, оклюзії) без спотворення ключових ознак, сприяючи підвищенню стійкості моделі до реальних умов зйомки.

Таблиця 4 – Перелік параметрів які змінювалися для кожного тренування

Параметр	***Англійський відповідник***	***Значення***
Регулювання відтінку	hsv_h	0.005
Регулювання насиченості	hsv_s	0.5
Регулювання яскравості	hsv_v	0.7
Регулювання зсуву	translate	0.3
Регулювання масштабування	scale	0.5
Зсув по осі	shear	10.0
Перспективне викривлення	perspective	0.05
Випадкове стирання	erasing	0.4

Основні результати та їх обговорення. У дослідженні для реалізації процесу аугментації використано бібліотеку Albumentations, яка є високопродуктивним інструментом для обробки зображень у Python та забезпечує широкий спектр різних трансформацій. Такі аугментації, як розмиття (Blur, MedianBlur), перетворення до відтінків сірого (ToGray), а також локальне вирівнювання гістограми (CLAHE**)**, були застосовані автоматично на завершальному етапі обробки зображень. Ймовірність застосування кожного з цих перетворень становила 1%. Застосування цих трансформацій не було явно задане у конфігураційних параметрах експерименту, оскільки вони активуються автоматично, як частина внутрішньої логіки системи Ultralytics YOLO. За замовчуванням під час тренування активується певний перелік слабких аугментацій з метою підвищення варіативності навчального набору. У цьому дослідженні основний акцент був зроблений на контролі параметрів геометричної та колірної аугментації, які задавалися вручну, тоді як автоматично

додані перетворення не розглядалися як ключові чинники впливу. Результати дослідження наведені в таблиці 5:

Таблиця 5 – Порівняння різних технік аугментації

Параметр	*Початкові параметри моделі*	*Тренування моделі без додаткової аугментації*	*Регулювання відтінку*	*Регулювання насиченості*	*Регулювання яскравості*	*Регулювання зсуву*	*Регулювання масштабування*	*Регулювання зсуву по осі*	*Регулювання перспективного викривлення*	*Регулювання випадкового стирання*
epoch	25	19	31	36	12	44	57	52	47	19
train/box_loss	0.0045	0.00192	0.00157	0.00147	0.00241	0.0022	0.00249	0.00309	0.00875	0.00192
train/cls_loss	0.69631	0.53541	0.45063	0.42623	0.77714	0.65095	0.71796	0.68118	5.74881	0.53541
train/dfl_loss	0.93709	0.67876	0.65252	0.64642	0.72514	0.7162	0.73957	0.8066	1.96891	0.67876
precision	0.3964	0.66866	0.65382	0.6307	0.64021	0.70257	0.6617	0.66745	0.28919	0.66866
recall	0.41739	0.52828	0.5677	0.56586	0.57797	0.5388	0.60364	0.54362	0.12445	0.52828
mAP50	0.37135	0.61229	0.61404	0.60985	0.61082	0.63799	0.64649	0.60522	0.1013	0.61229
mAP50-95	0.30399	0.4918	0.49507	0.48686	0.49069	0.51033	0.52609	0.40495	0.03576	0.4918
val/box_loss	0.00585	0.00335	0.00339	0.00344	0.00337	0.00326	0.0031	0.00521	0.00874	0.00335
val/cls_loss	2.1155	1.87315	1.91049	1.90416	1.82186	2028194	1.65527	2.06874	4.46031	1.87315
val/dfl_loss	1.12038	0.83368	0.87164	0.88611	0.83792	0.83175	0.80121	1.022	1.77471	0.83368

Для оцінки якості моделі були використані метрики mean Average Precision (mAP) при різних порогах перекриття (IoU – Intersection over Union), а саме mAP50 та mAP50-95, що є загальноприйнятими показниками у задачах розпізнавання об'єктів. Порівняння отриманих результатів показало, що базове тренування без додаткових аугментацій забезпечило mAP50 = 0.61229 та mAP50-95 = 0.4918, що стало орієнтиром для оцінки впливу інших методів. Регулювання відтінку, насиченості та яскравості дало близькі значення, де mAP50 перебував у межах 0.60985–0.61404, а mAP50-95 – 0.48686–0.49507, що свідчить про помірний позитивний ефект кольорових трансформацій. Найкращі результати отримано під час застосування геометричних аугментацій: зсув забезпечив mAP50 = 0.63799, тоді як масштабування дало максимальне значення mAP50 = 0.64649 та mAP50-95 = 0.52609. Навпаки, перспективне викривлення призвело до різкого погіршення показників – mAP50 знизився до 0.1013, а precision впав до 0.28919, що свідчить про несумісність або занадто велике значення цього параметру для задач визначення ракурсу судна. Випадкове стирання показало mAP50 на рівні 0.61229, що дозволяє використання даного виду аугментації для розглянутих задач. Таким чином, найбільш продуктивними виявилися трансформації, які імітують природні зміни положення судна в кадрі та кольорові аугментації, тоді як методи, що порушують геометрію сцени, не можуть бути рекомендовані для застосування. Варто зазначити, що при тренуванні моделей штучного зору рекомендовано використовувати комбінації різних видів аугментації, тому найбільшу ефективність варто очікувати шляхом комбінування прийнятних технік аугментації.

Висновки. Аугментація даних є потужним інструментом для покращення навчання моделей комп'ютерного зору та підвищення їх стійкості до варіативності даних. Однак її застосування слід ретельно адаптувати до конкретного завдання. Аналіз різних видів аугментацій, з акцентом на морські умови, показав, що колірні (регулювання відтінку, насиченості, яскравості), геометричні (зсув, масштабування, зсув по осі, перспективне викривлення) та просторово-локальні (випадкове стирання) трансформації впливають на

ефективність моделі по-різному. Результати тренування моделі YOLOv8n без аугментацій (mAP50 = 0.61229, mAP50-95 = 0.4918, precision = 0.66866, recall = 0.52828) порівняно з тренуваннями отриманими шляхом використання аугментації продемонстрували, що колірні трансформації дають помірне покращення: регулювання відтінку підвищує mAP50 до 0.61404 та mAP50-95 до 0.49507; регулювання насиченості – mAP50 до 0.60985 та mAP50-95 до 0.48686; регулювання яскравості – mAP50 до 0.61082 та mAP50-95 до 0.49069. Найкращі результати забезпечують геометричні трансформації, такі як зсув (mAP50 = 0.63799, mAP50-95 = 0.51033, precision = 0.70257, recall = 0.5388) та масштабування (mAP50 = 0.64649, mAP50-95 = 0.52609, precision = 0.6617, recall = 0.60364), що підвищують стійкість моделі до варіативних умов зйомки без спотворення просторових ознак. Навпаки, перспективне викривлення погіршує показники якості (mAP50 = 0.1013, mAP50-95 = 0.03576, precision = 0.28919, recall = 0.12445), а випадкове стирання та зсув по осі дають нейтральний або помірний ефект (mAP50 = 0.61229 та 0.60522 відповідно). Таким чином, найбільш доцільними трансформаціями є колірні аугментації та геометричні (зсув, масштабування), які зберігають фізичний сенс сцени та уникають нереалістичних спотворень.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження в цій галузі можуть бути спрямовані на розробку та впровадження комплексних систем автономного судноводіння, де інтеграція моделі комп'ютерного зору для визначення ракурсу суден стане одним з компонентів. Зокрема, планується технічна реалізація системи, що передбачає не лише теоретичне моделювання, але й підбір відповідних, актуальних станом на зараз, складових частин. Крім того, отримані в ході дослідження дані можуть бути активно використані при навчаннях моделей штучного зору, призначених для роботи в морському середовищі, що має свої особливості.

У довгостроковій перспективі, такі розробки матимуть потенціал при впровадженні систем штучного зору в морській галузі, сприяючи підвищенню безпеки навігації та ефективності автономних суден.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Jiao L., Zhang F., Liu F., Yang S., Li L. & Feng Z. A survey of deep learning-based object detection. *IEEE Access, 7,* 128837–128868. 2019. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939201.

2. Yang D., Solihin M. I., Ardiyanto I., Zhao Y., Li W., Cai B. & Chen C. A streamlined approach for intelligent ship object detection using EL-YOLO algorithm. Scientific Reports, 14, 15254. 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64225-y.

3. Langenkämper D., van Kevelaer R. & Nattkemper T. W. Strategies for Tackling the Class Imbalance Problem in Marine Image Classification. In Z. Zhang, D. Suter, Y. Tian, A. Branzan Albu, N. Sidère, & H. J. Escalante (Eds.), Pattern Recognition and Information Forensics: ICPR International Workshops and Challenges (pp. 26–36). 2019. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05792-3_3.

4. McGuinness K. & O'Gara S. Comparing data augmentation strategies for deep image classification. In J. Courtney, C. Deegan, & P. Leamy (Eds.), IMVIP 2019 Irish Machine Vision & Image Processing Conference proceedings. Irish Pattern Recognition & Classification Society. https://doras.dcu.ie/23666/.

5. Wang H., Deng Z., Jiang C., Ren J. & Zhang S. A review of deep learning techniques for maritime object detection from optical remote sensing images. Sensors, 22(14), 5383. 2022. https://doi.org/10.3390/s22145383.

6. Li Y., Zhang X., Zhang Y., Wang R. & Li J. YOLO-SEA: An enhanced detection framework for multi-scale maritime targets in complex sea states and adverse weather. *Sensors, 24(1),* 243. 2024. https://doi.org/10.3390/e27070667.

7. Wang Z., Wang P., Liu K., Wang P., Fu Y., Lu C. T., Aggarwal C. C., Pei J. & Zhou Y. A comprehensive survey on data augmentation. 2024. arXiv preprint arXiv:2405.09591.

8. Shorten C. & Khoshgoftaar T. M. A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data, 6*(1), 60. 2021. https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0.

9. Xu M., Yoon S., Fuentes A. & Park D. S. A comprehensive survey of image augmentation techniques for deep learning. *Pattern Recognition, 137*, 109347. 2023. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2023.109347.

10. Tan M., Langenkämper D. & Nattkemper T. W. The impact of data augmentations on deep learning-based marine object classification in benthic image transects. *Sensors, 22*(14), 5383. 2022. https://doi.org/10.3390/s22145383.

11. Cauli N. & Reforgiato Recupero D. Survey on videos data augmentation for deep learning models. *Future Internet, 14*(3), 93. 2022. https://doi.org/10.3390/fi14030093.

12. Пашенко О. Л., Піпченко О. Д. Розробка моделі штучного зору на базі алгоритму YOLO для визначення ракурсу судна. *Судноводіння (Shipping & Navigation)*. 2025. Вип. 38.

13. Cauli N. & Reforgiato Recupero D. *Survey on Videos Data Augmentation for Deep Learning Models*. *Future Internet*, 14(3), 93. 2022. https://doi.org/10.3390/fi14030093.

14. Mumuni A. & Mumuni F. Data augmentation: A comprehensive survey of modern approaches. Array, 16, 100258. 2022. https://doi.org/10.1016/j.array.2022.100258.

15. Kumar T., Brennan R., Mileo A. & Bendechache M. Image Data Augmentation Approaches: A Comprehensive Survey and Future Directions. IEEE Access, 12, 187536-187571. 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.02830.

REFERENCES

1. Jiao, L., Zhang, F., Liu, F., Yang, S., Li, L., & Feng, Z. (2019). A survey of deep learning-based object detection. *IEEE Access, 7*, 128837–128868. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939201.

2. Yang, D., Solihin, M. I., Ardiyanto, I., Zhao, Y., Li, W., Cai, B., & Chen, C. (2024). A streamlined approach for intelligent ship object detection using EL-YOLO algorithm. Scientific Reports, 14, 15254. https://doi.org/10.1038/s41598-024-64225-y.

3. Langenkämper, D., van Kevelaer, R., & Nattkemper, T. W. (2019). Strategies for Tackling the Class Imbalance Problem in Marine Image Classification. In Z. Zhang, D. Suter, Y. Tian, A. Branzan Albu, N. Sidère, & H. J. Escalante (Eds.), Pattern Recognition and Information Forensics: ICPR International Workshops and Challenges (pp. 26–36). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-05792-3_3.

4. McGuinness, K., & O'Gara, S. (2019). Comparing data augmentation strategies for deep image classification. In J. Courtney, C. Deegan, & P. Leamy (Eds.), IMVIP 2019 Irish Machine Vision & Image Processing Conference proceedings. Irish Pattern Recognition & Classification Society. https://doras.dcu.ie/23666/.

5. Wang, H., Deng, Z., Jiang, C., Ren, J., & Zhang, S. (2022). A review of deep learning techniques for maritime object detection from optical remote sensing images. Sensors, 22(14), 5383. https://doi.org/10.3390/s22145383.

6. Li, Y., Zhang, X., Zhang, Y., Wang, R., & Li, J. (2024). YOLO-SEA: An enhanced detection framework for multi-scale maritime targets in complex sea states and adverse weather. *Sensors, 24(1)*, 243. https://doi.org/10.3390/s24010243.

7. Wang, Z., Wang, P., Liu, K., Wang, P., Fu, Y., Lu, C. T., Aggarwal, C. C., Pei, J., & Zhou, Y. (2024). A comprehensive survey on data augmentation. arXiv preprint arXiv:2405.09591.

8. Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2021). A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data, 6*(1), 60. https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0.

9. Xu, M., Yoon, S., Fuentes, A., & Park, D. S. (2023). A comprehensive survey of image augmentation techniques for deep learning. *Pattern Recognition, 137*, 109347. https://doi.org/10.1016/j.patcog.2023.109347.

10. Tan, M., Langenkämper, D., & Nattkemper, T. W. (2022). The impact of data augmentations on deep learning-based marine object classification in benthic image transects. *Sensors, 22*(14), 5383. https://doi.org/10.3390/s22145383.

11. Cauli, N., & Reforgiato Recupero, D. (2022). Survey on videos data augmentation for deep learning models. *Future Internet, 14*(3), 93. https://doi.org/10.3390/fi14030093.

12. Pashenko O. L., Pipchenko O. D. (2025). *Rozrobka modeli shtuchnoho zoru na bazi alhorytmu YOLO dlia vyznachennia rakursu sudna*. Sudnovodinnia (Shipping & Navigation). 38.

13. Cauli, N., & Reforgiato Recupero, D. (2022). *Survey on Videos Data Augmentation for Deep Learning Models*. *Future Internet*, 14(3), 93. https://doi.org/10.3390/fi14030093.

14. Mumuni, A., & Mumuni, F. (2022). Data augmentation: A comprehensive survey of modern approaches. Array, 16, 100258. https://doi.org/10.1016/j.array.2022.100258.

15. Kumar, T., Brennan, R., Mileo, A., & Bendechache, M. (2024). Image Data Augmentation Approaches: A Comprehensive Survey and Future Directions. IEEE Access, 12, 187536-187571. https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.02830.

Pashenko O. L. IMPACT OF DATA AUGMENTATION ON TRAINING COMPUTER VISION MODEL FOR SHIPS' ASPECT ANGLE DETECTION

Abstract. The study investigates the impact of targeted data augmentation strategies on the performance of a deep learning-based computer vision model designed to determine a ships' aspect angle in maritime scenes. The work addresses the challenge posed by limited and highly imbalanced datasets that are typical for maritime imaging, where variations in illumination, weather, and occlusion significantly affect recognition accuracy. The aim of the research is to evaluate which augmentation techniques contribute to improved robustness of YOLOv8n-based orientation classification without distorting the physical characteristics of marine scenes. The methodology combines controlled experiments with color, geometric and spatially local augmentation, applied to an extended dataset containing both annotated examples and negative samples. The scientific novelty lies in identifying the augmentation techniques that deliver the highest computer vision model performance according to the key metrics mAP50, mAP50-95, precision, and recall, while ensuring that these techniques enhance the performance of a model specifically designed for operation in maritime environments. The results demonstrate that color and geometry-preserving augmentations, such as translation and scaling, yield measurable improvements, while perspective distortions severely degrade performance due to the violation of spatial realism. The obtained results have practical significance for autonomous navigation systems, contributing to improved recognition accuracy under real operatinal conditions. The conclusions highlight that augmentation strategies must be carefully selected for tasks involving orientation-sensitive objects.

Key words: *data augmentation; computer vision; ship aspect angle; YOLOv8n; geometric augmentation; color augmentation; spatial-local augmentation; deep learning; object detection.*

© Пашенко О. Л.

Статтю прийнято до редакції 04.12.2025

УДК 656.6

ОЦІНКА ТА ПІДТРИМКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Передерій В. І., *д.т.н., професор, професор кафедри комп'ютерних технологій і інформаційної безпеки Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: viperkms1@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9241-3034;*

Борчик Є. Ю., *к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедри вищої та прикладної математики Миколаївського національний аграрний університет, м. Миколаїв, Україна, e-mail: borchikeu@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0188-1471.*

Стаття присвячена питанням розробки методів і засобів інформаційної технології оцінки та підтримки функціональної стійкості засобу водного транспорту для забезпечення відмовостійкості та живучості засобу на базі взаємодії комплексу показників безпеки і показників людського чинника в управлінні та прийнятті рішень на кожному її ієрархічному рівні. Проведено аналіз досліджень у галузі розробки методів і засобів та їх практичного застосування в забезпеченні стійкості засобів водного транспорту. Виявлено, що на поточний момент часу перспективним напрямом наукових досліджень є необхідність у створенні методів, засобів та інформаційних технологій оцінки, контролю та підтримки як технічного і безпекового стану засобу водного транспорту, так і інформаційно-когнітивних параметрів людського фактора у реальному часі. Доведено, що важливим аспектом успішного застосування зазначених методів є не лише їх використання в адаптованих СППР для прийняття релевантних рішень з безпеки, а й розвиток теорії функціональної стійкості, яка має ґрунтуватись на сучасних принципах гібридного інтелекту – симбіотичної інтеграції функціональностей штучного та природного інтелектів. Розроблено інформаційно-логічну модель та проведено експертну оцінку за ступенем важливості комплексу показників стабільності і безпеки, що характеризують відмовостійкість і живучість, та визначено показники інформаційно-когнітивних параметрів людського фактора, які впливають на функціональну стійкість засобу водного транспорту. Залежно від стану зазначених показників побудовано нечітку байєсовську мережу довіри, за допомогою якої на підставі знань експертів проведено комплексну оцінку ймовірності станів функціональної стійкості засобу водного транспорту. Здійснено практичну реалізацію запропонованого методу, отримані результати підтвердили практичну цінність, яка може бути використана для оцінки та забезпечення комплексної функціональної стійкості засобу. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методів та засобів адаптивної інформаційної технології, яка повинна мати властивість переналаштування параметрів і здійснювати «пристосування» до зміни внутрішніх і зовнішніх умов роботи, що забезпечить функціональну стійкість засобу водного транспорту.

Ключові слова: *інформаційні технології; системи підтримки прийняття рішень; функціональна стійкість; засоби водного транспорту; інформаційно-когнітивні параметри; гібридний інтелект; інформаційно-логічна модель; математична модель; людський фактор.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.064-076

Вступ. Дослідження статистичних даних [1–3] показали, що основною причиною аварій при управлінні засобами водного транспорту є такі як людський фактор, поломки, пошкодження, відмова двигунів і суднового устаткування, а також прийняття нерелевантного рішення по управлінню судном. Особливо вразливими є системи вантажного судна де значною причиною аварій є також зовнішні чинники, які впливають на системи автоматики судна, енергетичні установки, автоматизацію судна, що проявляється в погіршенні параметрів технічних установок за якісними показниками та експлуатаційними характеристиками в цілому. Всі ці чинники впливають на функціональну стійкість засобів водного транспорту.

Властивість функціональної стійкості в цілому розглядається як можливість складної технічної системи успішно завершати поставлене завдання при регламентованому числі змін у стані самої системи, тобто зберігати її працездатність після прояву припустимого числа відмов і зовнішніх дестабілізуючих впливів. До такої складної технічної системи можна віднести і системи засобів водного транспорту відповідної категорії критичності [4].

Оскільки теорія функціональної стійкості перебуває в стадії розвитку, формування та оцінка її основних показників є важливим напрямом наукових досліджень. Отже, можна зробити висновок, що ідея забезпечення властивості функціональної стійкості засобу водного транспорту є актуальною, оскільки існуюча теорія не розглядає такий вид взаємовпливу дестабілізуючих чинників.

Постановка проблеми. На сьогодні в наукових дослідженнях наводяться обставини і фактори, що створюють умови і передумови для виникнення помилок у рішеннях і діях судноводіїв, які можуть привести до небезпечної ситуації або аварії. Тому зусилля Міжнародної морської організації (ІМО) [4–6] стали потужним стимулом до досліджень, які стосуються питань ролі «людського фактора», процесу ризикових умов стану функціонування технічних та технологічних засобів, стану інформаційної і кібербезпеки, які мають значний вплив на функціональну стійкість засобу водного транспорту.

Але все це не дає можливість описати з максимальною точністю взаємозалежність *НЕ*-факторів впливу, для яких немає відомих точних закономірностей, у нечітких умовах та ризику, що вимагає розробки нового інструментарію забезпечення стійкості функціонування при управлінні засобами водного транспорту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У наукових роботах [7–9] запропоновані методи, які дають можливість визначати сумарний ризик та величину збитків у результаті сумарної дії множини факторів загроз на об’єктах критичної інфраструктури (ОКІ). Зазначено також, що процес визначення та оцінки ризику від помилкових прийнять рішень під впливом цих загроз є основою та підґрунтям для наукових досліджень в області аналізу та удосконалення наявних, а також винаходу нових методів оцінки ризику, підвищення точності його оцінки, здійснення над ризиками математичних операцій.

У наукових дослідженнях [10, 11] розглянуті питання створення інформаційної технології визначення, оцінки і корекції функціональної стійкості особи, що приймає рішення (ОПР) для процесу прийняття релевантних рішень у складних людино-машинних системах критичного призначення. Виділені основні найбільш негативно вразливі фактори на функціональну стійкість ОКІ в критичних ситуаціях.

У роботі [12] досліджено широкий спектр загроз, які призводять до ризику функціонування ОКІ, створено базу даних фактичних втрат у випадку реалізації цих загроз, здійснено аналіз втрат з використанням методів статистики та актуарної математики.

У роботах [13, 14] наведені проблеми про ризики, пов'язані з інформаційними та когнітивними аспектами взаємодії людини з машиною. Зазначено необхідність враховувати ризики у непередбачуваних умовах та особливі вимоги до психофізіологічного стану людини-оператора. Запропонована кількісна оцінка надійності людини, яка базується на загальному імовірнісному аналізі безпеки. Але не досліджувались моделі та методи оперативної оцінки емоціонально-когнітивного стану людини-оператора при формуванні адаптованих альтернатив прийняття рішень у критичних ситуаціях при управлінні ОКІ.

У дослідженнях [15–17] зазначено: основні джерела факторів безпеки, які значно відрізняються від інших категорій ризиків, якими є людська поведінка. Наведено процес визначення ризиків від помилкових прийнять рішень ОПР під впливом загроз. Але не досліджено моделі та методи оцінки залежності функціональної стійкості від впливу *НЕ*-факторів інформаційної і кібербезпеки та технічного стану ОКІ в цілому.

У роботах [18–20] запропоновані методи, які дають можливість визначати сумарну величину збитків у результаті дії факторів загроз за певний період часу. Зазначено також, що процес визначення та оцінки ризику від помилкових прийнять рішень під впливом факторів загроз є основою та підґрунтям для наукових досліджень в області аналізу та удосконалення наявних, а також винаходу нових методів оцінки ризику, підвищення точності його оцінки. Рекомендовано у процесі функціонування ОКІ враховувати ризики нерелевантного прийняття рішень ОПР, що виникають у непередбачуваних умовах, а також особливі вимоги до емоційно-когнітивного стану людини та допуску її до виконання особливо відповідальної

роботи. Відзначено також, що інформаційні та когнітивні аспекти інженерії людського фактора відіграють ключову роль у безпеці, надійності та ефективності управління ОКІ.

За підсумками проведеного аналізу літературних джерел [1–20] із проблеми, що досліджується, можна зробити висновок про відсутність ефективних методів забезпечення взаємної адаптації і корекції адекватного впливу дестабілізуючих *НЕ*-факторів загроз та оптимального розподілу функцій між технічними засобами та ОПР з урахуванням його психофізіологічних та когнітивних можливостей для забезпечення функціональної стійкості ОКІ. Однак розв'язання цієї проблеми виходить за рамки можливостей традиційних методів та засобів вирішення цих питань. Для цього істотну роль необхідно приділяти аспекту, який має ґрунтуватися на сучасних принципах гібридного інтелекту – симбіотичної інтеграції функціональностей штучного (комп'ютера) та природного (людини) інтелектів.

Таким чином, створення методів інформаційної технології оцінки та забезпечення функціональної стійкості, та їх подальше практичне використання при управлінні засобами водного транспорту, являє собою актуальну науково-практичну задачу сьогодення, і є предметом даного дослідження.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка методу інформаційної технології оцінки та підтримки функціональної стійкості засобів водного транспорту відповідної категорії критичності, який доповнює теорію та технології вирішення питань забезпечення відмовостійкості та живучості засобу на базі взаємодії комплексу показників безпеки і показників людського чинника в управлінні та прийнятті рішень на кожному її ієрархічному рівні.

Досягнення поставленої мети дослідження передбачає: розробку методу, який повинен мати властивість здійснювати «пристосування» до зміни внутрішніх і зовнішніх умов роботи, що забезпечить функціональну стійкість засобу. Для цього необхідно вирішення наступних задач:

1. Розробити інформаційно-логічну модель оцінки та підтримки функціональної стійкості засобу водного транспорту в режимі реального часу.

2. Розробити математичну модель оцінки та підтримки функціональної стійкості засобу водного транспорту з застосуванням методів м'яких обчислень.

3. Провести експеримент доцільності запропонованого методу для оцінки і підтримки функціональної стійкості засобу водного транспорту.

Виклад основного матеріалу. На основі проведеного аналізу [18–20] побудовано інформаційно-логічну модель ІТ оцінки стану показників функціональної стійкості засобу водного транспорту залежно від впливу основних дестабілізуючих *НЕ*-факторів у режимі реального часу (рис. 1).

Фактори гідрометеорологічного впливу $Sext = f_1(IV, NI, Ssea, CC, Svl)$: IV – низька видимість; NI – інтенсивність шуму; Ssea – стан моря; CC – кліматичні умови; Svl – вітрове навантаження.

Показники впливу людського фактора на процес прийняття релевантних рішень, пов'язаних з гідрометеорологічним впливом $Sw = f_1(EA, SE, F, ET)$: ET – емоційна напруженість; F – фізична та емоційна втома; SE – стрес через емоційну напруженість; EA – емоційне збудження.

Фактори, пов'язані з поточним емоційно-когнітивним станом ОПР $Sp = f_2(PR, PI, RT, DT, C)$: PR – продуктивність; PI – сприйняття інформації; RT – час реакції; DT – час на прийняття рішень; C – зосередженість.

Основні фактори інформаційної безпеки $IStl = f_1(DC, AD, DP, DI)$: DC – узгодженість даних; AD – доступність даних; DP – конфіденційність даних, DI – цілісність даних.

Технічний стан основних суднових установок $Tshipins = f_1(Csnav, Csau, Cpov)$: Csnav – стан суднових навігаційних приладів; Csau – стан системи автоматики судна; Cpov – стан енергетичних установок; Cstat – стан суднового зв'язку.

Особливістю зазначених факторів є неможливість їх безпосереднього виміру і запису в числовому виді. Для цього існують різні тести для оцінки, однак вони вимагають затрат часу і можуть представляти результат з деякою мірою невизначеності.

Рисунок 1 – Інформаційно – логічна модель оцінки функціональної стійкості засобу водного транспорту

Для рішення вказаних проблемних питань та кількісної оцінки оперативного стану функціональної стійкості засобу водного транспорту пропонується застосування ймовірнісного математичного апарату з використанням Байєсовської мережі довіри (БМД) [21].

БМД – це ймовірнісна графічна модель, що задається випадковими величинами та їх умовними ймовірностями за допомогою ациклічного орієнтованого графа.

Для будь-якої множини випадкових величин (вершин) $A_1, A_2, ..., A_n$ Байєсовської мережі довіри ймовірність спільного розподілу обчислюється за умовними ймовірностями за ланцюговим правилом:

$$P(A_1, ..., A_n) = \prod_{i=1}^{n} P(A_i \mid Parents(A_i)). \quad (1)$$

Для обчислення ймовірності того, що змінна B набуває значення b_j на БМД, що складається із вершин $B, A_1, ..., A_n$ використовується формула

$$P(B = b_j) = \sum_{A_1, ..., A_n} P(B = b_j, A_1, A_2, ..., A_n), \quad (2)$$

де підсумовування проводиться за всіма значеннями змінних $A_1, A_2 ..., A_n$. З урахуванням (1) формула (2) для обчислення ймовірності у вершині B набуває вигляду:

$$P(B = b_j) = \sum_{A_1, ..., A_n} P(B = b_j \mid Parents(B)) \times \prod_{i=1}^{n} P(A_i \mid Parents(A_i)). \quad (3)$$

Цих формул достатньо для здійснення прямого виведення на Байєсівській мережі, тобто визначення ймовірності значень вершини – листка за відомими ймовірностями значень вхідних (кореневих) вершин та умовними ймовірностями значень інших вершин БМД.

На підставі інформаційно-логічної моделі оцінки функціональної стійкості засобу водного транспорту побудовано Байєсовську мережу довіри (рис. 2).

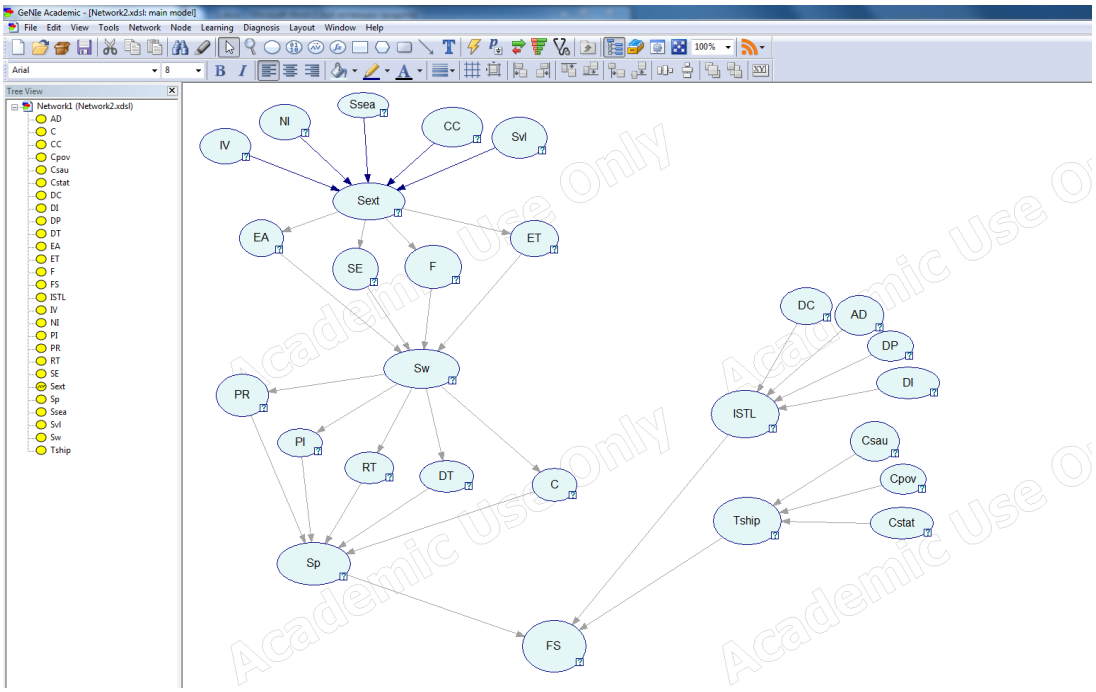


Рисунок 2 – Байєсовська мережа довіри оцінки
функціональної стійкості засобу водного транспорту

Вважається, що всі вершини запропонованої Байєсовської мережі окрім FS приймають лише два значення: "норма", "не норма". Вершина FS приймає значення "функціонально стійкий", "функціонально не стійкий".

Оскільки значення безумовних та умовних ймовірностей вершин БМД встановлюються за підсумками результатів експертного опитування, то всі вони визначаються нечітко. Тому в Байєсовську мережу (рис. 2) вводиться нечіткість шляхом заміни ймовірностей станів нечіткими числами, а звичайних арифметичних операцій над дійсними числами розширеними операціями над нечіткими числами [19, 22].

Усі безумовні та умовні ймовірності Байєсовської мережі оцінюються нечіткими інтервалами $\tilde{N}(n_1, n_2, n_3, n_4)$, заданими на універсальній множині $\{x \mid 0 \le x \le 1\}$, де x – ймовірність станів вершин. При цьому функція приналежності цих інтервалів визначається формулою:

$$\mu_L(x) = \begin{cases} 0, & x < 0; \\ \dfrac{x - n_1}{n_2 - n_1}, & n_1 \le x \le n_2; \\ 1, & n_2 \le x \le n_3; \\ \dfrac{n_4 - x}{n_4 - n_3}, & n_3 < x \le n_4; \\ 0, & x > 1, \end{cases} \qquad (4)$$

де $n_1 \le n_2 \le n_3 \le n_4$ – деякі дійсні числа, в $0 \le n_2 \le n_3 \le 1$. Зокрема, якщо $0 \le n_1 \le n_2 \le n_3 \le n_4 \le 1$, то (4) задає трапецієподібне нечітке число.

При необхідності порівняння нечітких ймовірностей вважається, що з двох нечітких ймовірностей більше та дефазифікаційне значення якої більше. В якості методу дефазифікації використовується метод центру максимумів. Цей метод для нечітких чисел $\tilde{N}(n_1, n_2, n_3, n_4)$ з функцією приналежності (4) дає

$$N = \frac{\int_{n_2}^{n_3} x dx}{\int_{n_2}^{n_3} dx} = \frac{n_2 + n_3}{2}. \quad (5)$$

При обчисленні нечітких ймовірностей $\tilde{P}_f$ у вершинах Байєсовської мережі формули (1), (3) приймають вигляд:

$$\tilde{P}_f(A_1,...,A_n) \cong \tilde{\otimes}_{i=1}^{n} \tilde{P}_f \left| \, Parents(A_i); \right. \quad (6)$$

$$\tilde{P}_f(B = b_j) \cong \tilde{\oplus}_{A_1,...,A_n} \tilde{P}_f(B = b_j \left| \, Parents(B)) \tilde{\otimes} \left[\tilde{\otimes}_{i=1}^{n} \tilde{P}_f(A_i \right| Parents(A_i)) \right]. \quad (7)$$

Тут $\tilde{\otimes}_{i=1}^{n} A_i$ позначає множення нечітких чисел $A_1, \ldots, A_n$, $\tilde{\oplus}_{A_1,...,A_n}$ – нечітке додавання по всім значенням змінних $A_1, \ldots, A_n$.

Для простоти визначення експертами умовних ймовірностей вважається [20–22], що умовна ймовірність у будь-якій вершині залежить від значень батьківських для неї вершин окремо, а не від спільного розподілу значень цих вершин. Тоді, якщо серед вершин $A_1, ..., A_n$ батьківські є лише у вершини A_1 і цими вершинами є вершини $A_2, A_3, ..., A_n$, то останнє припущення дозволяє формулу (6) переписати у вигляді:

$$\tilde{P}_f(A_1,...,A_n) \cong \tilde{\otimes}_{i=2}^{n} \tilde{P}_f(A_i) \; \tilde{\otimes}_{j=2}^{n} \tilde{P}_f(A_1 \left| A_j \right.). \quad (8)$$

Для прикладу розглядається спрощена Байєсовська мережа (рис. 3).

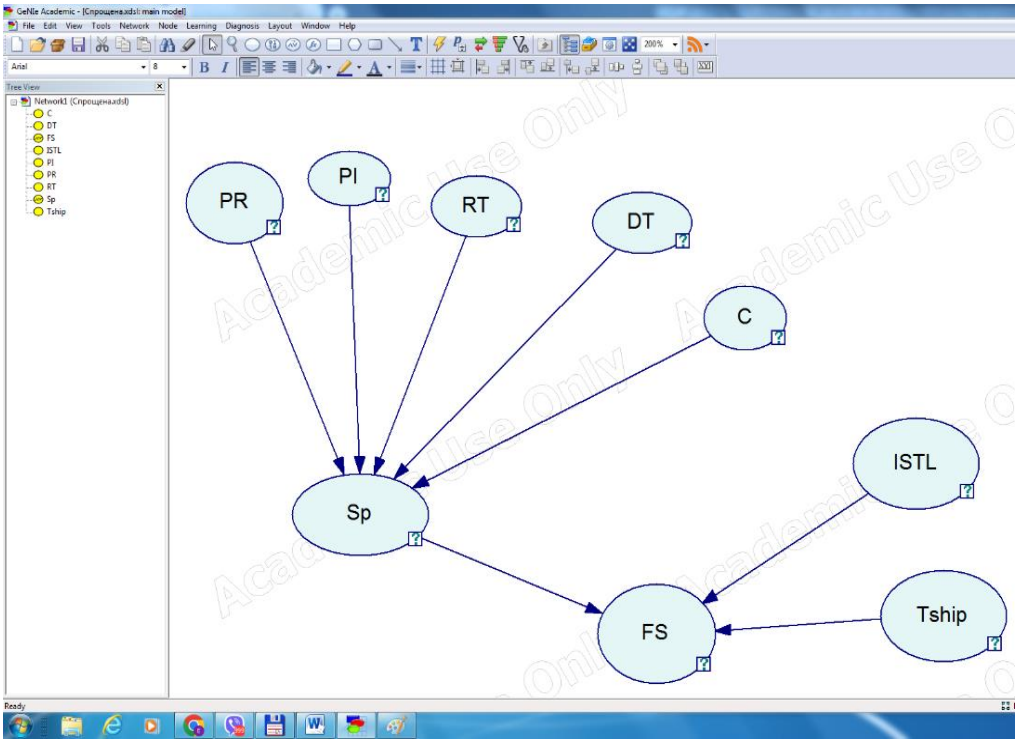


Рисунок 3 – Фрагмент нечіткої БМД

Процедура розрахунку значень ймовірностей Байєсовської мережі включає два етапи. У першому етапі за допомогою (6) – (8) обчислюється нечітка повна ймовірність вершини Sp, яка має п'ять батьківських вершин: PR, PI, RT, DT, C.

$$\tilde{P}_f(Sp=n) \cong \underset{PR,PI,RT,DT,C}{\tilde{\oplus}} \tilde{P}_f(n,PR,PI,RT,DT,C) =$$

$$= \underset{PR,PI,RT,DT,C}{\tilde{\oplus}} \tilde{P}_f(PR) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(PI) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(RT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(DT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(C) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 \mid PR,PI,RT,DT,C) =$$

$$= \underset{PR,PI,RT,DT,C}{\tilde{\oplus}} \tilde{P}_f(PR) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(PI) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(RT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(DT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(C) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 \mid PR) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 \mid PI) \tilde{\otimes} \quad (9)$$

$$\tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 \mid RT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 \mid DT) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(n_2 \mid C).$$

У другому етапі за допомогою (6) – (8) обчислюються нечіткі повні ймовірності вершини-листка FS:

$$\begin{aligned} &\tilde{P}_f(FS=yes) \cong \underset{Sp,ISTL,Tship}{\tilde{\oplus}} \tilde{P}_f(yes,Sp,ISTL,Tship) = \\ &= \underset{Sp,ISTL,Tship}{\tilde{\oplus}} \tilde{P}_f(Sp) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(ISTL) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(Tship) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(yes \mid Sp,ISTL,Tship) = \\ &= \underset{Sp,ISTL,Tship}{\tilde{\oplus}} \tilde{P}_f(Sp) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(ISTL) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(Tship) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(yes \mid Sp) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(yes \mid ISTL) \tilde{\otimes} \tilde{P}_f(yes \mid Tship) \end{aligned} \quad (10)$$

Експерименти. Для перевірки запропонованого методу були проведені числові експерименти, суть яких полягала в наступному.

Експертам-фахівцям було запропоновано провести оцінку умовних ймовірностей можливих станів вершин Sp та FS, які характеризують поточний емоційно-когнітивний стан ОПР та функціональну стійкість засобу водного транспорту відповідно. Результати представлені у вигляді нечітких значень безумовних ймовірностей у таблиці 1.

Згідно з формулами (9–10) у середовищі MATLAB було обчислено значення нечіткої ймовірності вузлів мережі, що розглядається. Використовуючи формулу (5), було обчислено дефазифікаційні значення цих ймовірностей. На основі значення дефазифікаційного значення ймовірності $P(FS = "функціонально\ стійкий")$, зроблено висновок про стан функціональної стійкості засобу водного транспорту.

Основні результати та їх обговорення. Числові розрахунки проводились для двох характерних випадків. У першому випадку безумовні ймовірності вершин PR, PI, RT, DT, C, які характеризують поточний емоційно-когнітивний стан ОПР; вершина STL, яка характеризує інформаційну безпеку засобу водного транспорту та вершина Tship, що характеризує технічний стан основних суднових установок приймають нечіткі трапецієвидні значення, представлені в таблиці 2. Як видно з формули (5) дефазифікаційні значення ймовірностей цих вершин однакові і дорівнюють 0.9 для стану вершин "норма" та 0.1 для стану вершин "не норма". Тобто, всі фактори, що впливають на функціональну стійкість засобу водного транспорту з великою ймовірністю знаходяться в стані "норма". У другому випадку безумовні ймовірності (таблиця 2) приймають ті ж самі значення, як у першому випадку, окрім вершини DT (час на прийняття рішень). При цьому $\widetilde{P_f}(DT =$ норма$) = (0.6;\ 0.7;\ 0.7;\ 0.8)$, а $\widetilde{P_f}(DT =$ не норма$) = (0.2;\ 0.3;\ 0.3;\ 0.4)$, а дефазифікаційні значення $P(DT =$ норма$) = 0.7$, а $P(DT =$ не норма$) = 0.3$. Як видно з результатів, помітно зменшилась тільки ймовірність того, що час на прийняття рішень ОПР є "норма".

Результати числових розрахунків наведено в таблицях 3 та 4.

У таблиці 1 через n позначено значення вершини "норма"; no – "не норма"; yes – "функціонально стійкий"; ns – "функціонально не стійкий".

Таблиця 1 – Результати оцінки нечітких умовних ймовірностей у вузлах Sp та FS

	Нечітке значення ймовірності			***Нечітке значення ймовірності***	
	Вершина Sp			**Вершина** Sp	
PR	$\tilde{P}_f(Sp = n \mid PR)$	$\tilde{P}_f(Sp = no \mid PR)$	*DT*	$\tilde{P}_f(Sp = n \mid DT)$	$\tilde{P}_f(Sp = no \mid DT)$
n	(1.0; 1.0; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.0; 0.0)	n	(1.0; 1.0; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.0; 0.0)
no	(0.7; 0.85; 0.95; 1.0)	(0.0; 0.05; 0.15; 0.3)	no	(0.5; 0.6; 0.6; 0.9)	(0.1; 0.4; 0.4; 0.5)
PI	$\tilde{P}_f(Sp = n \mid PI)$	$\tilde{P}_f(Sp = no \mid PI)$	C	$\tilde{P}_f(Sp = n \mid C)$	$\tilde{P}_f(Sp = no \mid C)$
n	(1.0; 1.0; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.0; 0.0)	n	(1.0; 1.0; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.0; 0.0)
no	(0.7; 0.8; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.2; 0.3)	no	(0.7; 0.8; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.2; 0.3)
PI	$\tilde{P}_f(Sp = n \mid RT)$	$\tilde{P}_f(Sp = no \mid RT)$			
n	(1.0; 1.0; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.0; 0.0)			
no	(0.7; 0.8; 0.8; 1.0)	(0.0; 0.2; 0.2; 0.3)			

Вершина *FS*		
Sp	$\tilde{P}_f(FS = yes \mid Sp)$	$\tilde{P}_f(FS = ns \mid Sp)$
n	(1.0; 1.0; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.0; 0.0)
no	(0.5; 0.6; 0.6; 1.0)	(0.0; 0.4; 0.4; 0.5)
ISTL	$\tilde{P}_f(FS = yes \mid ISTL)$	$\tilde{P}_f(FS = ns \mid ISTL)$
n	(1.0; 1.0; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.0; 0.0)
no	(0.6; 0.9; 0.9; 1.0)	(0.0; 0.1; 0.1; 0.4)
Tship	$\tilde{P}_f(FS = yes \mid Tship)$	$\tilde{P}_f(FS = ns \mid Tship)$
n	(1.0; 1.0; 1.0; 1.0)	(0.0; 0.0; 0.0; 0.0)
no	(0.6; 0.7; 0.9; 1.0)	(0.0; 0.1; 0.3; 0.4)

Таблиця 2 – Значення нечітких безумовних ймовірностей у кореневих вузлах БМД

Нечітке значення ймовірності у вершині					
	PR		PI		RT
n	(0.6; 0.9; 0.9; 1.0)	n	(0.8; 0.9; 0.9; 1.0)	n	(0.6; 0.9; 0.9; 1.0)
no	(0.0; 0.1; 0.1; 0.4)	no	(0.0; 0.1; 0.1; 0.2)	no	(0.0; 0.1; 0.1; 0.4)
	DT		C		ISTL
n	(0.8; 0.85; 0.95; 1.0)	n	(0.7; 0.8; 1.0; 1.0)	n	(0.4; 0.8; 1.0; 1.0)
no	(0.0; 0.15; 0.15; 0.2)	no	(0.0; 0.0; 0.2; 0.3)	no	(0.0; 0.0; 0.2; 0.6)
	Tship				
n	(0.7; 0.9; 0.9; 1.0)				
no	(0.0; 0.1; 0.1; 0.3)				

Таблиця 3 – Результати розрахунку ймовірностей у вузлах нечіткої БМД у першому випадку

Вершини	***Sp***	***FS***
Нечітке значення ймовірності	$\tilde{P}_f(Sp="норма") =$ (0.46;0.83;0.97; 1.12)	$\tilde{P}_f(FS="функціонально\ стійкий") =$ =(0.24; 0.86; 0.98; 1.45)
Дефазифікаційне значення ймовірності	$P(Sp="норма")=0.9$	$P(FS="функціонально\ стійкий") =$ 0.92

Таблиця 4 – Результати розрахунку ймовірностей у вузлах нечіткої БМД у другому випадку

Вершини	***Sp***	***FS***
Нечітке значення ймовірності	$\tilde{P}_f(Sp="норма") =$ = (0.11; 0.75; 0.87; 1.23)	$\tilde{P}_f(FS="функціонально\ стійкий") =$ = (-0.34; 0.81; 0.93; 1.87)
Дефазифікаційне значення ймовірності	$P(Sp="норма")=0.81$	$P(FS="функціонально\ стійкий")=0.87$

Як видно з таблиці 3, ймовірність того, що засіб водного транспорту є функціонально стійким $P(FS="функціонально\ стійкий")=0.92$.

Відповідно до Методики категоризації об'єктів критичної інфраструктури, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 09 жовтня 2020 року № 1109, для даної категорії критичності ОКІ (по умовах експериментів прийнята перша категорія критичності), критичним значенням ймовірності того, що засіб водного транспорту є функціонально стійким вважається величина не менше $P_{cr}=0.9$.

Оскільки, згідно з проведеним експериментом, розрахункова величина ймовірності $P(FS="функціонально\ стійкий")=0.92 > P_{cr}$, то в першому випадку засіб водного транспорту можна вважати функціонально стійким.

Результати розрахунку значень нечіткої ймовірності вузлів мережі у другому випадку представлені в таблиці 4, з якої видно, що величина $P(FS="функціонально\ стійкий")=0.87$, що менше ніж $P_{cr}=0.9$. Отже, у даному разі не можна вважати, що засіб водного транспорту є функціонально стійким.

Отримані результати числових розрахунків добре узгоджуються з практичними ситуаціями прийняття рішень з забезпечення стійкості критичних об'єктів, до яких можна віднести і засоби водного транспорту. У першому випадку поточний емоційно-когнітивний стан ОПР, інформаційна безпека та технічний стан основних суднових установок засобу з високою ймовірністю були в нормі. Функціональна стійкість засобу водного транспорту при таких умовах виявилась на достатньому рівні. У другому випадку дещо підвищилась ймовірність на час реакції прийняття рішень ОПР, що призвело до зниження функціональній стійкості до рівня, щоб вважати – судновий засіб є функціонально нестійким. У цьому випадку необхідне коригування стану негативного впливу відповідного фактору на ОПР відповідно до інженерно-психологічних рекомендацій та вимог.

Висновки. Визначено пріоритетні напрями наукових досліджень у напрямку розробки і впровадження методів і засобів інформаційної технології оцінки та підтримки стійкості засобів водного транспорту. У підсумку з'ясовано, що важливими аспектами успішного вирішення питань є забезпечення відмовостійкості та живучості засобу на базі взаємодії комплексу показників безпеки роботи та показників людського чинника, в управлінні і прийнятті рішень на кожному її ієрархічному рівні. Доведено, що важливим аспектом успішного застосування даного методу та розвиток теорії функціональної стійкості в цілому має ґрунтуватись на сучасних принципах гібридного інтелекту – симбіотичної інтеграції функціональностей штучного та природного інтелектів. Розроблено інформаційно-

логічну модель та проведено експертну оцінку за ступенем важливості комплексу показників стабільності і безпеки, визначено показники інформаційно-когнітивних параметрів людського фактора, які впливають на функціональну стійкість засобу водного транспорту. Побудовано нечітку Байєсовську мережу довіри, за допомогою якої на підставі знань експертів проведено комплексну оцінку ймовірності станів функціональної стійкості засобу. Здійснено практичну реалізацію запропонованого методу, отримані результати підтвердили практичну цінність, яка може бути використана як для оцінки та забезпечення комплексної функціональної стійкості, так і для побудови адаптованих СППР для прийняття релевантних рішень із забезпечення безпеки та стійкості засобу водного транспорту.

Перспективи подальших досліджень. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методів та засобів адаптивної інформаційної технології, яка повинна мати властивість переналаштування параметрів і здійснювати «пристосування» до зміни внутрішніх і зовнішніх умов роботи, що забезпечить функціональну стійкість засобу водного транспорту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. European Maritime Safety Agency. *Annual overview of marine casualties and incidents 2020*. https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/4266-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2020.html.
2. International Maritime Organization. *Maritime cyber risk management in safety management systems* (Resolution MSC.428(98)). 2017. https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428(98).pdf.
3. UK Marine Accident Investigation Branch. *Annual report: Marine accident recommendations and statistics*. 2022. https://www.gov.uk/government/publications/maib-annual-report-2022.
4. The White House. *Presidential Policy Directive 21: Critical infrastructure security and resilience*. 2013. https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2013/02/12/presidential-policy-directive-critical-infrastructure-security-and-resilience.
5. Allianz Global Corporate & Specialty. *Shipping safety review*. 2023. https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/reports/shipping-safety.html.
6. Aven T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundations. *European Journal of Operational Research, 253*(1), 1–13. 2016. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023.
7. Jain P., Pasman H., Waldram S., & Mannan M. S. Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 53*, 61–73. 2018. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.006.
8. Mokhor V., Bakalynskyi O., Bohdanov O., & Tsurkan V. Interpretation of the simple risk level dependence of its implementation in the terms of analytic geometry. *Information Technology and Security, 5*(1), 71–82. 2017. https://doi.org/10.20535/2411-1031.2017.5.1.120574.
9. Perederyi V., Borchik E., & Ohnieva O. Information technology for decision making support and monitoring in man–machine systems for managing complex technical objects of critical application. *Advances in Intelligent Systems and Computing, 1246*, 448–466. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-4_43.
10. Perederyi V., & Borchik E. Information technology for determination, assessment and correction of functional sustainability of the human operator in critical application systems. In *Theoretical and practical aspects of the development of modern science* (pp. 490–509). 2019. Baltija Publishing. https://doi.org/10.30525/978-9934-571-78-7_57.
11. Eling M., & Wirfs J. What are the actual costs of cyber risk events? *European Journal of Operational Research, 272*(3), 1109–1119. 2019. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.021.

12. Maritime Executive. *The importance of psychological safety precautions in maritime*. 2023. https://maritime-executive.com/blog/the-importance-of-psychological-safety-precautions-in-maritime.

13. Li P., Dai L., & Li X.-F. Study on operator's situation awareness reliability in digital NPPs. Part 1. *Annals of Nuclear Energy, 102*, 168–178. 2016. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.12.011.

14. Havlikova M., Jirgl M., & Bradac Z. Human reliability in man–machine systems. *Procedia Engineering, 100*, 1207–1214. 2015. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.485.

15. Pasko N., & Viunenko O. Modeling human–machine interaction in information processing and management systems. *European Science, sge17-02*, 6–52. 2023. https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-17-02-027.

16. Alali M., Almogren A., Mehedi H., et al. Improving risk assessment model of cyber security using fuzzy logic inference system. *Computers & Security, 74*, 323–339. 2018. https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.09.011.

17. Mygal G., & Mygal V. Interdisciplinary approach to the human factor problem. *Municipal Economy of Cities, 3*, 149–157. 2020. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-149-157.

18. Perederyi V., Borchik E., Zosimov V., & Bulgakova O. Evaluation of the influence of environmental factors and cognitive parameters on decision-making in human–machine systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control, 1*, 77–84. 2024. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-7.

19. Perederyi V., Borchik E., Lytvynenko V., & Ohnieva O. Information technology for performance assessment of complex multilevel systems. *CEUR Workshop Proceedings, 2805*, 175–188. 2020. http://ceur-ws.org/Vol-2805/.

20. Perederyi V., Borchik E., Wójcik W. & Ohnieva O. Assessment and information security provision of the decision support process. 2021. *CEUR Workshop Proceedings, 3101*, 322–334. http://ceur-ws.org/Vol-3101/.

21. Murphy K. P. *A brief introduction to graphical models and Bayesian networks* (Technical Report 2001-5-10). University of British Columbia. 2001. https://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Bayes/bnintro.pdf.

22. Parasyuk I. N., & Verevka O. V. Mathematical foundations of probabilistic estimation in fuzzy Bayesian belief networks. *Cybernetics and System Analysis, 52*(2), 62–67. 2016. https://doi.org/10.1007/s10559-016-9816-3.

REFERENCES

1. European Maritime Safety Agency (2020). *Annual overview of marine casualties and incidents 2020*. https://emsa.europa.eu/publications/reports/item/4266-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2020.html

2. International Maritime Organization (2017). *Maritime cyber risk management in safety management systems* (Resolution MSC.428(98)). https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Security/Documents/Resolution%20MSC.428(98).pdf.

3. UK Marine Accident Investigation Branch (2022). *Annual report: Marine accident recommendations and statistics*. https://www.gov.uk/government/publications/maib-annual-report-2022

4. The White House (2013). *Presidential Policy Directive 21: Critical infrastructure security and resilience*. https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2013/02/12/presidential-policy-directive-critical-infrastructure-security-and-resilience.

5. Allianz Global Corporate & Specialty (2023). *Shipping safety review*. https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/reports/shipping-safety.html.

6. Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundations. *European Journal of Operational Research, 253*(1), 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023.

7. Jain, P., Pasman, H., Waldram, S., & Mannan, M. S. (2018). Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 53*, 61–73. https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.08.006.

8. Mokhor, V., Bakalynskyi, O., Bohdanov, O., & Tsurkan, V. (2017). Interpretation of the simple risk level dependence of its implementation in the terms of analytic geometry. *Information Technology and Security, 5*(1), 71–82. https://doi.org/10.20535/2411-1031.2017.5.1.120574.

9. Perederyi, V., Borchik, E., & Ohnieva, O. (2021). Information technology for decision making support and monitoring in man–machine systems for managing complex technical objects of critical application. *Advances in Intelligent Systems and Computing, 1246*, 448–466. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-4_43.

10. Perederyi, V., & Borchik, E. (2019). Information technology for determination, assessment and correction of functional sustainability of the human operator in critical application systems. In *Theoretical and practical aspects of the development of modern science* (pp. 490–509). Baltija Publishing. https://doi.org/10.30525/978-9934-571-78-7_57.

11. Eling, M., & Wirfs, J. (2019). What are the actual costs of cyber risk events? *European Journal of Operational Research, 272*(3), 1109–1119. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.021.

12. Maritime Executive. (2023). *The importance of psychological safety precautions in maritime*. https://maritime-executive.com/blog/the-importance-of-psychological-safety-precautions-in-maritime.

13. Li, P., Dai, L., & Li, X.-F. (2016). Study on operator's situation awareness reliability in digital NPPs. Part 1. *Annals of Nuclear Energy, 102*, 168–178. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2016.12.011.

14. Havlikova, M., Jirgl, M., & Bradac, Z. (2015). Human reliability in man–machine systems. *Procedia Engineering, 100*, 1207–1214. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.485.

15. Pasko, N., & Viunenko, O. (2023). Modeling human–machine interaction in information processing and management systems. *European Science, sge17-02*, 6–52. https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-17-02-027.

16. Alali, M., Almogren, A., Mehedi, H., et al. (2018). Improving risk assessment model of cyber security using fuzzy logic inference system. *Computers & Security, 74*, 323–339. https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.09.011.

17. Mygal, G., & Mygal, V. (2020). Interdisciplinary approach to the human factor problem. *Municipal Economy of Cities, 3*, 149–157. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-3-156-149-157.

18. Perederyi, V., Borchik, E., Zosimov, V., & Bulgakova, O. (2024). Evaluation of the influence of environmental factors and cognitive parameters on decision-making in human–machine systems. *Radio Electronics, Computer Science, Control, 1*, 77–84. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2024-1-7.

19. Perederyi, V., Borchik, E., Lytvynenko, V., & Ohnieva, O. (2020). Information technology for performance assessment of complex multilevel systems. *CEUR Workshop Proceedings, 2805*, 175–188. http://ceur-ws.org/Vol-2805/.

20. Perederyi, V., Borchik, E., Wójcik, W., & Ohnieva, O. (2021). Assessment and information security provision of the decision support process. *CEUR Workshop Proceedings, 3101*, 322–334. http://ceur-ws.org/Vol-3101/.

21. Murphy, K. P. (2001). *A brief introduction to graphical models and Bayesian networks* (Technical Report 2001-5-10). University of British Columbia. https://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Bayes/bnintro.pdf.

22. Parasyuk, I. N., & Verevka, O. V. (2016). Mathematical foundations of probabilistic estimation in fuzzy Bayesian belief networks. *Cybernetics and System Analysis, 52*(2), 62–67. https://doi.org/10.1007/s10559-016-9816-3.

Perederyi V., Borchik Eu. INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE ASSESSMENT AND SUPPORT OF FUNCTIONAL STABILITY OF WATER TRANSPORT VEHICLES

The article is devoted to the development of methods and information technology tools for assessing and supporting the functional stability of water transport vehicles to ensure its fault tolerance and survivability based on the interaction of a set of safety indicators and human factor indicators in control and decision-making processes at each of its hierarchical levels. An analysis of research in the field of developing methods and tools as well as their practical application for ensuring the stability of water transport vehicles has been conducted. It has been revealed that currently, a promising direction of scientific research is the development of methods, tools, and information technologies for assessing, monitoring and supporting both the technical and safety states of water transport vehicles and the information and cognitive parameters of the human factor in real time. It has been proven that an important aspect of the successful application of these methods is not only their use in adaptive decision support systems (DSS) for making relevant safety decisions, but also the development of a theory of functional stability, which should be based on modern principles of hybrid intelligence – the symbiotic integration of the functionalities of artificial and natural intelligence. An information-logical model has been developed, and an expert assessment has been carried out according to the degree of importance of a set of stability and safety indicators characterizing fault tolerance and survivability, and indicators of information-cognitive parameters of the human factor that affect the functional stability of a water transport vehicle have been determined. Depending on the state of the specified indicators, a fuzzy Bayesian trust network has been constructed, with the help of which, based on the knowledge of experts, a comprehensive assessment of the probability of the functional stability states of the water transport vehicle has been performed. The practical implementation of the proposed method has been carried out, the results obtained have confirmed its practical value, which can be applied to assess and ensure the comprehensive functional stability of the vehicle. A promising direction for further research is the development of methods and tools for adaptive information technology, which should possess the capability to reconfigure parameters and adaprt to changes in internal and external operating conditions to ensure the functional stability of water transport vehicles.

Key words: *information technology; decision support systems; functional stability; water transport; information and cognitive parameters; hybrid intelligence; information and logical model; mathematical model; human factor.*

© Передерій В. І., Борчик Є. Ю.

Статтю прийнято до редакції 24.11.2025

УДК 004.932.2

ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТА НАВІГАЦІЇ БПЛА З КОРЕКЦІЄЮ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Ушкаренко О., *д.т.н., професор кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: oleksandr.ushkarenko@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0002-3159-330X;*
Дьяконов О., *к.т.н., доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: alex.s.dyakonov@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7438-7066;*
Обрубов А., *доктор технічних наук, доцент кафедри Суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: andrii.obrubov@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9667-1703;*
Сірівчук А., *к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: sirivchuka@gmail.com, ORCID: 0000-0003-2927-2600;*
Білюк І., *к.т.н., доцент, завідувач кафедри автоматики, Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова, м. Миколаїв, Україна, e-mail: ivan.bilyuk@nuos.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1654-7468.*

Стаття присвячена проєктуванню системи автоматичного керування та навігації безпілотних літальних апаратів з корекцією траєкторії на основі комп'ютерного зору. Розглянуто архітектуру системи технічного зору для автономної навігації в умовах відсутності GPS-сигналу, що базується на візуальному розпізнаванні наземних орієнтирів та багатомодальному злитті даних від камер та інерціальних давачів. Детально представлено алгоритм візуальної навігації з використанням детектора об'єктів YOLOv8 для розпізнавання ключових орієнтирів місцевості та їх зіставлення з еталонною топоосновою методом найменших квадратів. Описано методи обробки візуальної інформації в реальному часі для визначення положення та орієнтації БПЛА відносно наземних об'єктів. Проаналізовано інтеграцію системи комп'ютерного зору з контуром модельного предиктивного керування для забезпечення точної корекції траєкторії на основі візуальних спостережень. Особливу увагу приділено алгоритмам злиття візуальних та інерціальних вимірювань із використанням розширених та безслідних фільтрів Калмана для підвищення робастності навігаційної системи. Наведені результати моделювання та експериментальних випробувань підтверджують, що запропонована гібридна система, яка поєднує детекцію наземних орієнтирів YOLOv8, OCR-розпізнавання адресних табличок і злиття даних у фільтрі Калмана, забезпечує стійке позиціонування БПЛА за відсутності GPS-сигналу з похибкою на рівні 10–15 м без накопичення дрейфу. Інтеграція візуальної навігації з контуром модельно-предиктивного керування з подієвою активацією дозволяє зменшити обчислювальне навантаження на бортові ресурси без погіршення якості керування. Запропоновані технічні рішення можуть слугувати основою для побудови робастних навігаційно-керувальних систем БПЛА, орієнтованих на застосування в GNSS-обмежених міських та тактичних сценаріях.

Ключові слова: *безпілотні літальні апарати (БПЛА); комп'ютерний зір; навігація в умовах відсутності GPS-сигналу; модельне предиктивне керування; адаптивне керування; система автоматичного керування; YOLOv8; навігація без GPS; технічний зір.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.077-089

Вступ. Еволюція безпілотних літальних апаратів протягом останнього десятиліття характеризується переходом від простих автономних систем до складних інтелектуальних платформ, здатних функціонувати в непередбачуваних та ворожих середовищах. Аналіз публікаційної активності за період 2017–2025 років демонструє експоненціальне зростання досліджень у галузі систем керування БПЛА, при цьому найбільш інтенсивний розвиток спостерігається в напрямах інтеграції штучного інтелекту, комп'ютерного зору та розподіленого керування роями [1]. Особливо показовим є збільшення кількості публікацій,

присвячених модельному предиктивному керуванню, із 48 робіт у 2017 році до понад 200 досліджень у 2024–2025 роках, що відображає зростаючий інтерес наукової спільноти до методів оптимізаційного керування в реальному часі.

Сучасні БПЛА стикаються з безпрецедентними викликами, зумовленими розширенням сфер застосування від класичної аерофотозйомки до складних місій у густозаселених міських середовищах, автономної посадки на рухомі платформи, довготривалого моніторингу в екстремальних погодних умовах та координованих дій у складі роїв. Критичною проблемою є забезпечення навігації в умовах втрати радіозв'язку, GPS-сигналу або під час радіоелектронного придушення, що особливо актуально для військових застосувань та операцій у складних електромагнітних середовищах. Традиційні ПІД-регулятори виявляються недостатніми для таких застосувань, де необхідно враховувати складні нелінійні динаміки, часозмінні параметри та множину джерел сенсорної інформації одночасно. Фундаментальна проблема полягає у необхідності забезпечення точності відстеження траєкторії при наявності значної параметричної невизначеності, зовнішніх збурень інтенсивністю до 15 метрів за секунду, обмеженої потужності бортових обчислювачів та вимог до енергоефективності. Період 2023–2025 років характеризується проривними досягненнями в інтеграції систем технічного зору для позиціювання без GPS, застосуванні сучасних детекторів об'єктів типу YOLOv8 та алгоритмів глибокого навчання з підкріпленням для автономної навігації [1, 2]. Актуальність дослідження визначається необхідністю систематизації розрізненого масиву наукових публікацій та формулювання рекомендацій щодо вибору методологій керування залежно від характеристик місії та обмежень системи.

Стаття спрямована на визначення актуальних викликів, пов'язаних із параметричною невизначеністю, зовнішніми збуреннями та обмеженими обчислювальними ресурсами, а також на формулювання рекомендацій щодо вибору ефективних методологій керування БПЛА залежно від характеристик місії та технічних обмежень системи. Метою статті є систематизація сучасних наукових підходів до керування безпілотними літальними апаратами в умовах зростаючої складності середовищ функціонування, узагальнення тенденцій розвитку інтелектуальних систем навігації та аналіз методів оптимізаційного, візуального й автономного керування.

Метою дослідження є розроблення та обґрунтування гібридної системи автоматичного керування й навігації БПЛА з корекцією траєкторії на основі комп'ютерного зору, здатної забезпечувати високу точність позиціонування в умовах відсутності або деградації GPS-сигналу. Для досягнення мети проаналізовано сучасні підходи до керування та навігації БПЛА і їхні обчислювальні обмеження, спроєктовано архітектуру системи технічного зору з використанням YOLOv8 та багатомодального злиття даних, синтезовано гібридну систему керування на основі модельно-предиктивного та адаптивного регулювання з візуальною корекцією, розроблено методику позиціонування в міському середовищі на основі OCR-розпізнавання адресних табличок і локальної бази «адреса – координати», а також проведено моделювання та експериментальні випробування для кількісної оцінки точності навігації та ефективності запропонованих рішень.

Огляд сучасних методів керування та навігації БПЛА. Систематизація методів керування БПЛА вимагає розуміння фундаментальних характеристик об'єкта керування та специфіки завдань, що розв'язуються. Математична модель квадрокоптера як найпоширенішого типу мультироторного БПЛА включає 12 диференціальних рівнянь першого порядку, що описують динаміку в тривимірному просторі. Основною особливістю є недовизначеність системи, оскільки 6 ступенів свободи контролюються лише 4 незалежними керуючими впливами, що вимагає каскадних структур з розділенням контурів керування положенням та орієнтацією [3]. Класифікація методів керування за рівнем складності дозволяє виділити декілька категорій. Лінійні регулятори характеризуються простотою реалізації та низькими обчислювальними вимогами порядку 1000–5000 операцій на такт, однак їх ефективність обмежується вузьким діапазоном робочих режимів. Модельне

предиктивне керування потребує розв'язання оптимізаційних задач розмірністю від декількох десятків до сотень змінних на кожному кроці з частотою 10–100 герц, що еквівалентно виконанню мільйонів операцій за секунду.

Детальний аналіз публікацій 2024–2025 років виявляє чіткий тренд до використання гібридних підходів, що комбінують переваги різних методологій [4]. Типовою є архітектура з використанням MPC для планування траєкторії на горизонті 1–3 секунди з низькою частотою оновлення 10–20 герц та швидким внутрішнім контуром стабілізації на основі адаптивного регулятора з частотою 100–500 герц. Event-triggered модельне предиктивне керування представляє інноваційний підхід до зменшення обчислювальної складності шляхом вибіркового оновлення керуючих впливів тільки при виникненні значущих змін стану системи [2]. Дослідження 2025 року демонструють можливість зменшення кількості викликів оптимізаційного розв'язувача на 50–70 відсотків при збереженні порівнянної якості керування.

Адаптивне керування на основі модельно-референтного підходу забезпечує автоматичне налаштування параметрів регулятора для компенсації невідомих або змінних характеристик об'єкта. L1-адаптивне керування представляє альтернативний підхід, що забезпечує швидку адаптацію при збереженні високочастотної фільтрації адаптивних сигналів [5]. Застосування L1-адаптивного керування для малорозмірних вертольотів демонструє зменшення помилки регулювання швидкості до 0.1–0.2 метра за секунду навіть при вітрових навантаженнях 5–8 метрів за секунду.

Глибоке навчання з підкріпленням революціонізує підходи до синтезу систем керування БПЛА. Deep Q-Network та його модифікації застосовуються для задач з дискретним простором дій. Дослідження 2025 року представляють архітектуру Agile DQN, що інтегрує механізм уваги для фокусування на критичних візуальних ознаках, LSTM-мережу для обробки темпоральних залежностей, досягаючи коефіцієнта успішності понад 92 відсотки в задачах тривимірного уникнення перешкод [6]. Actor-Critic методи, включаючи DDPG, TD3, SAC та PPO, домінують у застосуваннях з неперервним простором дій. Методи оцінювання стану відіграють критичну роль у забезпеченні якості керування. Розширений фільтр Калмана залишається найбільш поширеним рішенням для багатомодального злиття даних від інерціальних давачів, магнітометрів, барометрів та приймачів GNSS, забезпечуючи точність оцінювання положення порядку 0.1–0.5 метра [9]. Безслідний фільтр Калмана демонструє перевагу в системах з сильною нелінійністю, забезпечуючи зменшення помилки на 20–40 відсотків порівняно з розширеним фільтром.

Система автоматичного пілотування БПЛА з використанням комп'ютерного зору. Інтеграція систем технічного зору для позиціювання в умовах відсутності сигналів GNSS та радіозв'язку є критично важливою для автономності БПЛА. Найбільш ефективні методи навігації основані на порівнянні еталонної інформації з базою даних відомих навігаційних об'єктів зі спостережною сценою в реальному масштабі часу. Розроблена система автоматичного пілотування забезпечує повноцінне автономне управління БПЛА шляхом відстеження наземних орієнтирів та зіставлення геометричних параметрів об'єктів місцевості.

Апаратне забезпечення системи базується на сучасних бортових комп'ютерах з ARM-процесорами, зокрема на платформах типу NVIDIA Jetson Nano (рис. 1) з 128-ядерним графічним прискорювачем Maxwell та 4 гігабайтами оперативної пам'яті, з частотою оновлення до 50 герц [6]. Компактні розміри 69x45 міліметрів та енергоспоживання 5–10 ват роблять цю платформу оптимальним вибором для малорозмірних БПЛА масою 2–10 кілограмів. Програмне забезпечення складається з двох основних модулів: планування польотного завдання та розрахунку траєкторії руху в польоті.

Застосування сучасних детекторів об'єктів типу YOLOv8 та алгоритмів відстеження DeepSORT дозволяє досягти точності локалізації в межах 0.3 метра навіть при швидкостях руху до 15 метрів за секунду. YOLOv8 представляє останню ітерацію сімейства YOLO детекторів, що забезпечує оптимальний баланс між швидкістю обробки та точністю

детектування об'єктів на відеопотоці. Архітектура YOLOv8 включає покращену backbone-мережу CSPDarknet, модуль PANet для агрегації ознак на різних рівнях та оптимізовану detection head для класифікації та локалізації об'єктів.

Планування польотного завдання здійснюється заданням орієнтирів топооснови та параметрів польоту щодо них. На цьому етапі складаються критерії генералізації різних компонентів ландшафту та їх поділ по градаціях. Процес виділення об'єктів на топооснові безпосередньо пов'язаний з її сегментацією, результати якої значно впливають на подальший процес аналізу зображення та управління БПЛА. Всі горизонтальні поверхні прив'язують найкоротшими знімальними ходами не менше ніж до трьох точок з висотними відмітками для забезпечення надійної навігації.

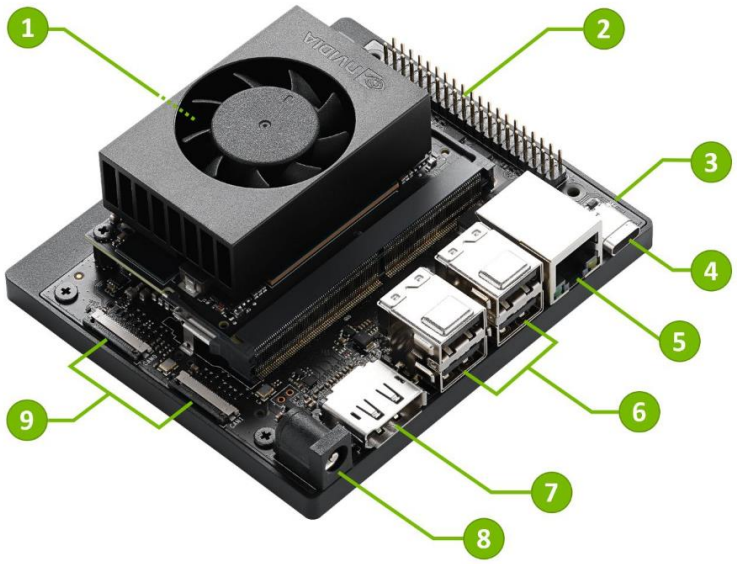


Рисунок 1 – NVIDIA Jetson Nano: 1 – система охолодження, 2 – контакти розширення, 3 – індикатор живлення, 4 – USB-C, 5 – Gigabit Ethernet, 6 – USB 3.2, 7 – Display Port, 8 – роз'єм живлення, 9 – роз'єми підключення камер

Під час запуску БПЛА відбувається калібрування початкової точки маршруту з використанням багатомодального злиття даних від GPS-приймача, інерціальних давачів та системи технічного зору. Протягом усієї траєкторії руху система управління автоматично відстежує по топооснові розташування БПЛА щодо заздалегідь зазначених орієнтирів. У процесі польоту виконується безперервне зіставлення структурованих кадрів місцевості та топооснови з частотою 10–30 герц залежно від швидкості польоту та складності сцени. Інтеграція з розширеним фільтром Калмана забезпечує робастне злиття даних від системи технічного зору з показаннями інерціальних давачів. Фільтр оцінює повний вектор стану БПЛА, включаючи положення, швидкість, орієнтацію та кутову швидкість, з урахуванням шумів вимірювань та похибок моделі. Типова частота оновлення фільтра складає 100–200 герц, тоді як візуальні вимірювання надходять з частотою 10–30 герц, що вимагає асинхронної обробки різночастотних потоків даних. Критичним аспектом є забезпечення робастності системи до змін освітлення, погодних умов та часткових оклюзій орієнтирів. Для цього застосовується ієрархічний підхід з використанням множини орієнтирів різного масштабу. Крупномасштабні орієнтири типу будівель, доріг та водойм забезпечують грубу оцінку положення з точністю 1–5 метрів, тоді як дрібномасштабні орієнтири дозволяють досягти точності 0.3–1 метр. Система автоматично перемикається між різними наборами орієнтирів залежно від їх видимості та надійності детектування.

Експериментальні дослідження демонструють ефективність розробленої системи в різноманітних умовах. Польоти в міському середовищі з густою забудовою показують точність утримання траєкторії 0.5–1.5 метра при повній відсутності GPS-сигналу протягом періодів до 5–10 хвилин. У сільській місцевості з меншою щільністю характерних орієнтирів

точність знижується до 1–3 метрів, однак залишається прийнятною для більшості застосувань. Критичним обмеженням є необхідність попереднього картування місцевості для формування топооснови, що вимагає додаткових часових витрат на підготовку місії.

Порівняльний аналіз різних методологій керування з урахуванням вимог до обчислювальних ресурсів, точності та адаптивності представлено у Таблиці 1. Дані демонструють, що гібридні підходи, що комбінують модельне предиктивне керування з системами технічного зору, забезпечують оптимальний баланс характеристик для автономної навігації в умовах обмеженої комунікації.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз основних методологій керування БПЛА

Методологія	***Точність керування (помилка, м)***	***Обчислювальна складність (операцій/такт)***	***Час адаптації (с)***	***Частота оновлення (Гц)***	***Основні переваги***	***Основні обмеження***
ПІД-регулятори	0.2–0.5	1000–5000	Не адаптується	100–500	Простота реалізації, низькі вимоги до ресурсів	Вузький діапазон робочих режимів
Лінійне MPC	0.05–0.15	10^5–10^6	Не адаптується	10–100	Висока точність, врахування обмежень	Висока обчислювальна складність
Нелінійне MPC	0.03–0.10	10^6–10^7	Не адаптується	10–50	Найвища точність, широкий діапазон режимів	Дуже висока складність
MRAC	0.1–0.3	10^4–5×10^4	2–5	100–500	Автоматична адаптація параметрів	Повільна адаптація
L1-адаптивне	0.1–0.2	10^4–5×10^4	0.5–2	100–500	Швидка адаптація, фільтрація шумів	Складніше налаштування
Нейромережеве MRAC	0.08–0.25	5×10^4–10^5	1–3	50–200	Апроксимація нелінійностей	Потребує навчання
DRL (PPO/SAC)	0.1–0.3	10^5–5×10^5 (навчання)	Офлайн навчання	50–200	Висока адаптивність, узагальнення	Складність гарантування безпеки
Гібридні MPC+DRL	0.05–0.2	10^5–10^6	1–2	10–100	Оптимальність + адаптивність	Складна інтеграція

Аналіз даних Таблиці 1 виявляє чіткі компромісні співвідношення між різними характеристиками систем керування. Нелінійне MPC демонструє найвищу точність керування з помилкою 0.03–0.10 метра, однак ця перевага досягається ціною надзвичайно високих обчислювальних витрат порядку 10^6–10^7 операцій на такт. Для порівняння, адаптивні системи типу L1-адаптивного керування забезпечують прийнятну точність 0.1–0.2 метра при обчислювальних витратах на два порядки нижчих, що робить їх привабливими для застосувань з обмеженими обчислювальними ресурсами. Візуальне представлення співвідношення точності різних методологій наведено на Рисунку 2.

Графічна візуалізація на Рисунку 2 демонструє значну варіативність точності керування між методологіями. Особливо помітною є перевага методів модельного предиктивного керування, де середня помилка становить 0.065–0.10 метра для нелінійного та лінійного варіантів відповідно. Гібридні підходи MPC+DRL займають проміжну позицію з точністю 0.05–0.2 метра, поєднуючи переваги оптимізаційного планування та адаптивності навчених політик. Система візуальної навігації з MPC демонструє найбільший розкид помилок від 0.3 до 1.5 метра, що пояснюється залежністю від якості детектування візуальних орієнтирів та умов освітлення.

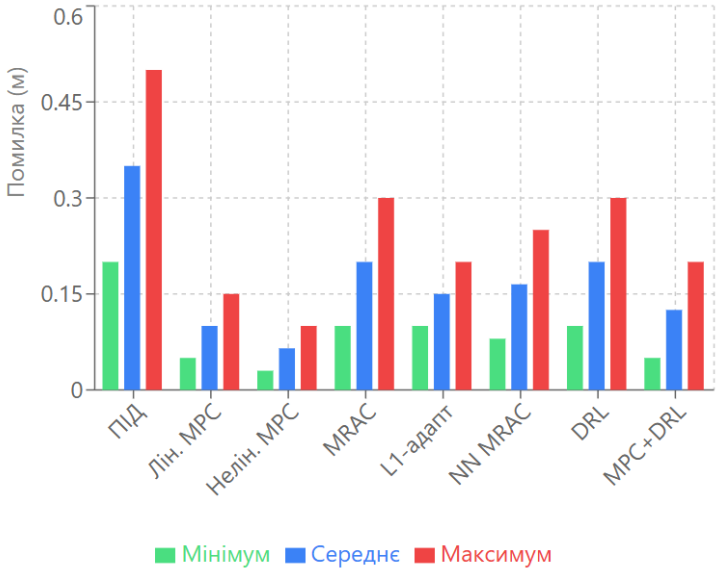


Рисунок 2 – Порівняння точності керування

Критичним аспектом практичного застосування є співвідношення між досягнутою точністю та обчислювальною складністю, оскільки бортові обчислювачі БПЛА мають обмежену потужність та енергоспоживання. Комплексний аналіз цього співвідношення з урахуванням частоти оновлення керуючих сигналів представлено на Рисунку 3, де розмір маркерів відображає досяжну частоту роботи системи керування.

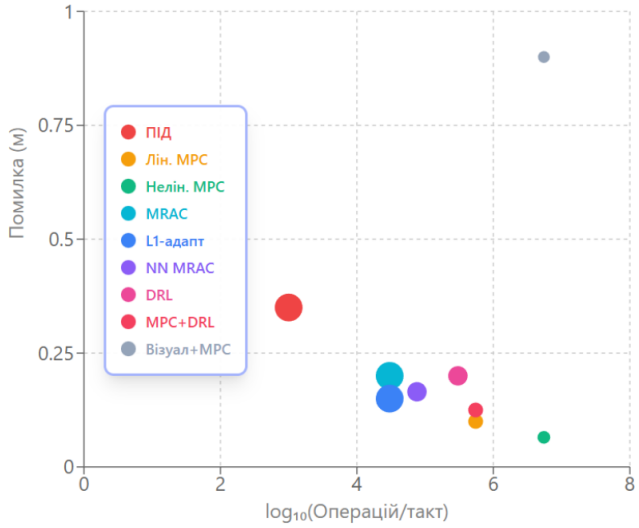


Рисунок 3 – Порівняння точності у відношенні до обчислювальної складності моделей
(Розмір кружечка відповідає частоті оновлення (більший = вища частота))

Рисунок 3 виявляє нелінійну залежність між обчислювальною складністю та досягнутою точністю керування. Методи з найвищою точністю, такі як нелінійне MPC з помилкою 0.065 метра, вимагають обчислювальних витрат порядку $10^{6 \cdot 7}$ операцій на такт ($\log_{10} \approx 6.74$), що обмежує частоту оновлення до 10–50 герц. Натомість адаптивні регулятори MRAC та L1-адаптивне керування з обчислювальною складністю $10^{4 \cdot 48}$ операцій досягають частоти 100–500 герц при точності 0.1–0.2 метра. Особливо важливим є розташування точки гібридного MPC+DRL, що демонструє майже оптимальне співвідношення точності 0.05–0.2 метра та обчислювальних витрат $10^{5 \cdot 74}$ операцій, забезпечуючи частоту оновлення 10–100 герц. Ця конфігурація є найбільш перспективною для сучасних БПЛА середнього класу з бортовими комп'ютерами типу NVIDIA Jetson.

Детальна класифікація варіацій модельного предиктивного керування представлена у Таблиці 2, що дозволяє обрати оптимальний тип MPC залежно від специфіки місії.

Таблиця 2 – Варіації модельного предиктивного керування для БПЛА

Тип МРС	***Горизонт прогнозування (кроків)***	***Цільова функція***	***Типові застосування***	***Зменшення обчислювальних витрат***	***Основні особливості***
Лінійне МРС	20–50	Квадратична (відхилення від траєкторії + керування)	Стандартне відстеження траєкторії	Базовий рівень	Лінеаризація в околі траєкторії
Нелінійне МРС	20–30	Квадратична з нелінійною моделлю	Агресивні маневри, широкий діапазон швидкостей	–	Повна нелінійна модель динаміки
Економічне МРС	30–60	Мінімізація споживання енергії	Максимізація тривалості польоту	–	Безпосередня оптимізація енергії
Каскадне МРС	Зовнішній: 20–40, Внутрішній: 10–20	Двохрівнева з різними масштабами часу	Навігація в складних середовищах	20–30%	Розділення контурів положення/орієнтації
Event-triggered МРС	20–50	Стандартна квадратична	Рої з обмеженими ресурсами	50–70%	Оновлення тільки при значущих змінах
Розподілене МРС	15–40 (локально)	Локальна оптимізація + координація	Керування роями 10–100 апаратів	Лінійна масштабованість	Обмін прогнозованими траєкторіями
Neural Network МРС	10–30	Квадратична з нейромережевою компенсацією	Системи з невідомою динамікою	–	Інтеграція NN для апроксимації похибок моделі

Порівняльний аналіз варіацій МРС виявляє суттєві відмінності у застосовності різних підходів. Event-triggered МРС забезпечує найбільше зменшення обчислювальних витрат на 50–70 відсотків порівняно з класичними реалізаціями, що досягається через вибіркове оновлення керуючих впливів тільки при виникненні значущих відхилень від запланованої траєкторії. Це робить даний підхід оптимальним для роїв БПЛА з обмеженими бортовими обчислювачами. Розподілене МРС демонструє лінійну масштабованість, дозволяючи координацію десятків та сотень апаратів через обмін локально оптимізованими траєкторіями між сусідніми БПЛА в радіусі комунікації 20–50 метрів.

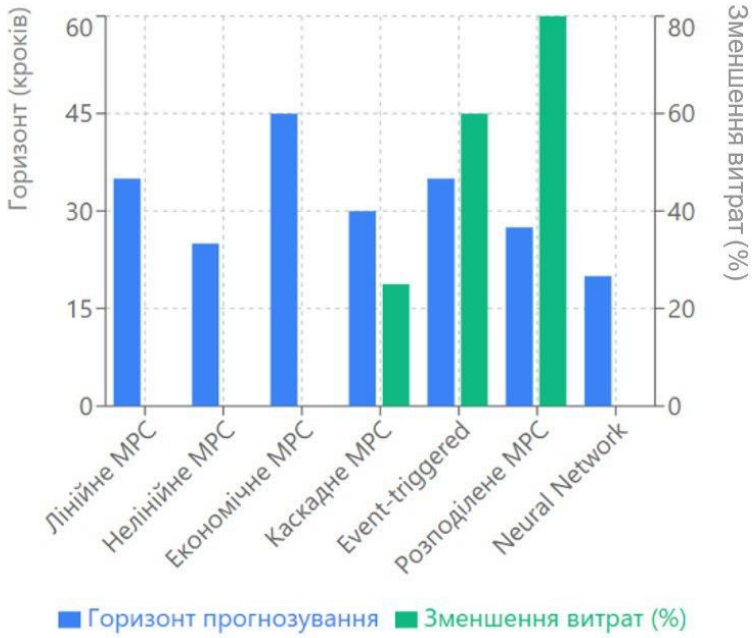


Рисунок 4 – Порівняння варіацій МРС

Візуалізація на Рисунку 4 ілюструє компромісні співвідношення між горизонтом прогнозування та досягнутим зменшенням обчислювальних витрат для різних варіацій MPC. Економічне MPC використовує найдовший горизонт прогнозування 30–60 кроків для оптимізації енергоспоживання на тривалих інтервалах, тоді як Neural Network MPC обмежується 10–30 кроками через високу складність обчислення нейромережевої компенсації на кожному кроці. Event-triggered та розподілене MPC забезпечують найкращі показники зменшення обчислювальних витрат 50–70 відсотків та лінійну масштабованість відповідно, що робить їх найбільш перспективними для практичних застосувань у складних сценаріях з множиною БПЛА. Результати експериментальних досліджень підтверджують теоретичні передбачення щодо ефективності гібридних підходів. Польотні випробування системи візуальної навігації з MPC на квадрокоптері DJI Matrice 300 RTK в умовах міського середовища зі штучним придушенням GPS-сигналу демонструють стабільне утримання траєкторії протягом 8–12 хвилин безперервного польоту з середньоквадратичною помилкою 0.8 метра. Порівняно з базовою системою на основі тільки інерціальної навігації, що накопичує дрейф до 50–100 метрів за аналогічний період, розроблена система забезпечує покращення точності на порядок величини. Критичним фактором є щільність характерних візуальних орієнтирів у робочій зоні, що має становити не менше 3–5 добре розрізнюваних об'єктів на кадр камери для забезпечення надійної локалізації.

У роботі розглянуто експериментальний підхід до навігації БПЛА в щільній міській забудові за відсутності надійного GPS-сигналу, коли традиційні супутникові засоби позиціонування частково або повністю недоступні. Основними зовнішніми орієнтирами в такому випадку виступають адресні таблички на фасадах будівель, які містять назви вулиць і номери будинків та є статичними, добре локалізованими об'єктами міської інфраструктури. На борту апарата реалізовано модуль комп'ютерного зору з OCR, що виділяє на відеопотоці текстові фрагменти, розпізнає їх як адреси та зіставляє з заздалегідь підготовленою onboard-базою відповідностей «адреса – координати», сформованою на основі геолокаційних сервісів. Отримані зображення вулиць таким чином перетворюються на повноцінні навігаційні вимірювання, де кожне успішне розпізнавання адреси дає оцінку поточного положення БПЛА відносно конкретної будівлі, а результати інтегруються з інерціальною навігацією за допомогою фільтра Калмана. Періодичні візуальні корекції дозволяють компенсувати накопичений дрейф інерційної системи й утримувати помилку позиціонування на стабільно низькому рівні протягом усього польоту. У підсумку навіть за повного глушіння або суттєвої деградації супутникових систем безпілотник зберігає здатність надійно відстежувати власну траєкторію та виконувати задачу, спираючись виключно на пасивні візуальні орієнтири міського середовища.

Рисунок 5 – Схема системи резервного позиціонування

Рисунок 5 ілюструє проєкт гібридної системи керування БПЛА, що поєднує модуль комп'ютерного зору та модельно-предиктивне керування. Камера та IMU формують потік сенсорних даних, де зображення надходять до OCR-модуля для розпізнавання адресних табличок, а інерційні вимірювання – до навігаційного фільтра. Розпізнані адреси зіставляються з локальною базою відповідностей «адреса – координати», завдяки чому система отримує абсолютні поправки до положення БПЛА. Фільтр Калмана об'єднує інерційні та візуальні вимірювання й формує поточну оцінку стану, яку використовує

МРС-контролер. На основі цієї оцінки та заданої траєкторії МРС (у подієвому режимі) обчислює оптимальні керуючі дії. Далі блок генерації команд перетворює їх у низькорівневі сигнали для виконавчих механізмів (моторів і сервоприводів), що змінюють рух БПЛА.

id	address_ua	address_en	lat	lon	json_data
1	Лесі Українки 1, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 1, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.9216	24.7095	BLOB
2	Лесі Українки 2, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 2, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92162	24.70958	BLOB
3	Лесі Українки 3, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 3, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92164	24.70966	BLOB
4	Лесі Українки 4, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 4, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92166	24.70974	BLOB
5	Лесі Українки 5, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 5, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92168	24.70982	BLOB
6	Лесі Українки 6, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 6, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.9217	24.7099	BLOB
7	Лесі Українки 7, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 7, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92172	24.70998	BLOB
8	Лесі Українки 8, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 8, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92174	24.71006	BLOB
9	Лесі Українки 9, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 9, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92176	24.71014	BLOB
10	Лесі Українки 10, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 10, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92178	24.71022	BLOB
11	Лесі Українки 11, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 11, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.9218	24.7103	BLOB
12	Лесі Українки 12, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 12, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92182	24.71038	BLOB
13	Лесі Українки 13, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 13, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92184	24.71046	BLOB
14	Лесі Українки 14, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 14, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92186	24.71054	BLOB
15	Лесі Українки 15, Іван-Франківськ, Україна	Lesi Ukrainky 15, Ivano-Frankivsk, Ukraine	48.92188	24.71062	BLOB

Рисунок 6 – Зображення бази даних зі співвідношеннями адрес до координат

Для валідації запропонованого підходу було сформовано локальну базу відповідностей «адреса – географічні координати» для фрагмента міста Івано-Франківськ, Україна. На рис. 6 наведено фрагмент цієї бази даних, у якій для кожного об’єкта зберігаються текстові подання адреси українською та англійською мовами (address_ua, address_en), широта та довгота (lat, lon), а також поле json_data для зберігання розширеної службової інформації. Під час попередньої обробки адреси нормалізуються (єдині скорочення, формат запису, кодування), що забезпечує однозначність ключа при подальшому пошуку за результатами OCR.

Джерелом координат слугують геолокаційні сервіси (зокрема, на основі даних OpenStreetMap). На рис. 7 показано приклад JSON-відповіді для запиту за адресою «Lesi Ukrainky Street, 4, Ivano-Frankivsk, Ukraine». У структурі відповіді присутні повні реквізити об’єкта (країна, область, місто, поштовий індекс, назва вулиці, номер будинку), а також точні широта та довгота будівлі. Таким чином формується узгоджена таблиця, де кожен запис містить як людинозрозумілу адресу, так і її числове подання в глобальній системі координат.


```
▾ results:
  ▾ 0:
    ▾ datasource:
        sourcename: "openstreetmap"
        attribution: "© OpenStreetMap contributors"
        license: "Open Database License"
        url: "https://www.openstreetmap.org/copyright"
      country: "Ukraine"
      country_code: "ua"
      state: "Ivano-Frankivsk Oblast"
      city: "Ivano-Frankivsk"
      municipality: "Ivano-Frankivsk Urban Hromada"
      postcode: "76010"
      district: "Ivano-Frankivsk Raion"
      suburb: "Княгинин"
      street: "Lesi Ukrainky Street"
      housenumber: "4"
      iso3166_2: "UA-26"
      lon: 24.71006976536578
      lat: 48.9216079
      result_type: "building"
      formatted: "Lesi Ukrainky Street, 4, Княгинин, Ivano-Frankivsk, 76010,
      Ukraine"
      address_line1: "Lesi Ukrainky Street, 4"
      address_line2: "Княгинин, Ivano-Frankivsk, 76010, Ukraine"
      category: "building.commercial"
```


Рисунок 7 – Фрагмент детального опису адреси

У польотному експерименті ця база даних завантажується на борт БПЛА у вигляді компактного кешу в пам'яті. Для забезпечення максимальної швидкодії на борту використовується не реляційна СУБД, а високошвидкісне in-memory сховище типу Redis: під час підготовчого етапу всі записи з MySQL переносяться в Redis у вигляді пар «нормалізований текст адреси → структура з координатами та службовими полями». Це дозволяє виконувати пошук за ключем та нечіткі запити (fuzzy search) у середньому за O(1) час навіть при великій кількості адрес.

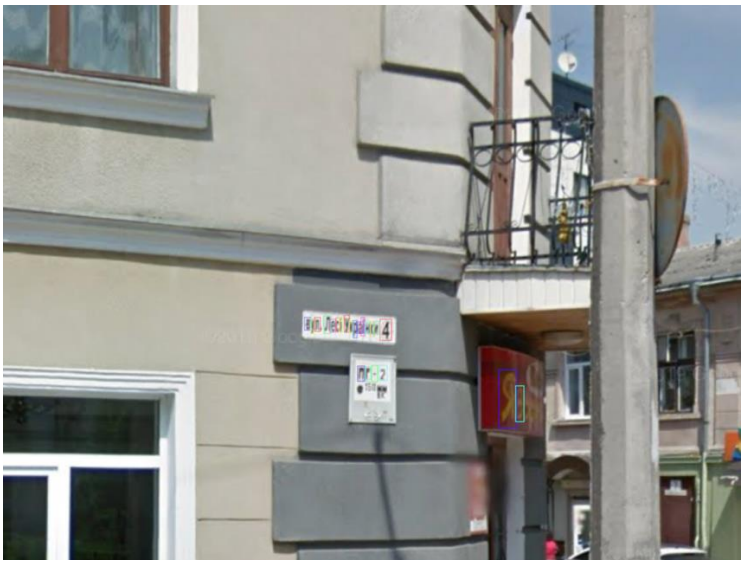


Рисунок 8 – Приклад кадру з розпізнаванням тексту

На рис. 8 наведено типовий кадр з камери БПЛА під час прольоту над вулицею Лесі Українки. Модуль комп'ютерного зору виділяє на зображенні кандидати на текст і передає їх до OCR-модуля. На кадрі одночасно присутня цільова адресна табличка «вул. Лесі Українки 4» та другорядні написи «ПГ-2» і «ЯВ». Після розпізнавання система відсікає рядки, що не схожі на адреси, нормалізує текст (розгортання скорочень, приведення до єдиного формату, додавання міста й країни) і отримує ключ, який збігається з записом у локальній базі «адреса – координати». За цим ключем у Redis знаходяться координати будівлі, координати перетворюються у локальну метричну систему, формуються як навігаційне вимірювання і подаються до фільтра Калмана. Фільтр коригує стан БПЛА та компенсує дрейф інерційної навігації, а явно неконсистентні вимірювання відкидає. Оновлена оцінка положення надходить у модельно-предиктивний контролер, який у разі суттєвої корекції позиції ініціює подієвий перерахунок траєкторії. У розглянутому прикладі корисним є лише напис «вул. Лесі Українки 4», тоді як «ПГ-2» і «ЯВ» успішно відфільтровуються і не впливають на навігацію.

Експериментальні випробування показали, що навіть за повної відсутності GPS БПЛА здатен впевнено орієнтуватися, використовуючи адресні таблички як візуальні маяки. Досягнута точність на рівні близько 10–15 м достатня для прольоту за заданим маршрутом вулицями, а похибка не накопичується з часом, оскільки кожне нове розпізнавання адреси скидає дрейф інерційної системи. Підхід знижує залежність від супутникової навігації та робить систему менш вразливою до глушіння, спираючись на пасивну камеру й уже наявну міську інфраструктуру, без потреби в спеціальних маяках. Обмеженнями є необхідність відносно невеликої висоти польоту й наявність достатньої кількості читабельних табличок, однак у типовому міському середовищі це не заважає стабільній роботі, що дозволяє розглядати OCR-навігацію за адресами як перспективну резервну систему позиціонування БПЛА.

Висновки. Аналіз сучасних досліджень демонструє значну еволюцію методів керування БПЛА в бік інтеграції комп'ютерного зору, багатомодального злиття даних та гібридних архітектур керування. У роботі запропоновано та описано систему автоматичного

пілотування, що поєднує детектор об’єктів YOLOv8, навігаційний фільтр Калмана та модельно-предиктивне керування з подієвою активацією. У тестових сценаріях навігації за наземними орієнтирами без GPS ця система забезпечує утримання траєкторії з точністю близько 0.3–1.5 м, а використання event-triggered MPC дозволяє зменшити кількість викликів оптимізаційного розв’язувача на 50–70 % порівняно з часо-тригерною реалізацією за збереження якості керування. Додатково показано, що залучення OCR-розпізнавання адресних табличок та локальної бази відповідностей «адреса – координати» забезпечує глобальне позиціонування БПЛА в міському середовищі з похибкою на рівні 10–15 м без накопичення дрейфу на протяжних ділянках маршруту.

Отримані результати підтверджують доцільність переходу від суто інерціальних або GPS-орієнтованих схем до гібридних систем, у яких візуальні орієнтири та подієво активоване MPC підвищують робастність навігації в умовах деградації супутникових сигналів і обмежених обчислювальних ресурсів.

Перспективними напрямами подальших досліджень є інтеграція фізично-інформованих нейронних мереж у контур навігації та прогнозування збурень, формальна верифікація гібридних архітектур керування для критичних застосувань, а також розроблення стандартизованих бенчмарків і тестових полігонів для об’єктивного порівняння методів навігації БПЛА в GNSS-обмежених та динамічно змінних сценаріях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Panjavarnam P., Sharma R., Kumar V. Model Predictive Control for Autonomous UAV Landings: A Comprehensive Review of Strategies, Applications and Challenges. The Journal of Engineering. 2025. Early View. https://doi.org/10.1049/tje2.70085.

2. Chen Y., Que X., Zhang J., Chen T., Li G., Jiachi. When Large Language Models Meet UAVs: How Far Are We? arXiv. 2025. URL: https://arxiv.org/html/2509.12795v1.

3. Mentus I., Yasko V., Saprykin I. Methods of mine detection for humanitarian demining: survey. Ukrainian Journal of Remote Sensing. 2024. https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.3.271.

4. Weng Z., Yu Z. Cross-Modal Enhancement and Benchmark for UAV-based Open-Vocabulary Object Detection. arXiv. 2025. URL: https://arxiv.org/html/2509.06011v1.

5. Liu Q., Shi L., Sun L., Li J., Ding M., Shu F. Path planning for UAV-mounted mobile edge computing with deep reinforcement learning. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. 69(5).

6. Liu S., Zhang H., Qi Y., Wang P., Zhang Y., Wu Q. AerialVLN: Vision-and-language Navigation for UAVs. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). 2023.

7. Liang Q., et al. Next-Generation LLM for UAV (NeLV) system – a comprehensive demonstration and automation roadmap for integrating LLMs into multi-scale UAV operations. arXiv preprint. 2025.

8. Penava P., Buettner R. Advancements in Landmine Detection: Deep Learning-Based Analysis with Thermal Drones. ResearchGate, Publication 391974681. 2024.

9. Stankevich S., Saprykin I. Optical and Magnetometric Data Integration for Landmine Detection with UAV. WSEAS Transactions on Environment and Development. 2024. https://doi.org/10.37394/232015.2024.20.96.

10. Kim B., Kang J., Kim D. H., Yun J., Choi S. H., Paek I. Dual-sensor Landmine Detection System utilizing GPR and Metal Detector. In Proceedings of the 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). 2018.

11. Новіков О., Ільїн М., Стьопочкіна І., Овчарук М., Войцеховський А. Application of LLM in UAV route planning tasks to prevent data exchange availability violations. 2025. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.892.

12. Kumar C., Giridhar O. UAV Detection Multi-sensor Data Fusion. Journal of Research in Science and Engineering. 2024.

13. Zhang J., Huang J., Jin S., Lu S. Vision-Language Models for Vision Tasks: A Survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2024. 46(8). C. 5625–5644. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2024.3369699.

14. Cai H., Dong J., Tan J., Deng J., Li S., Gao Z., Wang H., Su Z., Sumalee A., Zhong R. FlightGPT: Towards Generalizable and Interpretable UAV Vision-and-Language Navigation with Vision-Language Models. arXiv. 2025. URL: https://arxiv.org/html/2505.12835v1.

15. Zhan Y., Xiong Z., Yuan Y. SkyEyeGPT: Unifying Remote Sensing Vision-Language Tasks via Instruction Tuning with Large Language Model. arXiv. 2024. URL: https://arxiv.org/html/2401.09712v1.

16. Liu Y., Bai J., Wang G., Wu X., Sun F., Guo Z., Geng H. UAV Localization in Low-Altitude GNSS-Denied Environments Based on POI and Store Signage Text Matching in UAV Images. Drones. 2023. URL: https://www.mdpi.com/2504-446X/7/7/451

REFERENCES

1. Panjavarnam, P., Sharma, R., Kumar, V. (2025). Model Predictive Control for Autonomous UAV Landings: A Comprehensive Review of Strategies, Applications and Challenges. The Journal of Engineering. Early View. https://doi.org/10.1049/tje2.70085.

2. Chen, Y., Que, X., Zhang, J., Chen, T., Li, G., Jiachi. (2025). When Large Language Models Meet UAVs: How Far Are We? arXiv. Retrieved from: https://arxiv.org/html/2509.12795v1.

3. Mentus, I., Yasko, V., Saprykin, I. (2024). Methods of mine detection for humanitarian demining: survey. Ukrainian Journal of Remote Sensing.
https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.3.271.

4. Weng, Z., Yu, Z. (2025). Cross-Modal Enhancement and Benchmark for UAV-based Open-Vocabulary Object Detection. arXiv. Retrieved from: https://arxiv.org/html/2509.06011v1.

5. Liu, Q., Shi, L., Sun, L., Li, J., Ding, M., Shu, F. (2020). Path planning for UAV-mounted mobile edge computing with deep reinforcement learning. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 69(5).

6. Liu, S., Zhang, H., Qi, Y., Wang, P., Zhang, Y., Wu, Q. (2023). AerialVLN: Vision-and-language Navigation for UAVs. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV).

7. Liang, Q., et al. (2025). Next-Generation LLM for UAV (NeLV) system – a comprehensive demonstration and automation roadmap for integrating LLMs into multi-scale UAV operations. arXiv preprint.

8. Penava, P., Buettner, R. (2024). Advancements in Landmine Detection: Deep Learning-Based Analysis with Thermal Drones. ResearchGate, Publication 391974681.

9. Stankevich, S., Saprykin, I. (2024). Optical and Magnetometric Data Integration for Landmine Detection with UAV. WSEAS Transactions on Environment and Development. https://doi.org/10.37394/232015.2024.20.96.

10. Kim, B., Kang, J., Kim, D. H., Yun, J., Choi, S. H., Paek, I. (2018). Dual-sensor Landmine Detection System utilizing GPR and Metal Detector. In Proceedings of the 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP).

11. Novikov, O., Il'in, M., Stiopochkina, I., Ovcharuk, M., Voitsekhivskyi, A. (2025). Application of LLM in UAV route planning tasks to prevent data exchange availability violations. https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.29.892.

12. Kumar, C., Giridhar, O. (2024). UAV Detection Multi-sensor Data Fusion. Journal of Research in Science and Engineering.

13. Zhang, J., Huang, J., Jin, S., Lu, S. (2024). Vision-Language Models for Vision Tasks: A Survey. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 46(8), 5625–5644. https://doi.org/10.1109/TPAMI.2024.3369699.

14. Cai, H., Dong, J., Tan, J., Deng, J., Li, S., Gao, Z., Wang, H., Su, Z., Sumalee, A., Zhong, R. (2025). FlightGPT: Towards Generalizable and Interpretable UAV Vision-

and-Language Navigation with Vision-Language Models. arXiv. Retrieved from: https://arxiv.org/html/2505.12835v1.

15. Zhan, Y., Xiong, Z., Yuan, Y. (2024). SkyEyeGPT: Unifying Remote Sensing Vision-Language Tasks via Instruction Tuning with Large Language Model. arXiv. Retrieved from: https://arxiv.org/html/2401.09712v1.

16. Liu, Y., Bai, J., Wang, G., Wu, X., Sun, F., Guo, Z., Geng, H. (2023). UAV Localization in Low-Altitude GNSS-Denied Environments Based on POI and Store Signage Text Matching in UAV Images. Drones. URL: https://www.mdpi.com/2504-446X/7/7/451.

Ushkarenko O., Diakonov O., Obrubov A., Sirivchuk A., Bilyuk I. DESIGN OF AN AUTOMATIC CONTROL AND NAVIGATION SYSTEM FOR UAVs WITH COMPUTER-VISION-BASED CORRECTION

Abstract. The article is devoted to the design of an automatic control and navigation system for unmanned aerial vehicles (UAVs) with trajectory correction based on computer vision. The architecture of a machine-vision system for autonomous navigation under GPS-denied conditions is considered. It is based on visual recognition of ground landmarks and multimodal data fusion from cameras and inertial sensors. The visual navigation algorithm employing the YOLOv8 object detector for recognizing key terrain landmarks and matching them with a reference topographic base map using the least-squares method is presented in detail. Methods of real-time visual data processing for determining the UAV position and orientation relative to ground objects are described. The integration of the computer-vision system with a model predictive control loop is analyzed in order to provide accurate trajectory correction based on visual observations. Special attention is paid to algorithms for fusing visual and inertial measurements using extended and unscented Kalman filters which improve the robustness of the navigation system. The presented simulation and experimental results confirm that the proposed hybrid system, which combines YOLOv8-based ground landmark detection, optical character recognition (OCR) of address plates, and data fusion in a Kalman filter, provides stable UAV positioning in the absence of a GPS signal with an error of about 10–15 m, without drift accumulation. The integration of visual navigation with a model predictive control loop with event-based activation makes it possible to reduce the computational load on onboard resources without degrading control quality. The proposed technical solutions can serve as a basis for building robust UAV navigation and control systems intended for use in GNSS-constrained urban and tactical scenarios.

***Key words**: unmanned aerial vehicles (UAVs); computer vision; GPS-denied navigation; model predictive control; adaptive control; automatic control system; YOLOv8; GPS-denied navigation; machine vision.*

© Ушкаренко О., Дьяконов О., Обрубов А., Сірівчук А., Білюк І.

Статтю прийнято до редакції 18.11.2025

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

До рубрики включено статті за тематичною спрямованістю «Транспортні технології»

UDC 656:02

MODEL OF THE TRAFFIC FLOW MANAGEMENT SYSTEM OF TWO INTERCONNECTED INTERSECTIONS

Slavych V. P., *Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Technical Service of Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: vslavich@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7882-4198;*
Voloshanskyi V. O., *Student of the Department of Transport Systems and Technical Service of Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: st8930249@kntu.edu.*

The article presents the development of a model of a traffic flow control system for two consecutively located controlled intersections of an urban street and road network based on a discrete-cellular approach. The study is aimed at ensuring such a control mode in which a formed group of vehicles approaching the first intersection, after turning on the permitted signal, can overcome the second intersection without stopping also at the permitted signal. The model takes into account the width of the intersections, the distance between them, the number of vehicles in the group, their speed of movement and the logic of changing traffic light phases. The time dependencies for each vehicle within the group are analyzed and generalized formulas for determining the durations of the permitted and prohibited phases for both intersections are obtained. The proposed approach allows one to determine traffic light cycles in such a way as to avoid delays and excessive accumulation of vehicles at the second intersection, which is especially important in conditions of urban traffic flows with high intensity. The use of a cellular model allows one to visually reproduce the movement of cars, monitor their positions at any given time, and assess the impact of regulation parameters on the overall throughput. The developed model can be used to optimize the operation of controlled intersections, set fixed traffic light modes, and also as a basis for creating more complex adaptive control systems. The results obtained are practically significant for designing transport schemes, improving road infrastructure, and reducing congestion in the urban environment.
Key words: *traffic flow; road traffic; intersection; traffic flow control system; traffic signal; intersection capacity; transport network.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.091-099

Introduction. Traffic light control systems are usually divided into two main types: systems with fixed parameters (so-called "hard" control) and adaptive systems that can change their modes depending on the current traffic situation.

Rigid control involves operating traffic lights on a predetermined cycle. The signals are switched at constant time intervals, without taking into account actual traffic volume or other dynamic factors (e.g., diurnal traffic fluctuations). This approach is typically used at intersections with predictable and relatively steady traffic flow.

Intelligent (adaptive) control, on the contrary, is capable of changing the duration of the phases in real time. For this purpose, various types of sensors are used – video cameras, induction loops, acoustic sensors and other devices that monitor traffic and pedestrian flows. The obtained data are processed by optimization algorithms that form the most efficient time structure of the traffic light cycle.

Compared to traditional systems, adaptive solutions provide a number of advantages:

Increased throughput: Flexible phase settings reduce latency and reduce the likelihood of congestion.

Rational use of energy. Optimizing traffic light operating modes during periods of light traffic helps reduce energy consumption.

Quick response to changes. The system quickly adjusts modes when traffic intensity changes, making control more efficient and stable.

Thus, adaptive traffic light systems are a more modern and effective traffic management tool, especially in conditions of heavy urban traffic and a complex network of intersections.

One of the problems of urban intersections in the case of tight control is such a parameter as the number of vehicles that manage to pass during the time of the permitted traffic light signal. This parameter is important for the efficiency of the traffic light. This parameter can be critical in urban

conditions, where a large number of cars can create traffic jams if the time devoted to traffic is insufficient to allocate all vehicles.

With tight traffic light management, it is important to ensure that the time allocated to traffic is sufficient to avoid congestion and ensure smooth traffic flow. This may require careful adjustment of traffic light cycle times, taking into account peak loads and interactions with other traffic lights on the route.

Therefore, the development and implementation of traffic flow management systems at intersections that allow for the number of vehicles that can pass during the permitted time of the traffic light signal is an important task. Balanced traffic light management allows for optimizing traffic flow in the city, reducing carbon emissions and waiting times, contributing to the overall efficiency of the transport infrastructure.

Analysis of recent achievements and publications. Recent studies on traffic light control show a gradual shift from classical methods with rigid regulation to adaptive and intelligent approaches. Some works take into account the impact of external factors, such as vehicle emissions, on the urban environment [1]. However, they do not provide specific solutions for organizing continuous movement of groups of vehicles through several interconnected intersections, which limits their practical effectiveness.

Classical models with fixed parameters of traffic lights [2, 3] are used as basic optimization tools, but their effectiveness is limited in variable traffic flows and peak loads. They do not take into account the accumulation of vehicles at subsequent intersections and do not allow for precise control of the movement of a specific group of vehicles.

Systems based on simulations and intelligent controllers [4] allow for the evaluation of different control strategies under controlled conditions but are mostly tested in simulations or limited scenarios. Adaptive control methods using reinforcement learning [5, 6 and 10] make it possible to take into account the relationships between intersections and optimize flows, but they rarely provide accurate control of a specific group of cars and do not reproduce the visual position of cars at each moment in time.

Multi-agent and deep models [7–9] allow for the coordination of intersections on a network scale, but their testing is mostly limited to simulations, which reduces practical effectiveness in specific urban conditions. Review works [11, 12] emphasize the problems of scaling and integrating new approaches into real control systems.

It is these limitations that justify the need to create a model that allows synchronizing the phases of traffic lights at two consecutive intersections, ensuring continuous movement of formed groups of cars and increasing the throughput of the transport system.

Goal and problem statement. The purpose of this work is to create such a model of a traffic light control system for a system of two regulated intersections located one after the other, which allows a fixed group of cars from the traffic flow approaching the first intersection, after turning on the permitted traffic light signal at this intersection, to cross it at the permitted signal when moving to the second intersection.

Presentation of the main research material. To build the specified model, we will use a discrete-cell model of the transport network [13–15]. A similar approach can be attributed to a type of cellular automata (CA) – Block-sequential CA (or partitioned CA), in which the updating of cell states occurs in portions and sequentially in blocks. The essence of this approach is to cover the transport network with cells that can take two states, which are indicated by either black or white coloring of the cell and mean, respectively, that a car is located in this cell or there is none.

Movement through the network occurs by conditional “jumping” of cars from a cell to a neighboring cell, which is indicated by the corresponding coloring. Moreover, it should be noted that movement is possible only in free cells, that is, if it is necessary to move a certain car to a certain cell, then if it is black, you should wait until it becomes white and only after that it will be possible to carry out the movement itself.

This rule ensures that conflicts between vehicles are avoided and allows the model to reproduce basic patterns of traffic flow behavior.

Consider a transport network that is a system of two intersections located one after the other, each of which we will call "intersection 1" and "intersection 2", respectively. Such a configuration is typical for urban street networks, where closely spaced intersections often significantly influence each other due to the propagation of queues and changes in signal phases.

On the main approach to intersection 1, consider a group of cars of a fixed number, assuming that their arrival rate remains constant during the observation period, which allows us to analyze traffic dynamics under controlled and repeatable conditions.

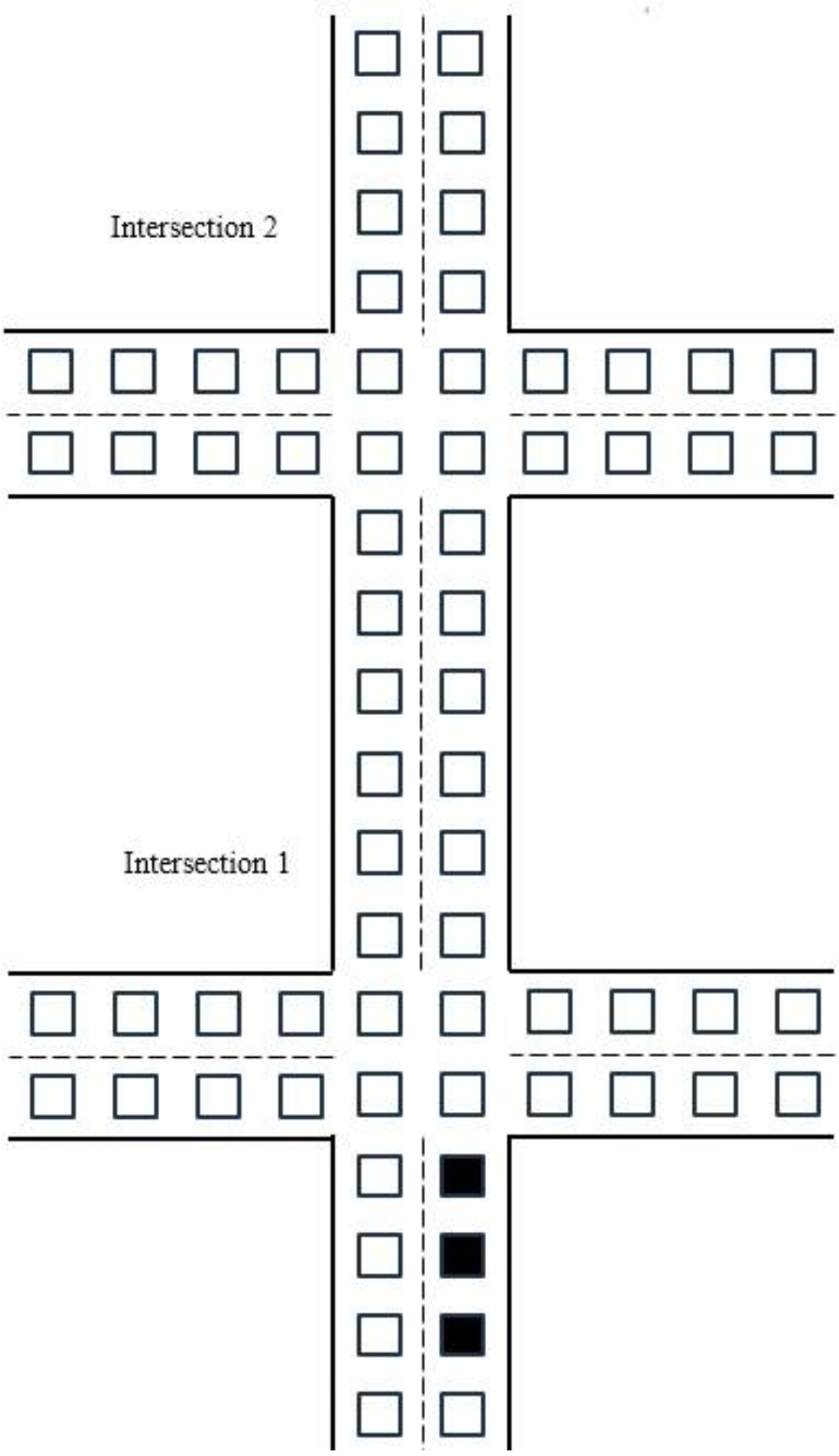


Figure 1 – Cellular model of a transport network with two intersections, located one after another

The control process begins at some initial moment in time. Let us assume that at this moment the specified group of cars is already located on the approach.

Let us assume that both intersections are equipped with traffic lights operating in two-phase modes.

For the convenience of further discussion, we will consider only the durations of traffic light phases without dividing them into main and intermediate cycles. If for practical application it is necessary to establish specific cycle values, then it will be necessary to subtract the corresponding recommended fixed values of intermediate cycles from the phase duration values to obtain the values of the durations of the main cycles.

Let us introduce the necessary input parameters of the model, which are shown in Table 1.

Table 1 – Model parameters

№	***Designation parameter***	***Parameter name***	***Unit measurement parameter***
Model input parameters			
1	t_0	Initial time	units of time
2	k	Number of cars in the group	units
3	T_C^1	Duration of the first intersection cycle	units of time
4	T_{F1}^1	Duration of the first (permitted) phase the first intersection	units of time
5	T_{F2}^1	Duration of the second (forbidden) phase the first intersection	units of time
6	T_C^2	Cycle duration of the second intersection	units of time
7	T_{F1}^2	Duration of the first (forbidden) phase second intersection	units of time
8	T_{F2}^2	Duration of the second (permitted) phase second intersection	units of time
9	$L_{1\text{-}2}$	Distance (in cells) between intersections	units
10	S_p	Width of each intersection (in cells)	units
11	Δt	The time it takes for one car to move from one cell to the next	units of time

Since, as it was established, at the initial moment of time at the first intersection the permitted signal for the forward direction is turned on, then at the same time at the second intersection the prohibited signal for the same direction should be turned on. And it will work until the first car from the group reaches the second intersection.

Let's find how long it takes from the start of the countdown to turn on the permitted signal at the second intersection, in other words, let's find the duration of the prohibited phase of intersection 2:

$$T_{F1}^2 = \left(S_p + L_{1-2}\right) \cdot \Delta t \, .$$

Next, we determine the duration of the allowed phase of the first intersection – it is equal to the time it takes for the last car in the group to leave intersection 1. To obtain this value, we create a schematic table that clearly shows the change in the position of the cars and the corresponding time spent on this. Let us consider the case when $S_p = 2$.

Table 2 – Change in the position of cars on the network and the corresponding time spent it's time in the case of $S_p=2$

№	*Position of cars on a fragment of the transport network*	*Time to reach position*
1		0
2		Δt
3		$2\Delta t$
4		$3\Delta t$
5		$4\Delta t$
6		$5\Delta t$
7		$6\Delta t$
8		$7\Delta t$

As can be seen from Table 2, for one car the time to leave the intersection zone 1 in the case of $S_p=2$ is 3 Δt , for the second car 5 Δt , for the third – 7 Δt . Reasoning similarly, it is clear that for *the* k -th car this time will be $(2k+1)\Delta t$.

Let us find similar quantities at $S_p=3$. They will be respectively:

$$\begin{cases} 1 \to 4\Delta t \\ 2 \to 6\Delta t \\ 3 \to 8\Delta t \\ \dots \\ k \to (2k+2)\cdot\Delta t \end{cases}.$$

Then, for an arbitrary value of the intersection width S_p, these values will be respectively equal to:

$$\begin{cases} 1 \to (S_p+1)\cdot\Delta t \\ 2 \to (S_p+3)\cdot\Delta t \\ 3 \to (S_p+5)\cdot\Delta t \\ \dots \\ k \to (S_p+2k-1)\cdot\Delta t \end{cases}.$$

Therefore, the duration of the allowed phase of intersection 1 is:

$$T_{F1}^{1} = (S_p+2k-1)\cdot\Delta t.$$

Next, we will determine the duration of the permitted phase of intersection 2. It will be equal to the time it takes for the last *k* – th car of the group to leave the intersection zone 2. This value conventionally consists of two parts, the first of which is equal to the time it takes for the *k-th* car to cover the distance from its current location on the network at the moment when the permitted phase of intersection 2 begins to operate, and the time it takes to cover the zone of intersection 2 itself.

To find out the position of the *k-th* car of the group in the system, we will perform inductive reasoning.

If *k =1* , then it is obvious that the duration of the permitted phase of intersection 2 is equal to the time the car leaves the intersection zone, i.e.:

$$T_{F2}^{2}|_{k=1} = \left(S_p + 1\right) \cdot \Delta t.$$

For *k = 2* we get:

$$T_{F2}^{2}|_{k=2} = \left(S_p + 3\right) \cdot \Delta t.$$

At *k =3* we have:

$$T_{F2}^{2}|_{k=3} = \left(S_p + 5\right) \cdot \Delta t.$$

Then for an arbitrary value of *k* the duration of the allowed phase of intersection 2 will be determined by the expression:

$$T_{F2}^{2} = \left(S_p + 2k - 1\right) \cdot \Delta t.$$

Then the complete traffic light cycle for intersection 2 is:

$$T_C^2 = T_{F1}^2 + T_{F2}^2 =$$

$$= \left(S_p + L_{1-2}\right) \cdot \Delta t + \left(S_p + 2k - 1\right) \cdot \Delta t =$$

$$= \left(2S_p + L_{1-2} + 2k - 1\right) \cdot \Delta t.$$

Considering that for the coordinated operation of the system of two intersections, it is necessary to fulfill the following condition:

$$T_C^1 = T_C^2.$$

Then, the complete traffic light cycle for intersection 1 will be determined using the system:

$$\begin{cases} T_{F1}^1 = T_{F2}^2 = \left(S_p + 2k - 1\right) \cdot \Delta t \\ T_{F2}^1 = T_{F1}^2 = \left(S_p + L_{1-2}\right) \cdot \Delta t \\ T_C^1 = T_{F1}^1 + T_{F2}^1 = \left(S_p + 2k - 1\right) \cdot \Delta t + \left(S_p + L_{1-2}\right) \cdot \Delta t = \\ = \left(2S_p + L_{1-2} + 2k - 1\right) \cdot \Delta t\ . \end{cases}$$

Let us consider a numerical example of the application of the proposed model.

Let the studied intersection system have the following input characteristics:

1) the length between intersections is – 1000 m;
2) the width of the intersection is – 35 m;
3) the dynamic dimension of vehicles in aggregate units is – 4 m;
4) the average speed of cars is – 45 km/h;
5) the number of cars in the group is – 20.

To apply the model, it is necessary to transform the input parameters to the parameters specified in Table 1. The results of the transformations are presented in Table 3.

Table 3 – Model input parameters

№	*Designation parameter*	*Value*	*Unit measurement parameter*
Model input parameters			
1	k	20	units
2	$L_{1\text{-}2}$	=1000/4=250	units
3	S_p	=[35/4]+1=9	units
4	Δt	=(5/45)*3,6=0,4	sec

Let's calculate the values of the durations of phases and traffic light cycles using the formulas above:

$$\begin{cases} \begin{cases} T_{F1}^1 = [(9 + 2 \cdot 20 - 1) \cdot 0{,}4] + 1 = 20 \text{ (sec)} \\ T_{F2}^1 = [(9 + 250) \cdot 0{,}4] + 1 = 104 \text{ (sec)} \\ T_C^1 = T_{F1}^1 + T_{F2}^1 = 20 + 104 = 124 \text{ (sec)} \end{cases} \\ \begin{cases} T_{F1}^2 = T_{F2}^1 = 104 \text{ (sec)} \\ T_{F2}^2 = T_{F1}^1 = 20 \text{ (sec)} \\ T_C^2 = T_{F1}^1 + T_{F2}^1 = 104 + 20 = 124 \text{ (sec)} . \end{cases} \end{cases}$$

The results of the calculations are presented in the form of Table 4.

Table 4 – Model output parameters

№	*Designation parameter*	*Value*	*Unit measurement parameter*
Model output parameters			
1	T_C^1	124	sec
2	T_{F1}^1	20	sec
3	T_{F2}^1	104	sec
4	T_C^2	124	sec
5	T_{F1}^2	104	sec
6	T_{F2}^2	20	sec

Conclusions. Thus, the paper proposes the development of a traffic flow control system model for two interconnected controlled intersections, based on a discrete- cell description of the transport network. Formulas for determining the duration of traffic light phases at each intersection depending on the number of vehicles in the group, the width of the intersections, the travel time between cells and the distance between the intersections are obtained. It is shown that by means of phase synchronization it is possible to ensure the unhindered passage of the formed group of vehicles through the second intersection without waiting, which allows to increase the throughput and reduce the volume of queue accumulation. The proposed model is suitable for use in urban traffic conditions and can serve as the basis for further improvement of traffic light control systems within the framework of both rigid and adaptive control.

Prospects for further research. Further research can be aimed at expanding the model by taking into account the variable intensity of the traffic flow, stochastic traffic parameters and the

non-constant structure of groups of cars. It is also relevant to apply the model in conditions of multi-lane traffic, the presence of turning flows and different traffic light operating programs. A promising direction is the integration of the discrete- cell model with adaptive control algorithms based on data from sensors or video surveillance to ensure automatic adjustment of the duration of phases in real time. In addition, it is advisable to develop software for modeling the operation of a group of interconnected intersections and conduct a comparative analysis of the effectiveness of synchronized modes in real urban conditions.

REFERENCES

1. Zabyshnyi, Y. O., Semchuk, Y. M., Melnyk, V. M., Dolishniy, B. V. (2016). Influence of exhaust for air condition in cities. *The Scientific Heritage*. Vol. 1, No. 3(3). P. 28–34. https://www.scientific-heritage.com/wp-content/uploads/2020/09/VOL-1-No-3-3-2016.pdf.

2. Shevchenko, V. V. (2022). Substantiation of the effective direction of development of traffic light control systems with rigid regulation cycles. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*. Vol. 16, No. 2. P. 110–119. https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-16-2-110-119.

3. Sabar, N. R., Kieu, L. M., Chung, E., et al. (2017). A memetic algorithm for real world multi-intersection traffic signal optimisation problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence.* No. 63. P. 45–53. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.04.021.

4. Jin, J., Ma, X., & Kosonen, I. (2017). An intelligent control system for traffic lights with simulation-based evaluation. *Control Engineering Practice*. No. 58. P. 24–33. https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.09.009.

5. Mladen Miletić, Edouard Ivanjko, Martin Gregurić, Krešimir Kušić. (2022). A review of reinforcement learning applications in adaptive traffic signal control. *IET Intelligent Transport Systems.* Vol. 16, Issue10. P. 1269–1285.
https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/itr2.12208.

6. Lee, J., Chung, J., Sohn, K. (2020). Reinforcement learning for joint control of traffic signals in a transportation network. IEEE Trans. Veh. Technol. Vol. 69, Issue 10. P. 1375–1387. https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2962514.

7. Jin, J., Ma, X. (2018). Hierarchical multi-agent control of traffic lights based on collective learning. *Eng. Appl. Artif. Intell.* Vol. 68. P. 236–248. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.10.013.

8. Xiaoyuan Liang; Xunsheng Du; Guiling Wang; Zhu Han. (2019). A deep reinforcement learning network for traffic light cycle control. *IEEE Trans. Veh. Technol.* Vol. 68, Issue 2. P. 1243–1253. https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2890726.

9. Martin Greguri´c, Miroslav Vuji´c, Charalampos Alexopoulos, Mladen Mileti´c. (2020). Application of deep reinforcement learning in traffic signal control: An overview and impact of open traffic data. *Applied Sciences.* Vol. 10, Issue 11. 4011. https://doi.org/10.3390/app10114011.

10. Shantian Yang, Bo Yang, Hau-San Wong, Zhongfeng Kang. (2019). Cooperative traffic signal control using multi-step return and off-policy asynchronous advantage actor-critic graph algorithm. *Knowledge Based Syst.* Vol. 183, 104855. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.07.026.

11. Qadri, S.S.S.M., Gökçe, M. A. & Öner, E. (2020). State-of-art review of traffic signal control methods: challenges and opportunities. *Eur. Transp. Res. Rev.* Vol. 12, No. 55. https://doi.org/10.1186/s12544-020-00439-1.

12. Hao Wei, Guanjie Zheng, Victor Gayah, Zhenhui Li. (2019). A survey on traffic signal control methods. *arXiv*. arXiv:1904.08117. https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.08117.

13. Slavych, V. P., Savchenko, M. O. (2024). Criteria-based model of road transport traffic control. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Automobile and tractor manufacturing.* No. 2. P. 65–70. https://doi.org/10.20998/2078-6840.2024.2.08.

14. Slavych, V. P., Savchenko, M. O. (2024). Model of control of traffic light parameters depending on the installed capacity. *Bulletin of KhNTU*. No. 3(90). P. 118–122. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.15.

15. Slavych, V. P., Savchenko, M. O. (2024). Model of a four-phase traffic flow control system. *Scientific Bulletin of the KhDMA*. No. 28. P. 196–204. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.196-204.

Славич В. П., Волошанський В. О. МОДЕЛЬ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМ ПОТОКОМ ДВОХ ВЗАЄМОПОВ'ЯЗАНИХ ПЕРЕХРЕСТЬ

У статті представлено розробку моделі системи управління транспортним потоком для двох послідовно розташованих регульованих перехресть міської вулично-дорожньої мережі на основі дискретно-клітинкового підходу. Дослідження спрямоване на забезпечення такого режиму управління, за якого сформована група транспортних засобів, що знаходиться на підході до першого перехрестя, після ввімкнення дозволеного сигналу може без зупинок подолати друге перехрестя також на дозволений сигнал. Модель враховує ширину перехресть, відстань між ними, кількість автомобілів у групі, швидкість їх переміщення та логіку зміни світлофорних фаз. Проаналізовано часові залежності для кожного автомобіля всередині групи та отримано узагальнені формули визначення тривалостей дозволених і заборонених фаз для обох перехресть. Запропонований підхід дозволяє визначати світлофорні цикли так, щоб уникнути затримок та надмірного накопичення транспортних засобів на другому перехресті, що особливо важливо в умовах міських транспортних потоків із високою інтенсивністю. Використання клітинкової моделі дає змогу наочно відтворювати рух автомобілів, контролювати їх позиції в кожний момент часу та оцінювати вплив параметрів регулювання на загальну пропускну здатність.

Розроблена модель може бути використана для оптимізації роботи регульованих перехресть, налаштування фіксованих режимів світлофорів, а також як основа для створення більш складних адаптивних систем керування. Отримані результати є практично значущими для проєктування транспортних схем, удосконалення дорожньої інфраструктури та зменшення заторів у міському середовищі.

Ключові слова: *транспортний потік; дорожній рух; перехрестя; система управління транспортним потоком; світлофорна сигналізація; пропускна здатність перехрестя; транспортна мережа.*

© Slavych V. P., Voloshanskyi V. O.

Статтю прийнято до редакції 30.11.2025

УДК 629.113.012//017

ПЕРЕДУМОВИ МОДИФІКАЦІЇ СТРУКТУРИ АВТОМОБІЛЬНИХ ГАЛЬМОВИХ МЕХАНІЗМІВ ДИСКОВОГО ТИПУ

Проценко В. О., *д.т.н., професор, професор кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: 1904pvo@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3468-4952;*
Русанов С. А., *к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: ohvpbm@i.ua, ORCID: 0000-0002-1003-4867;*
Шикарєв Г. Г., *студент Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: glibshikarev@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2797-5459.*

Стаття присвячена аналізу передумов модифікації структури автомобільних гальмових механізмів дискового типу. Показано, що підвищення технічного рівня гальмових механізмів можна забезпечувати двома основними шляхами – матеріалознавчим та конструктивним. Перший направлено на підвищення фізичних показників матеріалів тертьових поверхонь, реалізується технологіями зміцнення існуючих матеріалів та створенням нових, зокрема композитних. Другий шлях направлено на забезпечення рівномірного розподілу навантаження між елементами механізму, зокрема гальмовими колодками та дисками/барабанами. Виконано структурний аналіз гальмового механізму легкового автомобіля показав, що він містить 7 незалежних контурів в яких розташовано 15 надлишкових зв'язків. Аналіз впливу надлишкових зв'язків демонструє, що вони здатні чинити суттєвий вплив на роботу механізму. Зокрема, обмеження обертальних рухомостей колодок перешкоджають їх самовстановленню по дисках, що, разом із нерівномірним зношуванням, може стати причиною збільшення нерівномірності розподілу навантаження між ними. Це в свою чергу може призвести до коливання моменту тертя колісних механізмів, яке спричиняє рискання автомобіля при гальмуванні. Надлишкові зв'язки можуть також призводити до позаштатного навантаження елементів механізму, зокрема складання та роботи з непередбаченими натягами, що не підвищує якості роботи гальмових механізмів. Наявність надлишкових зв'язків на практиці нівелюють збільшенням зазорів у кінематичних парах, що призводить до запізнення спрацьовування гальм та додаткових динамічних навантажень. Отримані результати свідчать на користь доцільності модифікування структури гальмових механізмів з метою зменшення кількості чи ліквідації надлишкових зв'язків.

Ключові слова: *гальмовий механізм; автомобіль; структура; рухомість; надлишковий зв'язок.*

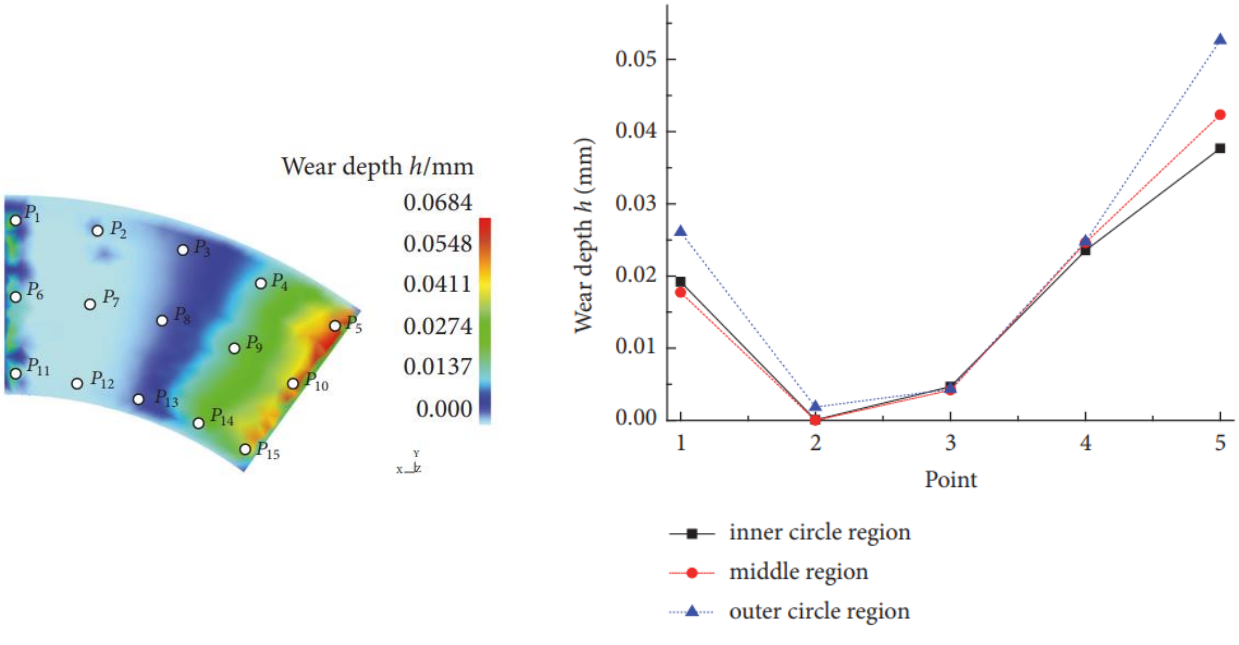
DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.100-109

Вступ. Гальмування автомобіля є одним із найбільш небезпечних режимів його руху, оскільки при цьому можливий його вихід за межі коридору, ширину якого встановлено у 3,5 м [1], що може призвести до аварії, зокрема зіткнення з іншим автомобілем. Аналіз гальмівних діаграм, отриманих на автомобілі категорії M_1 із застосуванням GPS-систем, дав можливість встановити, що на початкові процесу гальмування ($t = 0$) поперечне сповільнення a_l має ненульове від'ємне значення, тобто початкова поперечна швидкість автомобіля теж ненульова, а з початком гальмування починає міняти напрямок. Поперечне сповільнення a_l при гальмуванні міняє свою величину та знак періодично, причому період збільшується з 0,2 с на початку процесу до 0,5 с у кінці, а амплітуда спочатку збільшується, а потім зменшується. Зміна повздовжнього a_f та поперечного a_l прискорень відбувається в одній фазі, тобто поперечне прискорення також залежить від інтенсивності роботи гальмових механізмів. Щодо аналізу причин такого характеру протікання процесу гальмування, то причиною періодичної зміни поперечного прискорення a_l і відтак рискання автомобіля при гальмуванні може бути періодичне зростання моменту тертя колісних гальмових механізмів по колодках, причини чого належить проаналізувати.

Аналіз публікацій. Значна кількість наукових досліджень, опублікованих в останній час, присвячена дослідженню, методам та засобам підвищення зносостійкості елементів гальмових механізмів матеріалознавчими та конструктивними методами.

У роботі [2] виконано експериментальне дослідження зносостійкості гальмових колодок чотирьох поширених на нігерійському ринку брендів. Було відібрано фізичні зразки фрикційного матеріалу колодок (тильна пластина + фрикційний шар), виміряно твердість за методом Брінеля, виконано трибовипробування на стенді: визначали коефіцієнт тертя та зносу при заданому навантаженні і швидкості. За результатами експериментів було застосовано статистичне моделювання з використанням розподілу Вейбулла для оцінки очікуваного життєвого ресурсу колодок кожного бренду. Результати вказали на значні міжбрендові відмінності: твердість, коефіцієнт тертя та інтенсивність зносу колодок були суттєво різними. Моделювання дало можливість виконувати кількісні оцінки ресурсу (наприклад – ймовірність досягнення заданого пробігу). Подібні дослідження були виконані в Україні – у роботі [3] було проведено дослідження ефективності роботи дискового гальмового механізму автомобіля «Hyundai Accent» за допомогою моделювання різних режимів роботи руху автомобіля на випробувальних стендах. Моделювання виконувалось з використанням гальмових колодок для передніх дискових гальм автомобіля «Hyundai Accent», від різних виробників. Отримані результати свідчать, що залежно від виробника показники зношування гальмових колодок та дисків, а також величина гальмівного моменту суттєво відрізняються. Робота [4] присвячена дослідженню перспектив використання функційно-градієнтного ковкого чавуну (FGDI) як матеріалу для гальмових колодок з метою підвищення їх зносостійкості. Методика містила два етапи: контрольовані трибологічні тести у лабораторних умовах, щоб виявити механізми зносу та оцінити коефіцієнти тертя, а також стендові випробування на дискових машинах тертя, які імітували реальні умови гальмування досліджуваних пар тертя при різних температурах. Мікроскопічний аналіз поверхні показав формування графітових плато на колодках та плівки переносу на дисках. Встановлено, що матеріал FGDI із функційним градієнтом демонстрував вищу зносостійкість, стабільніший коефіцієнт тертя та меншу чутливість до температурних змін. У дослідженні [5] проаналізовано зв'язок між зносом гальмових колодок і дисків та ефективністю роботи гальмової системи автомобіля. Методика включала польові випробування на автомобілі (експлуатація в інтенсивному/помірному режимі) і стендові випробування на динамометричному стенді. У процесі виконання досліджень вимірювали товщину фрикційного матеріалу колодок (наприклад, передні колодки зносилися з 13 мм до майже 10 мм після 18,5 тис. км пробігу), а також гальмівну силу, та оцінювали ефективність роботи гальмової системи у % (як відношення гальмівної сили до маси автомобіля). Встановлено, що ефективність роботи гальмової системи після 18,5 тис. км пробігу у міському режимі становила близько 59 %, а після заміни дисків і колодок її ефективність зросла до 72 %. Таким чином показано, що знос колодок/дисків має суттєвий вплив на ефективність роботи гальмової системи. У роботі [6] розглянуто трибовластивості та знос фрикційних пар «диск-колодка» на лабораторному стенді. Проаналізовано кілька типів матеріалів колодок і дисків (типи A, B, C, D, E, F) у температурному діапазоні 100…450°C з кроком 50°C. Метою було встановити, як склад фрикційного матеріалу впливає на знос диска та зміну коефіцієнта тертя під температурними режимами. Встановлено, що співвідношення максимального до мінімального зносу диска варіювалося від 6,0 до 10,0 залежно від матеріалу. При 800 та 1000 циклах гальмувань і температурі 100…250 °C / 100…450 °C відповідні коефіцієнти становили 7,6 і 14,0. Таким чином показано, що традиційні матеріали колодок (типи A-D) призводять до більш високого зносу диска у другому температурному режимі, а матеріали E і F є більш стабільними. Рекомендовано підбирати склад колодок з урахуванням впливу на диск та тепловий режим. У роботі [7] пропонується метод впливу на зносостійкість гальмових дисків ультразвуковими коливаннями під час лиття заготовок для них (частота 20 кГц і 25 кГц) для покращення його фрикційно-зносостійких властивостей. При виконанні стендових досліджень використовували давачі тиску, швидкості, температури, щоб виміряти середній коефіцієнт тертя та його стабільність під різними умовами гальмування. Результати свідчать, що диски, виготовлені із застосуванням ультразвукової обробки, показали кращу стабільність властивостей і знижену швидкість зносу у порівнянні зі стандартними. Слід

відзначити, що застосування додаткової обробки при виготовленні заготовок збільшуватиме вартість дисків та відтак вартість експлуатації машини. Робота [8] містить результати експериментального вивчення формування DTV (Disc Thickness Variation) у лабораторних умовах залежно від режимів навантаження, конструкції супорта та температури. Тут представлені результати стендових випробувань з імітацією колісного вузла та два типи супортів, кількість циклів гальмування становила 500…5000, а контактні тиски сягали 1,2…2,8 МПа. Вимірювання DTV виконано на кількох радіусах, зафіксована швидкість наростання DTV – на початковій фазі роботи становить 6…12 мкм/1000 циклів, на пізній – 1…3 мкм/1000 циклів. Дослідження зносу в радіальному напрямку показало, що максимальні амплітуди DTV локалізовані в секторі радіуса, де охолодження найгірше. Показано, що основний механізм зношування дисків – комбінований адгезійно-абразивний із локальною пластичною деформацією. Тиск супорта розподіляється на деталях нерівномірно, що корелює з DTV, а за нерівномірності тиску >20% амплітуда DTV зростає в 1,8…2,6 раза. Показано, що практичне зниження DTV можливе при балансуванні тиску і покращенні теплообміну. Стаття [9] містить аналіз процесів тертя і зношування пари диск-колодка на режимах високого навантаження (рис. 1). Тут встановлено, що максимальна локальна глибина зносу колодки в моделі виникли на критичних ділянках (кромки поверхонь тертя), інтенсивність зношування швидко наростає у початковій фазі роботи, потім темп знижується, радіальний знос зменшується від зовнішньої до внутрішньої кромки (через лінійне зростання колової швидкості зі збільшенням радіуса). Відповідними наслідками є те, що несиметричний розподіл контактного тиску по дисковій та локальний термічний вплив ведуть до формування «гарячих кілець» по радіусу і виникнення на них DTV.



а) *б)*

Рисунок 1 – Розташування контрольних точок (а) та знос у цих точках (б) гальмової колодки, отримані в результаті розрахунку [9]

Дослідження [10] містить оцінку впливу DTV та OOR (некруглості) на роботу електромеханічних гальм (EMB). Використано аналітичні моделі на імітаційній моделі гальма, що включає жорсткість мотор-редуктора EMB, а також експерименти на стенді зі штучно введеними похибками. Показано, що поріг критичної шкідливості DTV для EMB виявився нижчим, ніж для класичних гідравлічних супортів, зокрема при DTV > 36 мкм спостерігаються помітні додаткові динамічні навантаження на мотор-редуктори та підвищене навантаження на підшипники. OOR у межах сотих долей міліметра формує неоднорідний контакт по радіусу, що сприяє локалізації зносу, що веде до утворення періодичних радіальних кіл/сегментів з більшим зносом. Тому для EMB потрібно жорсткіше

контролювати допуски DTV/OOR, а відтак для них особливо важливим є підвищення ресурсу. Робота [11] розглядає явище «подвійного» або клиноподібного зносу гальмових колодок у системах гальмування вантажних залізничних вагонів. Виявлено, що пристрої для забезпечення рівномірного зносу колодок часто ушкоджені, тому колодки у вагонних гальмах зазнають клиноподібного зносу: верхні краї більше навантажені, і стикаються з колесом навіть у незагальмованому стані гальмування. Це створює додаткове тертя, пришвидшує знос і порушує його рівномірність. Дослідження [12] зосереджене на статистичній обробці геометричних параметрів зносу гальмових колодок модернізованих систем гальмування вантажних вагонів. За рахунок збору даних із контрольних пунктів станцій техобслуговування, побудовано графіки залежностей зносу колодок від пробігу із застосуванням статистичних методів. Результати показали, що після модернізації систем гальмування із впровадженням удосконалених заходів забезпечення рівномірності зносу, ресурс колодок збільшився приблизно до 2,6 разів. Таким чином доведено, що підвищення рівномірності зносу конструктивними методами веде до суттєвого зростання ресурсу.

Постановка проблеми. Таким чином, ресурс гальмових колодок та дисків можна крім матеріалознавчих методів забезпечити підвищенням рівномірності зношування цих елементів, що залежить у тому числі від рівномірності тиску в зоні контакту. Забезпечити рівномірність тиску дає можливість самовстановлюваність ланок гальмового механізму, або відсутність у ньому надлишкових зв’язків. У роботах [13, 14] проаналізовано наявність та вплив надлишкових зв’язків на роботу гальмових механізмів вантажопідйомних машин. Розглянуто механізми дискового та барабанного типів і показано, що більшість наявних надлишкових зв'язків є кутовими, вони вимагають високої точності виготовлення деталей гальм та їх складання, а також контролю параметрів в експлуатації. Компенсація наявності надлишкових зв'язків зазвичай виконується збільшенням зазорів у кінематичних парах, що призводить до запізнення спрацьовування гальм, а також виникнення динамічних навантажень при роботі. Частина надлишкових зв'язків унеможливлює самовстановлення гальмових колодок по дисках чи барабанах. За наявності биття диска це може стати причиною коливання величини гальмівного моменту під час гальмування та опору обертанню дискові чи барабану при розгальмованому гальмі. Для гальмових механізмів автомобілів досліджень структури механізмів знайти не вдалося, що формує умови для наступних наукових розвідок.

Метою роботи є аналіз структурної досконалості гальмового механізму автомобільного гальма дискового типу та огляд перспектив для забезпечення самовстановлюваності ланок механізму та рівномірності тиску гальмових колодок та дисків.

Задачі роботи:

– скласти структурну схему гальмового механізму автомобіля дискового типу;

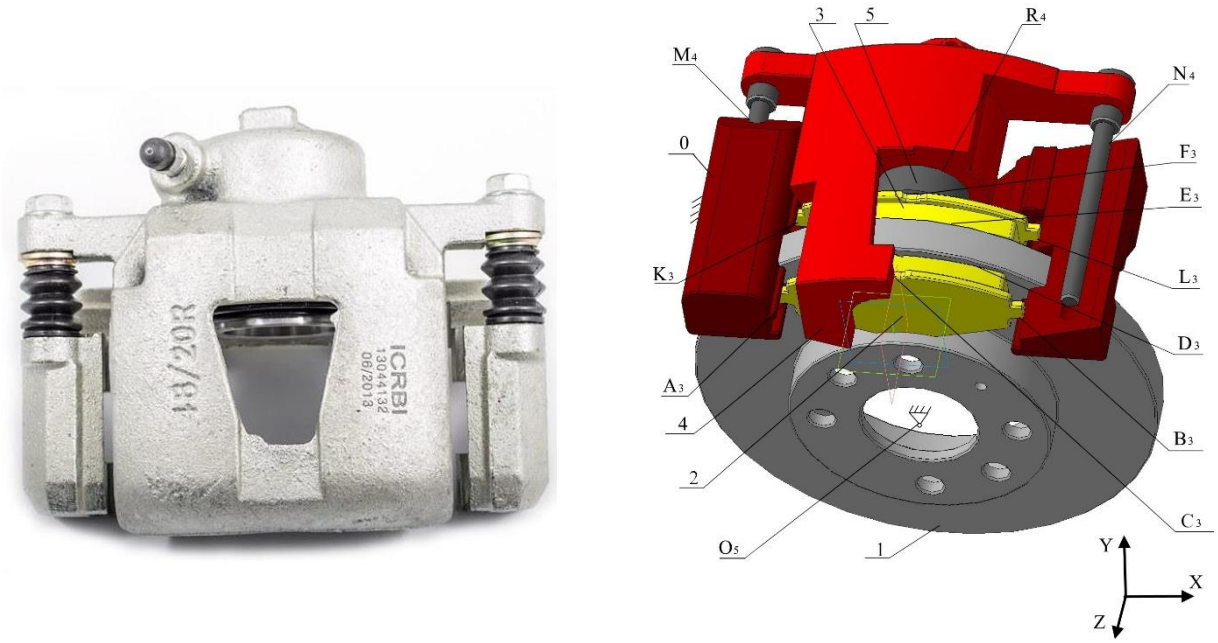
– виконати структурний аналіз, встановити кількість і розташування надлишкових зв’язків;

– оцінити можливий вплив наявних надлишкових зв’язків на роботу механізму;

– показати перспективи удосконалення гальмового механізму за рахунок виключення надлишкових зв’язків.

Виклад основного матеріалу. Далі аналізуватимемо механізм дискових гальм автомобіля «Daewoo Lanos», як типового представника таких пристроїв (рис. 2). Він містить встановлений із можливістю обертання відносно підвіски автомобіля гальмовий диск 1, зовнішню 2 та внутрішню 3 (щодо осі автомобіля) гальмові колодки, що встановлені по обидва боки від гальмового диска 1, та мають можливість переміщення вздовж його осі, а також взаємодії своїми робочими бічними поверхнями з робочою поверхнею торців диска, нерухомо встановлений відносно підвіски корпус гальмового супорта 0, у призматичні пази якого введені призматичні напрямні шипи гальмових колодок, на напрямних супорта з можливістю осьового переміщення встановлено *П*-подібну скобу гальмового супорта 4, яка із зовнішнього боку гальмового диска 1 має можливість взаємодії із неробочою бічною поверхнею зовнішньої гальмової колодки 2, а з внутрішнього боку гальмового диска 1 в

осьовий отвір скоби супорта 4, із можливістю осьового переміщення встановлено гальмовний поршень 5, що має можливість взаємодії своїм торцем з неробочою бічною поверхнею внутрішньої гальмової колодки 3.



а) *б)*

Рисунок 2 – Загальний вид (а) та структурна схема (б) колісного гальмового механізму

Описаний механізм містить n = 5 рухомих ланок (диск 1, колодки 2 та 3, скоба 4, поршень 5). Кількість кінематичних пар п'ятого класу тут становить P_5 = 1 (O_5), кінематичних пар четвертого класу P_4 = 3 (M_4, N_4, R_4), кількість кінематичних пар третього класу P_3 = 8 (A_3, B_3, C_3, D_3, E_3, F_3, L_3, K_3), пари другого та першого класів відсутні – $P_2 = P_1 = 0$.

Загальна кількість кінематичних пар:

$$P = P_5 + P_4 + P_3 + P_2 + P_1 = 1 + 3 + 8 + 0 + 0 = 12. \quad (1)$$

Сума рухомостей кінематичних пар:

$$f = 1P_5 + 2P_4 + 3P_3 + 4P_2 + 5P_1 = 1\times1 + 2\times3 + 3\times8 + 4\times0 + 5\times0 = 31. \quad (2)$$

Кількість незалежних замкнених контурів механізму за формулою Гохмана [15]:

$$k = P - n = 12 - 5 = 7. \quad (3)$$

Незалежні контури механізму: $R_4F_3E_3D_3C_3R_4$; $M_4C_3D_3O_5M_4$; $N_4C_3D_3O_5N_4$; $A_3D_3B_3A_3$; $A_3C_3B_3A_3$; $K_3F_3L_3K_3$; $K_3E_3L_3K_3$.

Ступінь рухомості механізму $W = W_b + W_l = 1 + 3 = 4$,

де W_b = 1 – основна рухомість механізму (обертання гальмового диска 1);

W_l = 3 – місцеві рухомості ланок (колодок 2 та 3, а також поршня 5).

Кількість надлишкових зв’язків механізму за формулою Сомова-Малишева [16]:

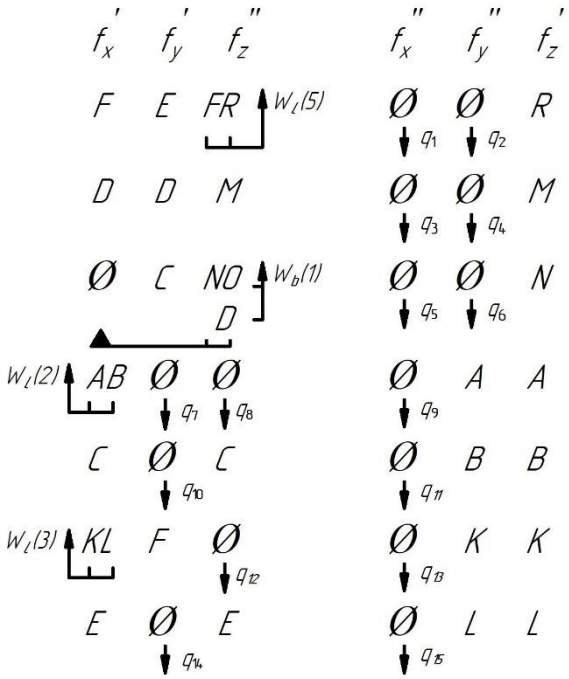
$$q_{SM} = W + 5P_5 + 4P_4 + 3P_3 + 2P_2 + P_1 - 6n = \\ = 4 + 5\times1 + 4\times3 + 3\times8 + 2\times0 + 0 - 6\times5 = 15. \quad (4)$$

Кількість надлишкових зв’язків механізму за формулою Озолса:

$$q_{OZ} = W + 6k - f = 4 + 6\times7 - 31 = 15. \quad (5)$$

Підтверджує представлені розрахунки застосування поконтурного методу (табл. 1).

Таблиця 1 – Застосування поконтурного методу для гальмового механізму

Контур	***Пласкі рухомості*** f_p	***Непласкі рухомості*** f_n
$R_4F_3E_3D_3C_3R_4$		
$M_4C_3D_3O_5M_4$		
$N_4C_3D_3O_5N_4$		
$A_3D_3B_3A_3$		
$A_3C_3B_3A_3$		
$K_3F_3L_3K_3$		
$K_3E_3L_3K_3$		
$W = 4,\ q = 15$		

Дані табл. 1 свідчать, що більшість надлишкових зв’язків дають обмеження кутових рухомостей колодок, а відтак перешкоджають їх самовстановленню по дисках (табл. 2).

Це, разом з нерівномірним зношуванням деталей може стати причиною збільшення нерівномірності розподілу навантаження між ними, що може призводити до коливання моменту тертя колісних механізмів і рискання автомобіля при гальмуванні. Надлишкові зв'язки можуть також призводити до позаштатного навантаження елементів механізму, зокрема складання та роботи з непередбаченими натягами, що не підвищує якості роботи гальмових механізмів. Наявність надлишкових зв'язків на практиці нівелюють збільшенням зазорів у кінематичних парах, що призводить до запізнення спрацьовування гальм та виникнення додаткових динамічних навантажень.

Отримані результати свідчать на користь доцільності модифікації структури механізму гальм з метою підвищення якості їх роботи, зокрема забезпечення можливості самоустановки колодок по дисках у змінних умовах експлуатації. Серед можливих напрямків ліквідації надлишкових зв'язків слід вказати підвищення класу кінематичних пар (чи застосування кінематичних з'єднань), зменшення кількості контурів механізму, а також місцевих рухомостей.

Висновки:

– складено структурну схему та виконано структурний аналіз гальмового механізму дискового типу. Показано, що механізм містить q = 15 надлишкових зв'язків, які можуть суттєво впливати на його роботу;

– показано, що наявні надлишкові зв'язки можуть стати причиною позаштатного навантаження, зокрема складання та роботи з непередбаченими натягами, а також зменшують рівномірність розподілу навантаження між ланками механізму, а відтак ресурс роботи деталей гальм, і можуть знижувати безпеку процесу гальмування транспортного засобу;

Таблиця 2 – Наслідки наявності надлишкових зв'язків у гальмовому механізмі

Надлишковий зв'язок	***Вплив наявності надлишкових зв'язків***	***Практичний спосіб нівелювання впливу надлишкових зв'язків***	***Наслідки відсутності самоустановки***
1	2	3	4
q_1	Неможливість самоустановки колодки 3 по поршню 5 (q_1), колодки 2 по скобі супорта 4 (q_3), та обох колодок по диску 2 (q_5) навколо осі X ($f_x^{''}=0$), за наявності непаралельності робочих поверхонь колодок, неперпендикулярності торця поршня до його осі, натискної поверхні скоби супорта до осі гідроциліндра.	Деформування деталей механізму в процесі його роботи.	Нерівномірний розподіл тиску в стиках ланок механізму, їх нерівномірний знос, коливання моменту тертя, що створює механізм у межах оберту колеса.
q_3			
q_5			
q_2	Неможливість самоустановки колодки 3 по поршню 5 (q_2), колодки 2 по скобі супорта 4 (q_4), та колодок по диску 2 (q_6) навколо осі Y ($f_y^{''}=0$), за наявності непаралельності робочих поверхонь колодок, неперпендикулярності торця поршня до його осі, поверхні скоби супорта до осі гідроциліндра.	Деформування деталей механізму в процесі його роботи.	
q_4			
q_6			
q_9	Неможливість самоустановки колодок 2 (q_9, q_{11}) та 3 (q_{13}, q_{15}) по гальмовому диску 1 навколо осі X ($f_x^{''}=0$), за наявності торцевого биття диска 1, нерівномірного зносу торців диска чи робочих поверхонь колодок, наявності кутових похибок розташування пазів під гальмові колодки чи шипів колодок у площині YZ	Збільшення лінійних зазорів у кінематичних парах A, B, K, L в напрямку осі Y.	Наявність монтажних напружень у гальмових колодках механізму, їх нерівномірний знос, коливання моменту тертя механізму в межах оберту колеса. Виникнення динамічних навантажень механізму через наявність зазорів.
q_{11}			
q_{13}			
q_{15}			
q_7	Неможливість складання контурів $A_3D_3B_3A_3$ (q_7), $A_3C_3B_3A_3$ (q_{10}), $K_3E_3L_3K_3$ (q_{14}) без натягу вздовж осі Y ($f_y^{'}=0$), за наявності похибок розташування пазів під гальмові колодки чи шипів колодок.		
q_{10}			
q_{14}			
q_8	Неможливість складання колодок 2, 3 зі скобою супорта 4 без натягів навколо осі Z ($f_z^{''}=0$), за наявності кутових похибок розташування пазів під гальмові колодки чи шипів колодок.		
q_{12}			

– показано, що вплив надлишкових зв'язків на практиці нівелюють збільшенням зазорів у кінематичних парах, що призводить до запізнення спрацьовування гальм та

додаткових динамічних навантажень при їх роботі, а відтак не сприяє підвищенню довговічності;

– комплексне підвищення технічного рівня гальмових механізмів дискового типу можливе матеріалознавчими та конструктивними методами, направленими на підвищення зносостійкості пар тертя та рівномірності розподілу навантаження між ними, але важливе місце в успіху реалізації матеріалознавчих методів матиме усунення надлишкових зв'язків у механізмі.

Напрямки подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на удосконалення гальмових механізмів за рахунок модифікації їх структури з метою виключення чи зменшення кількості наявних надлишкових зв'язків, особливо тих, що обмежують кутові рухомості колодок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Терміни та визначення понять. К.: Держспоживстандарт України, 2011. 31 с.

2. Fono-Tamo, R. S., Osunbor, O. O., & Koya, O. A. Weibull approach to brake pad wear analysis in the Nigerian market // *Friction*. 2015. Vol. 3, No. 3. P. 228–233. https://doi.org/10.1007/s40544-015-0088-0.

3. Бевз О. В., Магопець С. О., Матвієнко О. О. Дослідження характеристик гальмівного механізму автомобіля Hyundai Accent // *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету*. 2019. Вип. 32. С. 68–77. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).68-78.

4. Polajnar M., Kalin M., Thorbjornsson I., Thorgrimsson J. T., Valle N., & Botor-Probierz A. Friction and wear performance of functionally graded ductile iron for brake pads // *Wear*. 2017. Vol. 382–383. P. 85–94. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.016.

5. Ilie F., & Cristescu A. C. Experimental study of the correlation between the wear and the braking system efficiency of a vehicle // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, No. 14. Art. 8139. https://doi.org/10.3390/app13148139.

6. Kindrachuk M., Volchenko D., Fidrovska N., et al. Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4, No. 12(124). P. 56–61. https://doi.org/10.3390/app13148139.

7. Ge W., & Sun W. Influence of ultrasonic vibration on friction and wear performance of brake disc // *Journal of Vibroengineering / Extrica*. 2023. https://doi.org/10.21595/jve.2022.22938.

8. Backström A., et al. An experimental investigation of brake rotor DTV under laboratory conditions // *SAE Technical Paper*. 2008. No. 2008-01-2543. https://doi.org/10.4271/2008-01-2543.

9. Zhang S., Hao Q., Liu Y., Jin L., Ma F., Sha Z., & Yang D. Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake // *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. Article ID 6250694. https://doi.org/10.1155/2019/6250694.

10. Boros L., Peter S., Nowak X., Kneissl C., & Fischer P. Effects of disc thickness variation and out of roundness on electromechanical brakes // *Proceedings of Eurobrake 2023* (Barcelona, Spain). 2023. Available at: tugraz.elsevierpure.com.

11. Равлюк В. Г. Дослідження особливостей дуального зносу колодок у гальмовій системі вантажних вагонів // *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2(80). С. 111–126. https://doi.org/10.15802/stp2019/166114.

12. Равлюк В. Г., Равлюк М. Г., Кириченко І. К. Статистичне опрацювання параметрів зносу гальмових колодок вантажних вагонів // *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 2(86). С. 74–91. https://doi.org/10.15802/stp2020/203103.

13. Protsenko V., Malashchenko V., Nastasenko V., Babiy M., Voitovych O. Elevator drum-pad brake mechanisms: redundant constraints and reliability rise opportunity // *Scientific Journal of*

Silesian University of Technology. Series Transport. 2024. Vol. 125. P. 229–242. ISSN 0209-3324. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.125.15.

14. Protsenko V., Malashchenko V., Babii M., Nastasenko V., Protasov R., Brumerčík F., Macko M. Redundant constraints in crane disc brake mechanism: effect and disposal perspectives // *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina*. 2025. Vol. 29. https://doi.org/10.26552/com.C.2025.029.

15. Reshetov L. Self-aligning mechanisms. Moscow: Mir Publishers, 1986. 312 p.

16. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин. К.: Наукова думка, 2002. 660 с.

REFERENCES

1. Derzhspozhyvstandart Ukrainy (2011). *DSTU 3649:2010. Kolisni transportni zasoby. Terminy ta vyznachennia poniat [Wheeled vehicles. Terms and definitions]*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy.

2. Fono-Tamo, R. S., Osunbor, O. O., & Koya, O. A. (2015). Weibull approach to brake pad wear analysis in the Nigerian market. Friction, 3(3), 228–233. https://doi.org/10.1007/s40544-015-0088-0.

3. Bevz, O. V., Magopets, S. O., & Matviienko, O. O. (2019). Study of the characteristics of the braking mechanism of the Hyundai Accent vehicle. *Engineering in Agricultural Production, Industry Machinery, Automation. Collected Papers of the Kirovohrad National Technical University*, (32), 68–77. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2019.1(32).68-78.

4. Polajnar, M., Kalin, M., Thorbjornsson, I., Thorgrimsson, J. T., Valle, N., & Botor-Probierz, A. (2017). Friction and wear performance of functionally graded ductile iron for brake pads. Wear, 382–383, 85–94. https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.016.

5. Ilie, F., & Cristescu, A. C. (2023). Experimental study of the correlation between the wear and the braking system efficiency of a vehicle. Applied Sciences, 13(14), Article 8139. https://doi.org/10.3390/app13148139.

6. Kindrachuk, M., Volchenko, D., Fidrovska, N., et al. (2023). Wear-friction properties of friction pairs in disc-pad brakes. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(12[124]), 56–61. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285699.

7. Ge, W., & Sun, W. (2023). Influence of ultrasonic vibration on friction and wear performance of brake disc. Journal of Vibroengineering / Extrica. https://doi.org/10.21595/jve.2022.22938.

8. Backström, A., et al. (2008). An experimental investigation of brake rotor DTV under laboratory conditions. *SAE Technical Paper No. 2008-01-2543.* https://doi.org/10.4271/2008-01-2543.

9. Zhang, S., Hao, Q., Liu, Y., Jin, L., Ma, F., Sha, Z., & Yang, D. (2019). Simulation study on friction and wear law of brake pad in high-power disc brake. *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 6250694. https://doi.org/10.1155/2019/6250694.

10. Boros, L., Peter, S., Nowak, X., Kneissl, C., & Fischer, P. (2023). Effects of disc thickness variation and out of roundness on electromechanical brakes. In *Proceedings of Eurobrake 2023* (Barcelona, Spain). Available at: https://tugraz.elsevierpure.com

11. Ravliuk, V. H. (2019). Doslidzhennia osoblyvostei dualnoho znosu kolodok u halmovii systemi vantazhnykh vahoniv [Study of dual wear features of pads in the braking system of freight wagons]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress, 2*(80), 111–126. https://doi.org/10.15802/stp2019/166114.

12. Ravliuk, V. H., Ravliuk, M. H., & Kyrychenko, I. K. (2020). Statystychne opratsiuannia parametriv znosu halmovykh kolodok vantazhnykh vahoniv [Statistical processing of wear parameters of freight wagon brake pads]. *Nauka ta prohres transportu – Science and Transport Progress, 2*(86), 74–91. https://doi.org/10.15802/stp2020/203103.

13. Protsenko, V., Malashchenko, V., Nastasenko, V., Babiy, M., & Voitovych, O. (2024). Elevator drum-pad brake mechanisms: Redundant constraints and reliability rise opportunity.

Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport, 125, 229–242. https://doi.org/10.20858/sjsutst.2024.125.15.

14. Protsenko, V., Malashchenko, V., Babii, M., Nastasenko, V., Protasov, R., Brumerčík, F., & Macko, M. (2025). Redundant constraints in crane disc brake mechanism: Effect and disposal perspectives. *Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, 29.* https://doi.org/10.26552/com.C.2025.029.

15. Reshetov, L. (1986). *Self-aligning mechanisms.* Moscow: Mir Publishers.

16. Kinytskyi, Ya. T. (2002). *Teoriia mekhanizmiv i mashyn [Theory of mechanisms and machines]*. Kyiv: Naukova Dumka.

Protsenko V. O., Rusanov S. A., Shikarev G. G. PREREQUISITES FOR MODIFICATION OF THE STRUCTURE OF AUTOMOBILE DISC TYPE BRAKE MECHANISMS

The article deals with the analysis of the prerequisites for modifying the structure of automotive disc brake mechanisms. It is shown that the improvement of the technical level of brake mechanisms can be achieved through two main approaches – material-based and structural. The first approach focuses on enhancing the physical properties of the materials of the friction surfaces and is implemented through technologies for strengthening existing materials and developing new ones, particularly composite materials. The second approach aims to ensure a uniform distribution of load among the mechanism's elements, including the brake pads and discs/drums. A structural analysis of a passenger car's brake mechanism revealed that it contains seven independent circuits with fifteen redundant constraints. The analysis of the influence of these redundant constraints demonstrates that they can significantly affect the operation of the mechanism. In particular, the limitation of the pads' rotational degrees of freedom prevents their self-alignment with the discs, which, together with uneven wear, may lead to an increase in the nonuniformity of load distribution between them. This, in turn, can cause fluctuations in the friction torque of the wheel mechanisms, resulting in vehicle judder during braking. Redundant constraints may also lead to abnormal loading of the mechanism's elements, including assembly and operation under unintended stresses, which does not improve the quality of brake performance. In practice, the presence of redundant constraints is often compensated for by increasing clearances in the kinematic pairs, which leads to delayed brake actuation and additional dynamic loads. The obtained results indicate the feasibility of modifying the structure of brake mechanisms in order to reduce or eliminate redundant constraints.

Key words: *brake mechanism; automobile; structure; mobility; redundant constraint.*

© Проценко В. О., Русанов С. А., Шикарєв Г. Г.

Статтю прийнято до редакції 24.11.2025

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

MATERIALS SCIENCE

УДК 678.686:547.295:620.17

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАТОРА ТРИМЕТИЛХЛОРСІЛАНУ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ

Стухляк П. Д., *д.т.н., професор, професор кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: stukhlyakpetro@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9067-5543;*
Яцюк В. М., *к.х.н., заступник завідувача відділу досліджень матеріалів, речовин і виробів, Тернопільський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України, м. Тернопіль, Україна, e-mail: yatsuk-@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0103-1250;*
Золотий Р. З., *к.т.н., доцент, доцент кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: zolotyy@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9435-2642;*
Тотосько О. В., *к.т.н., доцент, доцент кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: totosko@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6002-1477;*
Стухляк Д. П., *к.т.н., доцент, доцент кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: itaniumua@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9404-4359;*
Дідуник О. А., *аспірант, аспірант кафедри «Комп'ютерно-інтегрованих технологій», Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна, e-mail: astevgan@gmail.com, ORCID: 0009-0007-4385-7644.*

Дослідження взаємодії на межі поділу фаз «олігомер-модифікатор» за рахунок структурної взаємодії в процесі формування епоксидної матриці для підвищення фізико-механічних характеристик композитних матеріалів є важливим на даний час. У даному напрямку досліджень для науково-прогнозованого впливу на експлуатаційні характеристики матеріалів є використання модифікатора на основі триметилхлорсілану для зв'язувачів ЕД-20 (Україна) та EPOXY 520 (Чехія). Для впливу на процес структуроутворення використано запропонований науково-дослідним експертно-криміналістичним центром при УМВС України Тернопільської області модифікатор триметилхлорсілану (ТМХС-1). Встановлено, що для епоксидного олігомеру ЕД-20 введення модифікатора ТМХС-1 у кількості 0,25 г на 100 г ЕД-20 покращує міцність адгезійних з'єднань на 30%. Для епоксидного олігомеру EPOXY 520 введення модифікатора в кількості 0,25 г забезпечує зростання модуля Юнга на 70% і покращення ударної в'язкості на 12% з незначним підвищенням залишкових напружень. Доведено, що вміст модифікатора в кількості 0,75 г приводить до підвищення міцності адгезійних з'єднань на 100%, модуля юнга на 15%. Встановлено, що введення модифікатора в кількості 0,25 г на 100 г олігомеру для обох зв'язувачів та 0,75 г для епоксидної смоли EPOXY 520 приводить до покращення фізико-механічних та теплофізичних характеристик епоксидних зв'язувачів за рахунок взаємодії реакційно здатних груп модифікатора з макромолекулами зв'язувачів.

Ключові слова: *зв'язувач; триметилхлорсілан; адгезія; теплостійкість; залишкові напруження; композитний матеріал; матриця.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.111-122

Вступ. На сучасному етапі розвитку науки і техніки створення нових матеріалів, які забезпечують комплекс необхідних функціональних властивостей для покращення ефективності використання обладнання, підвищити довговічність його роботи, що забезпечує збільшення міжремонтного періоду експлуатації і зменшення енерго- та металоємності. Однією з важливих проблем розробки композитних матеріалів з високими експлуатаційними характеристиками є забезпечення адгезійної взаємодії на межі поділу фаз при використанні модифікаторів та пластифікаторів у системі «модифікований епоксидний зв'язувач – наповнювач». Введення вказаних добавок суттєво впливає на величину залишкових напружень після формування матеріалу і їх можливу релаксацію у процесі

експлуатації виробів при використанні композитів. Встановлено, що залишкові напруження виникають внаслідок міжфазної взаємодії при формуванні матеріалу за рахунок утворення фізичних і хімічних зв'язків між компонентами системи, а також – внаслідок зменшення об'єму композитів під час усадки [1, 2]. Важливе значення також має різниця між термічним коефіцієнтом лінійного розширення твердої фази – наповнювача і полімерної матриці. Залишкові напруження можуть змінюватись за рахунок рекомбінації та зміни конфірмаційного набору макромолекул у епоксикомпозитному матеріалі, що використані як покриття робочих поверхонь деталей виробів. Тому, важливою є розробка нових методів регулювання швидкості проходження фізико-хімічних процесів при структуроутворенні матеріалу, що дозволяє науково-прогнозовано впливати на властивості композитних матеріалах при їхній експлуатації надалі.

До теперішнього часу відомо ряд традиційних методів регулювання як залишкових напружень, так і когезійної міцності системи в цілому [3, 4]. Це зокрема, прогнозована зміна температурно-часових параметрів формування епоксикомпозитів, тиску і вологості навколишнього середовища, співвідношення між компонентами у гетерогенних системах. Такий підхід дозволяє у комплексі покращити експлуатаційні характеристики композитних матеріалів, внаслідок покращення міжфазної взаємодії і прогнозованого регулювання проходження структурних процесів при формуванні матеріалу. Зазначимо, що такі методи модифікації є екологічно чистими і відносно дешевими порівняно з традиційними [5–7].

На даний час важливим є дослідження взаємодії, що відбуваються на межі поділу фаз «олігомер-модифікатор», за рахунок структуроутворення в процесі формування епоксикомпозитів. Суттєво на такі процеси можна впливати за рахунок введення в олігомерну матрицю додаткових модифікаторів до початку процесу тверднення. Введення модифікуючих добавок у процесі формування композиту дозволяє підвищити експлуатаційні характеристики матеріалів. У зв'язку з викладеним вище дослідження впливу модифікаторів на основні характеристики епоксикомпозитів є на сьогоднішній час актуальною задачею сучасного матеріалознавства [8, 9].

Мета роботи. Дослідити вплив модифікатора на основі триметилхлорсілану на фізико-механічні властивості епоксикомпозитних олігомерів для отримання матеріалів з підвищеними експлуатаційними характеристиками.

Матеріали та методи. Як об'єкт дослідження вибрано епоксидний діановий олігомер марки ЕД-20 з вмістом епоксидних груп 19,9–22,0% і молекулярною масою 390–430 г/моль, який характеризується незначною усадкою, високою адгезійною та когезійною міцністю, технологічністю при нанесенні на довговимірні поверхні складного профілю, розвинутою сировинною базою [10, 11]. Враховуючи те, що більшість матеріалів на основі епоксидного зв'язувача використовують у вигляді покриттів, за умови їх формування на робочих поверхнях деталей машин, для зшивання епоксидного зв'язувача використано твердник поліетиленполіамін, який забезпечує формування композитних матеріалів (КМ) при кімнатних температурах [12, 13]. У дослідженнях використано два види зв'язувача: епоксидіановий олігомер ЕД-20 вітчизняного виробництва та закордонний аналог EPOXY-520 виробництва Чехії. Як твердник використано поліетиленполіамін (ПЕПА) при стехіометричному співвідношенні компонентів ЕД-20 : ПЕПА=100 мас.ч. : 10 мас.ч. Для впливу на процес структуроутворення використано запропонований науково-дослідним експертно-криміналістичним центром при УМВС України Тернопільської області модифікатор на основі триметилхлорсілану (ТМХС-1).

Триметилхлорсілан широко використовується в органічному синтезі, як джерело триметилсилільної групи, так як і безводне джерело хлориду. Функціональні групи спиртів та амінів легко піддаються реакції з триметилхлорсиланом, утворюючи триметилсилільні ефіри або триметилсилільні аміни [14, 15]. Отримані групи можуть бути використані як захисні групи. Даний модифікатор є рідиною, структурна формула якого приведена на рис. 1.

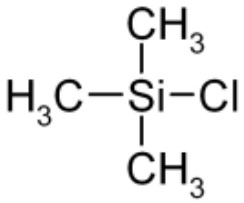


Рисунок 1 – Структурна формула триметилхлорсілану (ТМХС-1)

Фізико-хімічні властивості

– Молекулярна формула: $(CH3)3SiCl$.
– Молекулярна маса: 108,7 г/моль.
– Температура кипіння: 57°C.
– Температура плавлення: - 58°C.
– Температура спалаху: - 28°C (закрита чашка).
– Тиск пари: 26,7 кПа (при 20°C).
– Розчинність у воді: Реагує (гідроліз) з утворенням соляної кислоти.
– Зовнішній вигляд: Безбарвна або злегка жовтувата прозора рідина.

При дослідженні епоксидних композитних матеріалів використовували відомі методи дослідження фізико-механічних властивостей епоксикомпозитних матеріалів [16–19], а саме: залишкові напруження, ударна в'язкість, міцність адгезійних з'єднань, миттєвий модуль пружності та теплостійкість.

Залишкові напруження в епоксидних композитах оцінювали дифракційним методом, який ґрунтується на вимірюванні деформації кристалічної ґратки за зміщенням максимумів дифракційних піків. Узагальнену процедуру визначення залишкових напружень дифракційними методами використовуючи стандарт ISO 20104 «Residual stress measurement by diffraction methods», із врахуванням вимог до підготовки зразків, калібрування обладнання, знімання та оброблення дифрактограм.

Ударну в'язкість епоксикомпозитів зазвичай визначають за результатами маятникових випробувань за методом Шарпі. Відповідно до ISO 179-1:2023 «Plastics — Determination of Charpy impact properties — Part 1: Non-instrumented impact test» випробування проводили на брусках, встановлених на опори як однопролітну балку; маятниковим копером наносять одиничний удар, а поглинуту енергію руйнування ділять на площу перерізу в зоні руйнування, отримуючи величину ударної в'язкості в кДж/м².

Міцність клейових (адгезійних) з'єднань епоксидних композитів доцільно оцінювати за схемою випробування на розтяг з перекриттям (lap-shear). Стандарт ISO 4587:2003 «Adhesives — Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies» регламентує виготовлення зразків із двох жорстких пластин із заданими розмірами зони перекриття, умови витримки до випробувань та швидкість навантаження. Під час випробування зразок розтягують до руйнування адгезійного шару, а міцність зчеплення визначають як відношення максимальної руйнівної сили до площі перекриття клеєного шва.

Миттєвий (початковий) модуль пружності епоксикомпозиту визначають із діаграми «напруження–деформація», отриманої під час статичного розтягувального випробування. Загальні принципи таких випробувань наведено в ISO 527-1:2019 «Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles», а умови для литих/пресованих пластмас і композитів – у відповідних частинах ISO 527-2.

Теплостійкість епоксидних композитів часто характеризують температурою прогину під навантаженням (HDT). Відповідно до ISO 75-1:2020 «Plastics — Determination of temperature of deflection under load — Part 1: General test method» зразок у вигляді балки навантажують у схемі триточкового згину заданим навантаженням, після чого температуру середовища підвищують із фіксованою швидкістю; температурою теплостійкості вважають температуру, за якої прогин досягає заданого значення рівного 6 мм, при довжині зразка 100 мм.

Композитні матеріали формували методом гідродинамічного суміщення компонентів. З метою визначення оптимального співвідношення компонентів у системі проведено дослідження властивостей КМ під впливом динамічних навантажень та підвищених температурах залежно від вмісту модифікатора.

Обговорення результатів досліджень. Випробування проводили у кілька послідовних етапів: дослідження фізико-механічних характеристик та теплопровідності епоксидного матеріалу від вмісту модифікатора.

Одним з факторів, що визначають поведінку матеріалу у процесі експлуатації є співвідношення величини міцності адгезійних з'єднань і залишкових напружень. При введенні модифікаторів у епоксидну матрицю зміна вказаних характеристик свідчить про зміну механізму взаємодії при зшиванні епоксидної матриці. Проте високі значення залишкових напружень є негативним фактором, що призводять до погіршення експлуатаційних характеристик матеріалу – появи мікротріщин, часткових деформацій, відшарування покриттів тощо. [20, 21].

Досліджено зміну залишкових напружень (σзал) при використанні ЕД-20 залежно від вмісту модифікатора (рис 2). Найвищі показники зареєстровані при введенні 0,1 г модифікатора на 100 г вказаного зв'язувача (σзал=0,463 МПа для ЕД-20 та σзал=0,337 МПа для EPOXY-520) і при 1 г модифікатора на 100 г зв'язувача (σзал=0,499 МПа для ЕД-20 та σзал=0,354 МПа для EPOXY-520). Найменші значення залишкових напружень виявлено при додаванні 0,25 г модифікатора на 100 г епоксидного матеріалу для ЕД-20 (σзал=0,264 МПа) та при вмісті модифікатора 0,75 г на 100 г EPOXY-520 (σзал=0,85 МПа).

Залишкові напруження при введенні модифікатора в епоксидний зв'язувач ТМХС-1 з основою смоли EPOXY-520, змінюються від вмісту модифікатора. Максимальні значення залишкових напружень зареєстровані при введенні 0,1 г і при 1 г модифікатора на 100 г зв'язувача (тут і надалі по тексту концентрацію модифікатора приведена на 100 г епоксидного зв'язувача). Такі ж значення вказаного показника характерні для матеріалу без модифікатора.

Рисунок 2 – Залежність залишкових напружень епоксидної матриці (ЕД-20 та EPOXY 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1

Експериментальними дослідженнями встановлено неоднозначний вплив концентрації модифікатора в епоксидному матеріалі на величину залишкових напружень. На нашу думку, модифікування впливає на структурну організацію в матеріалі, тому слід очікувати зміну й інших характеристик КМ. Вважаємо, що в матеріалі проходять одночасно процеси зшивання і пластифікації в епоксидному зв'язувачі. У процесі формування покриттів виникнення залишкових напружень створює проблему для покриття в цілому. Підвищення залишкових

напружень негативно впливає на механічні та функціональні характеристики, оскільки вони часто призводять до передчасного виходу з ладу через відшарування покриття та, в окремих випадках до деформації епоксикомпозиту. Відшарування часто починається з кутів та заглиблень, які характерні концентраторами напружень при формуванні виробу. Вирішити вказану проблему можуть модифікатори за рахунок зміни механізму структуроутворення в композиті, що впливає на механічні та теплофізичні властивості. Модифікатор, у цьому випадку, взаємодіє з макромолекулами зв'язувача, що впливає на процеси утворення полімерної сітки. У цьому випадку модифікатор, що використовують, може діяти як пластифікатор, збільшуючи вільний об'єм та забезпечуючи суттєву зміну конфірмаційного набору макромолекул. Слід очікувати релаксацію напружень навіть за нижчих температур, що покращує міжфазну взаємодію [21–23].

Міцність адгезійних з'єднань в епоксидних композитах залежить від таких факторів, як тип зв'язувача, конструкція з'єднання, підготовка та топологія поверхні робочих поверхонь деталей обладнання. Ця характеристика відображає міцність, з якою епоксикомпозит взаємодіє з основою і зумовлює його адгезійні характеристики [24, 25].

Експериментально встановлено утворення кількох екстремумів при дослідженні міцності адгезійних з'єднань (рис. 3) при використанні епоксидної смоли ЕД-20 з модифікатором. Найвищий результат зафіксований при вмісті 0,25 г модифікатора на 100 г зв'язувача (σа=161,0 МПа). При введенні 0,1 г та 0,5 г модифікатора міцність адгезійних з'єднань нижча ніж у чистої смоли (σа=86,8Мпа та σа=93,0 МПа відповідно), а при вмісті модифікатора 1 г на 100 г зв'язувача σа=119,2 МПа.

Доведено, що результати досліджень міцності адгезійних з'єднань, при використанні EPOXY 520, також спостерігали два екстремуми від концентрації модифікатора. Встановлено, що при додаванні 0,75 г модифікатора σа=146,3 МПа. При вмісті 0,1 г і 0,25 г модифікатора на 100 г зв'язувача значення параметра становить σа=87,8 МПа та 124,4 МПа відповідно, а при додаванні 1 г модифікатора на 100 г зв'язувача σа=61,7 МПа (тут і далі по тексту концентрацію модифікатора приведена на 100 г епоксидного зв'язувача).

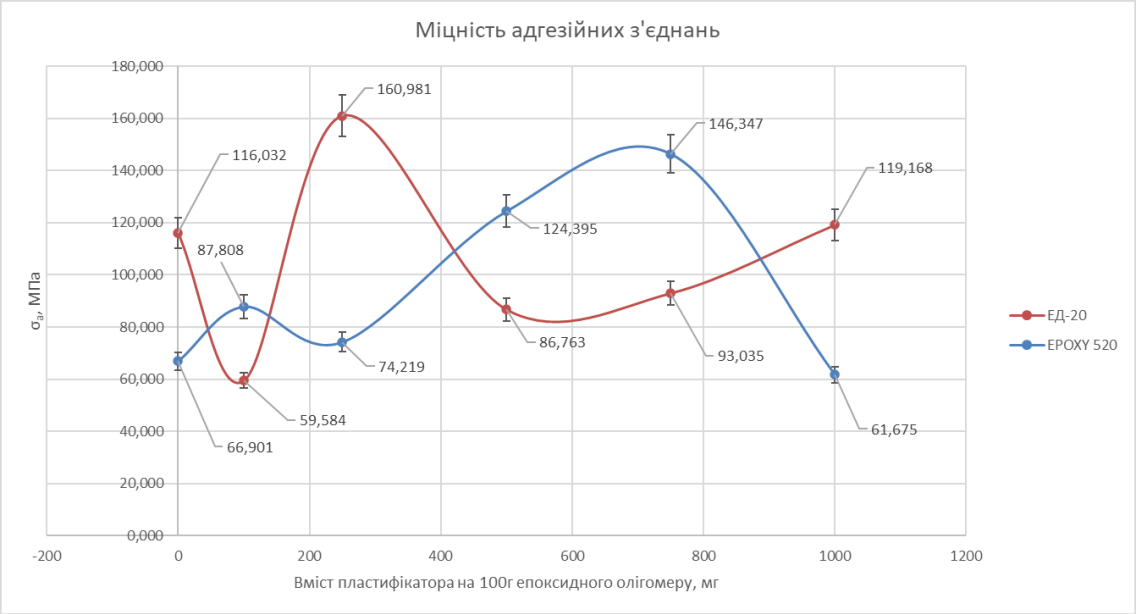


Рисунок 3 – Залежність міцності адгезійних з'єднань епоксидної матриці (ЕД-20 та EPOXY 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1

Залежність миттєвого модуля пружності епоксидної матриці від вмісту модифікатора приведено на рис. 4. Модуль Юнга (Е) для епоксидної смоли є важливою механічною характеристикою, яка визначає його здатність чинити опір під дією зовнішніх навантажень. За допомогою вказаної характеристики можна оцінити деформацію покриттів при розтягуванні або стисненні епоксидного матеріалу [26, 27].

Показники модуля Юнга при додаванні модифікатора до матриці ЕД-20, при 0,1, 0,5 і 0,75 г дещо нижчі від чистої смоли, досягаючи свого мінімуму при 0,5 г модифікатора на 100 г зв'язувача (Е=0,686 ГПа). При концентраціях у 0,25 і 1 г модифікатора Е вищі від Е чистої смоли. Максимальне значення спостерігали при концентрації 0,25 г модифікатора Е=1,192 ГПа.

Результати досліджень миттєвого модуля Юнга при додаванні модифікатора до смоли EPOXY 520 при вмісті в 0,1 г дещо нижчі від чистої смоли. При вмісті 0,5, 075 і 1 г модифікатора на 100 г зв'язувача результати досліджень модуля Юнга підвищуються. Найвищий показник модуля Юнга експериментально встановлений при вмісті в 0,25 г модифікатора Е=1,981 ГПа.

Результати досліджень ударної в'язкості з'єднань епоксидної матриці від вмісту модифікатора приведено на рис. 5. Ударна в'язкість епоксикомпозитів – це основний показник при динамічних навантаженнях та характеризує можливість виробу витримувати ударні знакозмінні циклічні навантаження [28, 29].

Показники ударної в'язкості при дослідженні зв'язувача ЕД-20, практично не змінюються залежно від вмісту модифікатора, за винятком 0,1 г ТМХС-1, де вони найнижчі (а=7,70 кДж/м^2).

Рисунок 4 – Залежність миттєвого модуля пружності епоксидної матриці (ЕД-20 та EPOXY 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1

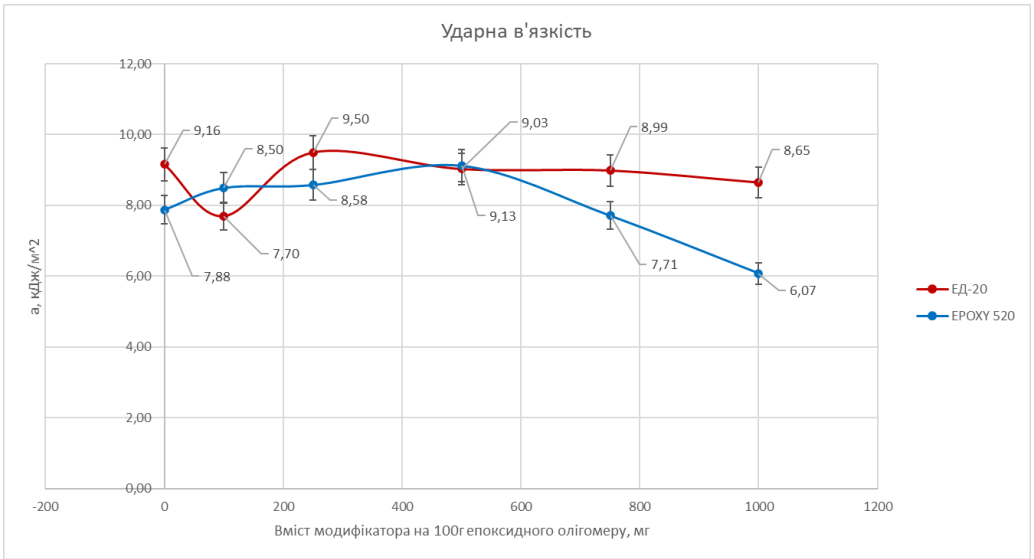


Рисунок 5 – Залежність ударної в'язкості з'єднань епоксидної матриці (ЕД-20 та EPOXY 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1

Дослідженнями впливу модифікатора на олігомер EPOXY 520 встановлено підвищення ударної в'язкості при збільшенні вмісту модифікатора 0,5 г, яка становить а = 9,13 кДж/м^2. Надалі даний показник зменшується і при 0,75 і 1 г а досягає нижчих показників ніж у немодифікованому зв'язувачі.

Залежність показника теплостійкості епоксидної матриці від вмісту модифікатора приведено на рис. 6.

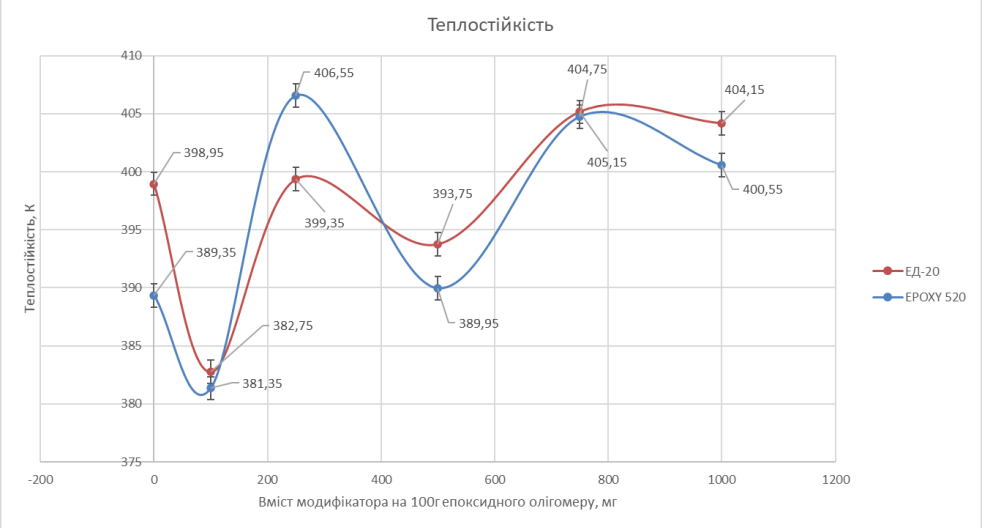


Рисунок 6 – Залежність теплостійкості епоксидної матриці (ЕД-20 та EPOXY 520) від вмісту модифікатора ТМХС-1

Важливими теплофізичними властивостями, що впливають на експлуатаційні характеристики полімеркомпозиційних покриттів є теплостійкість [30]. У роботі було проведено дослідження теплостійкості за Мартенсом.

Досліджено вплив модифікатора на теплостійкість смоли ЕД-20. Виявлено зниження даного показника при вмісті 0,1 г та 0,5 г модифікатора – теплостійкість нижча ніж у немодифікованому зв'язувачі. Встановлено, що при вмісті в 0,25 г різниця теплостійкості порівняно з чистою смолою мінімальна. При додаванні 0,75 і 1 г модифікатора теплостійкість вища ніж у немодифікованого зв'язувача і досягала максимального значення Т = 404,75 К при концентрації 0,75 г модифікатора (тут і надалі по тексту концентрацію модифікатора приведена на 100 г епоксидного зв'язувача).

Вивчаючи вплив модифікатора на теплостійкість смоли EPOXY 520 спостерігали зниження даного показника при вмісті 0,1 г і 0,5 г, при яких теплостійкість нижча (при 0,1 г) або рівна (при 0,5 г) відносно чистої смоли. Водночас при вмісті в 0,25 г модифікатора теплостійкість покращилась до Т=406,55 К. При додаванні 0,75 г і 1 г модифікатора теплостійкість вища ніж у чистої смоли Т=405,15 К та Т=400,55 К відповідно).

Аналізуючи результати експериментальних досліджень для епоксидного олігомеру ЕД-20 можна стверджувати, що додавання 1 г модифікатора не рекомендують для використання. Значно занижується теплостійкість, миттєвий модуль пружності та міцності адгезійних з'єднань епоксидного олігомера. З іншого боку введення модифікатора у кількості 0,25 г знижує залишкові напруження та покращує досліджувані характеристики. Аналізуючи експериментальні дані можна стверджувати, що введення модифікатора ТМХС-1 у кількості 0,25 г на 100г ЕД-20 доцільно для покращення адгезії. σа зростає на 30%. Незначне підвищення всіх досліджуваних характеристик (на 1–3%) супроводжується підвищенням залишкових напружень на 70%. Введення модифікатора ТМХС-1 у кількості 0,75 г забезпечує підвищення теплостійкості на 1,5%, змінює фізико-механічні характеристики у межах похибки експерименту. Тому введення модифікатора в інших концентраціях не рекомендовано для використання.

Для епоксидного олігомеру EPOXY 520 введення олігомеру в кількості 0,25 мг забезпечує зростання теплостійкості, модуля Юнга на 70% та покращує ударну в'язкість на

12% при незначному підвищенні залишкових напружень. Також введення модифікатора в кількості 0,75 г приводить до підвищення міцності адгезійних з'єднань на 100%, модуля пружності на 15%. Теплостійкість і залишкові напруження змінюються в межах похибки експерименту. Введення модифікатора при інших концентраціях не призводить до комплексного покращення властивостей матеріалів.

Висновки. Проведено дослідження впливу розробленого модифікатора – триметилхлорсілану на фізико-механічні характеристики епоксидних олігомерів ЕД-20 (Україна) та EPOXY 520 (Чехія). Встановлено, що введення модифікатора в кількості 0,25 г на 100 г олігомеру для обох матриць та 0,75 г для епоксидної смоли EPOXY 520 приводить до покращення фізико-механічних та теплофізичних характеристик епоксидних матеріалів за рахунок впливу реакційноздатних зв'язків модифікатора на процеси структуроутворення. Інші концентрації модифікатора не рекомендовані для застосування і потребують подальшого дослідження.

Перспективи подальших досліджень. Планується вдосконалити структуру модифікатора та провести більш детальне вивчення впливу інших концентрацій на більш широкий спектр характеристик при наповненні епоксикомпозитів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Korzhyk V., Kushnarova O., Berdnikova O., Stukhliak P., Kolisnichenko O. & Totosko O. Influence of Structure on the Properties of Coatings During Multi-Chamber Detonation Spraying of Al2 O3 Powder on Steel. 2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), 1–4. https://doi.org/10.1109/NAP62956.2024.107397072.

2. Korzhyk V. M., Stukhliak P. D., Berdnikova O. M., Totosko O. V., Stukhliak D. P., Demyanov O. I. & Lepilina K. M. Protection Against Ultrahigh-Frequency Electromagnetic Radiation Using Multilayer Polymer-Composite Coatings. Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii, 23(1), 2025. 149–165. Scopus. https://doi.org/10.15407/nnn.23.01.01494.

3. Eom Y. S., Boogh Louis, Michaud Véronique, Månson J.-A. E. Internal Stress Control in Epoxy Resins and their Composites by Material and Process Tailoring. Polymer Composites. 2002. 23. https://doi.org/10.1002/pc.10500.

4. Miturska Izabela, RudawskaAnna, Miroslav Müller, Hromasová Monika. The Influence of Mixing Methods of Epoxy Composition Ingredients on Selected Mechanical Properties of Modified Epoxy Construction Materials. Materials 2021, 14(2), 411. https://doi.org/10.3390/ma14020411.

5. Kashytskyi V. P., Sadova O. L., Melnychuk M. D., Golodyuk G. I., Klymovets O. B. Structuring of modified epoxy composite materials by infrared spectroscopy. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), 2023. C9–C16, https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).c2.

6. Stukhlyak P. D., Holotenko O. S., Zolotyi R. Z., Mykytyshyn A. G. Investigation of superhigh-frequency treatment influence on structuring of epoxy composites by infrared- and electron paramagnetic resonance spectroscopy analyses. Functional Materials, 28(2), 2021. 394–402. Scopus. https://doi.org/10.15407/FM28.02.394.

7. Kartashov V., Stukhlyak D., Holotenko O., Dobrotvor I., Mikitishin A., Mytnyk M., Marukha V. & Skorokhod O. Research into parameters of magnetic treatment to modify the disperse-filled epoxy composite materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(12 (94), 2018. 23–28. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140876.

8. Monte S. J. Diluents and viscosity modifiers for epoxy resins. In: Pritchard, G. (eds) Plastics Additives. Polymer Science and Technology Series, vol 1. Springer, Dordrecht. 1998. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5862-6_24.

9. Jyotish J., Mahapatra B. K., Moharana S., Mahaling R.N. Chemistry and Types of Epoxy Resins. In: Pradhan, S., Moharana, S., Mohanty, S. (eds) Recent Advances on Waterborne Epoxy Coatings. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials. Springer, Singapore. 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3260-2_2.

10. Sapronov O., Buketov A., Sapronova L. & Vorobiov P. Development of epoxy composites resistant to impact loads. Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-authored monograph. Lviv Polytechnic National University, 2022. pp. 41–47.

11. Buketov A., Smetankin Serhiy, Maruschak Pavlo, Yurenin Kyrylo, Sapronov Oleksandr, Matvyeyev Viktor, Menou Abdellah. New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. Transport. 35. 2021. 679–690. https://doi.org/10.3846/transport.2020.14286.

12. Buketov A., Stukhlyak P., Maruschak P., Panin S. V. & Menou A. Regularities of Impact Failure of Epoxy Composites with Al2O3 Microfiller and their Analysis on the Basis of External Surface Layer Concept. Key Engineering Materials, 712, 2016. 149–154. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.149.

13. Stukhlyak P. D., Holotenko O. S., Dobrotvor I. H. & Mytnyk M. M. Investigation of the Adhesive Strength and Residual Stresses in Epoxy Composites Modified by Microwave Electromagnetic Treatment. Materials Science, 51(2), 2015. 208–212. https://doi.org/10.1007/s11003-015-9830-z.

14. Bondarchuk D. A., Fedulov B. N., Fedorenko A. N. The effect of residual stress induced by manufacturing on strength on free edge of carbon-epoxy composite with [00/900]n layup. 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity, Volume 18, 2019, pp. 353–367.

15. Sheng-Wen Chen, Yu-Sheng Wang, Shao-Yu Hu, Wen-Hsi Lee, Chieh-Cheng Chi, Ying-Lang Wang. A Study of Trimethylsilane (3MS) and Tetramethylsilane (4MS) Based α-SiCN:H/α-SiCO:H Diffusion Barrier Films. Materials (Basel), 2012 Mar. 2.5(3), 2012. 377–384. https://doi.org/10.3390/ma5030377.

16. Xuewen Li, Jiwei Liu, Hao Wu, Kesong Miao, He Wu, Rengeng Li, Chenglu Liu, Wenbin Fang, Guohua Fan. Research progress of residual stress measurement methods, Heliyon, Volume 10, 2024. Issue 7. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28348.

17. Borges, Catarina, Akhavan-Safar Alireza, Tsokanas Panayiotis, Carbas Ricardo, Marques Eduardo, Silva L.F.M. From fundamental concepts to recent developments in the adhesive bonding technology: a general view. Discover Mechanical Engineering. 2023. 10.1007/s44245-023-00014-7.

18. Demiral M. Strength in Adhesion: A Multi-Mechanics Review Covering Tensile, Shear, Fracture, Fatigue, Creep, and Impact Behavior of Polymer Bonding in Composites. Polymers, 2025. 17(19), 2600. https://doi.org/10.3390/polym17192600.

19. Syed Fahad Hassan, Saratchandra Kundurthi, Suhail Hyder Vattathurvalappil, Gary Cloud, Mahmoodul Haq. A hybrid experimental and numerical technique for evaluating residual strains/stresses in bonded lap joints,Composites Part B: Engineering, Volume 225, 2021. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109216.

20. Ruikun Wang, Chunyan Qu, Dezhi Wang and other. A study of the residual stress behavior of rigid and flexible epoxy adhesives during thermal cycle aging for electronics packaging. Journal of Adhesion Science and Technology. 2023. https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2240550.

21. Mohammadali Rastak, Mahmood Shokrieh, Laurent Barrallier, Regis Kubler, Danial Salehi. Estimation of residual stresses in polymer-matrix composites using digital image correlation. In book: Residual Stresses in Composite Materials. 2021. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818817-0.00001-9.

22. Man-Lung Sham, Jang-Kyo Kim. Evolution of residual stresses in modified epoxy resins for electronic packaging applications, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 35, Issue 5, Pages 537–546, 2004. https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.01.002.

23. Ranjan K. Behera S. K. Parida R. R. Das Effect of using fibre reinforced epoxy adhesive on the strength of the adhesively bonded Single Lap Joints, Composites

Part B: Engineering, Volume 248, 110358, 2023. ISSN 1359–8368, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110358.

24. Tan Wei, Na Jingxin, Zhou Zhaofeng. Effect of Service Temperature on Mechanical Properties of Adhesive Joints after Hygrothermal Aging. Polymers. 13. 3741. 2021. 10.3390/polym13213741.

25. Khun N. W., Dawei Sun, Huang M. X., Yang Jinglei, Yue Chee. Wear resistant epoxy composites with diisocyanate-based self-healing functionality. Wear. 313. 2014. 19–28. 10.1016/j.wear.2014.02.011.

26. Kamil Anasiewicz, Józef Kuczmaszewski. Apparent Young's Modulus of Epoxy Adhesives. Department of Mechanical Engineering, Lublin University of Technology, 20-618 Lublin, Poland Author to whom correspondence should be addressed. Materials 15(22), 2022. 8060. https://doi.org/10.3390/ma15228060.

27. Anasiewicz K., Kuczmaszewski J. Apparent Young's modulus of epoxy adhesives in metal bonding. Przegląd Spaw, 88, 2016. 131–134.

28. Matykiewicz Danuta, Barczewski Mateusz, Mousa Marwan, M R Sanjay, Siengchin Suchart. Impact Strength of Hybrid Epoxy–Basalt Composites Modified with Mineral and Natural Fillers. ChemEngineering. 5. 56. 2021. https://doi.org/10.3390/chemengineering5030056.

29. Yang, Kang, Wu (吴素君), SuJun Shao, Zhengzhong Ritchie, Robert. Enhancing the Mechanical Toughness of Epoxy-Resin Composites Using Natural Silk Reinforcements OPEN. Scientific Reports. 2017. 7. 11939. https://doi.org/10.1038/s41598-017-11919-1.

30. Sun Yangyang, Zhang Zhuqing, Moon Kyoung-sik, Wong C. P. Glass transition and relaxation behavior of epoxy nanocomposites. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 42. 2004. 3849–3858. https://doi.org/10.1002/polb.20251.

REFERENCES

1. Korzhyk, V., Kushnarova, O., Berdnikova, O., Stukhliak, P., Kolisnichenko, O., & Totosko, O. (2024). Influence of Structure on the Properties of Coatings During Multi-Chamber Detonation Spraying of Al2 O3 Powder on Steel. 2024 IEEE 14th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP), 1–4. https://doi.org/10.1109/NAP62956.2024.107397072.

2. Korzhyk, V. M., Stukhliak, P. D., Berdnikova, O. M., Totosko, O. V., Stukhliak, D. P., Demyanov, O. I., & Lepilina, K. M. (2025). Protection Against Ultrahigh-Frequency Electromagnetic Radiation Using Multilayer Polymer-Composite Coatings. Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii, 23(1), 149–165. Scopus. https://doi.org/10.15407/nnn.23.01.01494.

3. Eom, Y. S., Boogh, Louis, Michaud, Véronique, Månson, J.-A. E. (2002). Internal Stress Control in Epoxy Resins and their Composites by Material and Process Tailoring. Polymer Composites. 23. https://doi.org/10.1002/pc.10500.

4. Miturska Izabela, RudawskaAnna, Miroslav Müller, Hromasová Monika (2021). The Influence of Mixing Methods of Epoxy Composition Ingredients on Selected Mechanical Properties of Modified Epoxy Construction Materials. Materials 2021, 14(2), 411. https://doi.org/10.3390/ma14020411.

5. Kashytskyi, V. P., Sadova, O. L., Melnychuk, M. D., Golodyuk, G. I., Klymovets, O. B. (2023). Structuring of modified epoxy composite materials by infrared spectroscopy. Journal of Engineering Sciences, Vol. 10(1), C9–C16, https://doi.org/10.21272/jes.2023.10(1).c2.

6. Stukhlyak, P. D., Holotenko, O. S., Zolotyi, R. Z., Mykytyshyn, A. G. (2021). Investigation of superhigh-frequency treatment influence on structuring of epoxy composites by infrared- and electron paramagnetic resonance spectroscopy analyses. Functional Materials, 28(2), 394–402. Scopus. https://doi.org/10.15407/FM28.02.394.

7. Kartashov, V., Stukhlyak, D., Holotenko, O., Dobrotvor, I., Mikitishin, A., Mytnyk, M., Marukha, V., & Skorokhod, O. (2018). Research into parameters of magnetic treatment to modify

the disperse-filled epoxy composite materials. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(12 (94), 23–28. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.140876.

8. Monte, S. J. (1998). Diluents and viscosity modifiers for epoxy resins. In: Pritchard, G. (eds) Plastics Additives. Polymer Science and Technology Series, vol 1. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-5862-6_24.

9. Jyotish, J., Mahapatra, B. K., Moharana, S., Mahaling, R. N. (2025). Chemistry and Types of Epoxy Resins. In: Pradhan, S., Moharana, S., Mohanty, S. (eds) Recent Advances on Waterborne Epoxy Coatings. Materials Horizons: From Nature to Nanomaterials. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-96-3260-2_2.

10. Sapronov, O., Buketov, A., Sapronova, L. & Vorobiov, P. (2022). Development of epoxy composites resistant to impact loads. Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-authored monograph. Lviv Polytechnic National University, 41–47.

11. Buketov, A., Smetankin Serhiy, Maruschak Pavlo, Yurenin Kyrylo, Sapronov Oleksandr, Matvyeyev Viktor, Menou Abdellah. (2021). New black-filled epoxy coatings for repairing surface of equipment of marine ships. Transport. 35. 679–690. 10.3846/transport.2020.14286.

12. Buketov, A., Stukhlyak, P., Maruschak, P., Panin, S. V., & Menou, A. (2016). Regularities of Impact Failure of Epoxy Composites with Al2O3 Microfiller and their Analysis on the Basis of External Surface Layer Concept. Key Engineering Materials, 712, 149–154. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.712.149.

13. Stukhlyak, P. D., Holotenko, O. S., Dobrotvor, I. H., & Mytnyk, M. M. (2015). Investigation of the Adhesive Strength and Residual Stresses in Epoxy Composites Modified by Microwave Electromagnetic Treatment. Materials Science, 51(2), 208–212. https://doi.org/10.1007/s11003-015-9830-z.

14. Bondarchuk D. A., Fedulov B. N., Fedorenko A. N. (2019). The effect of residual stress induced by manufacturing on strength on free edge of carbon-epoxy composite with [00/900]n layup. 25th International Conference on Fracture and Structural Integrity, Volume 18, 353–367.

15. Sheng-Wen Chen, Yu-Sheng Wang, Shao-Yu Hu, Wen-Hsi Lee, Chieh-Cheng Chi, Ying-Lang Wang (2012). A Study of Trimethylsilane (3MS) and Tetramethylsilane (4MS) Based α-SiCN:H/α-SiCO:H Diffusion Barrier Films. Materials (Basel), 2012 Mar. 2.5(3), 377–384. https://doi.org/10.3390/ma5030377.

16. Xuewen, Li, Jiwei, Liu, Hao, Wu, Kesong, Miao, He, Wu, Rengeng, Li, Chenglu, Liu, Wenbin, Fang, Guohua, Fan (2024). Research progress of residual stress measurement methods, Heliyon, Volume 10, Issue 7. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28348.

17. Borges, Catarina, Akhavan-Safar Alireza, Tsokanas Panayiotis, Carbas Ricardo, Marques Eduardo, Silva L.F.M. (2023). From fundamental concepts to recent developments in the adhesive bonding technology: a general view. Discover Mechanical Engineering. 10.1007/s44245-023-00014-7.

18. Demiral, M. (2025). Strength in Adhesion: A Multi-Mechanics Review Covering Tensile, Shear, Fracture, Fatigue, Creep, and Impact Behavior of Polymer Bonding in Composites. Polymers, 17(19), 2600. https://doi.org/10.3390/polym17192600.

19. Syed Fahad Hassan, Saratchandra Kundurthi, Suhail Hyder Vattathurvalappil, Gary Cloud, Mahmoodul Haq (2021). A hybrid experimental and numerical technique for evaluating residual strains/stresses in bonded lap joints,Composites Part B: Engineering, Volume 225, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109216.

20. Ruikun Wang, Chunyan Qu, Dezhi Wang and other (2023). A study of the residual stress behavior of rigid and flexible epoxy adhesives during thermal cycle aging for electronics packaging. Journal of Adhesion Science and Technology. https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2240550.

21. Mohammadali Rastak, Mahmood Shokrieh, Laurent Barrallier, Regis Kubler, Danial Salehi (2021). Estimation of residual stresses in polymer-matrix composites using digital image

correlation. In book: Residual Stresses in Composite Materials. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818817-0.00001-9.

22. Man-Lung Sham, Jang-Kyo Kim (2004). Evolution of residual stresses in modified epoxy resins for electronic packaging applications, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 35, Issue 5, Pages 537–546, https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2004.01.002.

23. Ranjan, K., Behera, S. K., Parida, R. R. (2023) Das Effect of using fibre reinforced epoxy adhesive on the strength of the adhesively bonded Single Lap Joints, Composites Part B: Engineering, Volume 248, 110358, ISSN 1359–8368, https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.110358.

24. Tan Wei, Na Jingxin, Zhou Zhaofeng (2021). Effect of Service Temperature on Mechanical Properties of Adhesive Joints after Hygrothermal Aging. Polymers. 13. 3741. 10.3390/polym13213741.

25. Khun, N. W., Dawei, Sun, Huang, M. X., Yang, Jinglei, Yue, Chee (2014). Wear resistant epoxy composites with diisocyanate-based self-healing functionality. Wear. 313. 19–28. 10.1016/j.wear.2014.02.011.

26. Kamil Anasiewicz, Józef Kuczmaszewski (2022). Apparent Young's Modulus of Epoxy Adhesives. Department of Mechanical Engineering, Lublin University of Technology, 20-618 Lublin, Poland Author to whom correspondence should be addressed. Materials 15(22), 8060. https://doi.org/10.3390/ma15228060.

27. Anasiewicz, K., Kuczmaszewski, J. (2016). Apparent Young's modulus of epoxy adhesives in metal bonding. Przegląd Spaw, 88, 131–134.

28. Matykiewicz Danuta, Barczewski Mateusz, Mousa Marwan, M R Sanjay, Siengchin Suchart (2021). Impact Strength of Hybrid Epoxy–Basalt Composites Modified with Mineral and Natural Fillers. ChemEngineering. 5. 56. https://doi.org/10.3390/chemengineering5030056.

29. Yang, Kang, Wu (吴素君), SuJun Shao, Zhengzhong Ritchie, Robert (2017). Enhancing the Mechanical Toughness of Epoxy-Resin Composites Using Natural Silk Reinforcements OPEN. Scientific Reports. 7. 11939. https://doi.org/10.1038/s41598-017-11919-1.

30. Sun Yangyang, Zhang Zhuqing, Moon Kyoung-sik, Wong, C. P. (2004). Glass transition and relaxation behavior of epoxy nanocomposites. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 42. 3849–3858. https://doi.org/10.1002/polb.20251.

Stukhliak P. D., Yatsyuk V. M., Zolotyi R. Z., Totosko O. V., Stukhliak D. P., Didunyk O. A.
RESEARCH ON THE INFLUENCE OF A TRIMETHYLCHLOROSILANE MODIFIER ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AN EPOXY COMPOSITE

Abstract. The study of the interaction at the interface between the 'oligomer-modifier' components, due to structural interaction in the process of forming an epoxy matrix, is currently important for improving the physical and mechanical characteristics of composite materials. In this area of research, the use of a modifier based on trimethylchlorosilane for the ED-20 (Ukraine) and EPOXY 520 (Czech Republic) binders makes it possible to scientifically and predictably influence the performance characteristics of materials. The trimethylchlorosilane modifier (TMHS-1) proposed at the Research and Forensic Centre of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine in Ternopil Oblast was used to influence the structure-formation process. It was found that for the epoxy oligomer ED-20, the introduction of the TMHS-1 modifier in the amount of 0.25 g per 100 g of ED-20 improves the strength of adhesive joints by 30%. For the epoxy oligomer EPOXY 520, the introduction of the modifier in the amount of 0.25 g provides a 70% increase in Young's modulus and a 12% improvement in impact strength, with a slight increase in residual stress. It has been proven that a modifier content of 0.75 g leads to a 100% increase in the strength of adhesive joints and a 15% increase in Young's modulus. It has been established that the introduction of the modifier in the amount of 0.25 g per 100 g of oligomer for both binders and 0.75 g for the EPOXY 520 epoxy resin leads to an improvement in the physical, mechanical and thermal characteristics of epoxy binders due to the interaction of reactive groups of the modifier with the macromolecules of the binders.

Key words: *binder; trimethylchlorosilane; adhesion; heat resistance; residual stresses; composite material; matrix.*

© Стухляк П. Д., Яцюк В. М., Золотий Р. З., Тотосько О. В., Стухляк Д. П., Дідуник О. А.

Статтю прийнято до редакції 17.11.2025

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING

UDC 656.61:005.8

PROJECT-ORIENTED APPROACH TO MARITIME TRANSPORT SAFETY MANAGEMENT BASED ON A GRAVITATIONAL-INERTIAL MODEL

Nosov P., *Ph.D., Associate Professor, Head of the Department of Technical Cybernetics and Information Technology Named After Prof. R.V. Merkt, Odesa National Maritime University, Odesa, Ukraine; e-mail: pason@ukr.net; ORCID: 0000-0002-5067-9766.*

A project-oriented approach to maritime transport safety management at the macro level is proposed, based on a physical analogy with a gravitational-inertial model in which the mission of the multi-project is interpreted as a vertical axis, the execution rhythm ω_3 and process maturity I_3 form the momentum of the stable regime L, and the external environmental pressure H_t, G_t, S_t and the disturbance moment τ define the controlled precession Ω of the system. A system of generalized parameters and multi-project segments P_1-P_8 (regulatory compliance, ship traffic management, navigational infrastructure, human factor, cyber protection, environmental safety, emergency readiness, analytics and DSS) is developed, for which, using EMSA reports, weight matrices of impacts and a normalized matrix A are constructed that link the development levels of segments with the states $\{\omega_3, I_3, H_t, G_t, S_t, \theta, \tau\}$. On the basis of matrix B, which takes into account amplitudes and signs of effects, a weighted least-squares problem is formulated for the vectors Δp that provides the search for optimal changes in segment levels, while subsequent discretization $\Delta P_i \in \{-2,\dots,2\}$ transforms them into interpretable expert recommendations on strengthening or unloading individual blocks of the multi-project. A software module in Python (NumPy, pandas, matplotlib) is implemented, which automates the calculation of the indicators L and Ω, classifies scenarios by stability, and generates tabular reports and plots for six typical scenarios of the European region, demonstrating the possibility of transforming crisis and stressed regimes into a new balanced state with increased momentum L and reduced precession frequency Ω.

Key words: *project-oriented approach; gravitational-inertial model; maritime safety multi-project; expert system; scenario analysis; project management; automation; Python; intelligent systems.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.124-142

Introduction. The maritime transport sector is one of the largest in the world, as it accounts for more than 60% of total freight transportation. The performance of the sector is influenced by numerous factors, including the requirements of international organizations, flag States, shipping companies, ports, crewing agencies, and various supervisory services [1]. The current level of hazards and the risk space of maritime transport, in particular the human factor [2], reveal gaps in the theory and practice of project management at the macro level (state, industry clusters, large companies). These gaps are driven by growing organizational and technical complexity, instability of the external environment, and the high interdependence of operational processes.

Existing approaches mostly accumulate indicators (voyage delays, documentary non-conformities, incidents, deviations from routes), but do not provide an integrated controllable model and concept capable of explaining and predicting the evolution of the system, its stability, and the boundaries of controllability under external and internal disturbances. This leads to reactive decision-making, data fragmentation and the absence of transparent criteria by which transitions to unstable regimes of the maritime safety project can be recognized in due time. Thus, there arises a contradiction between the practical demand and the real conditions for organizing safe navigation on the part of international organizations, flag-state regulators and shipping companies that provide maritime transport services.

This situation necessitates the development of a concept and a project-oriented approach to maritime transport safety management that would allow one to assess and ensure:

1. An adequate level of integration between the operational execution rhythm, process performance and external pressure of norms and rules within a common space of controllable states and disturbances;

2. The introduction of formal, reproducible indicators of alignment with the project mission, enabling the establishment of stability thresholds for a company's project;

3. Operation based on open and verifiable data, with their intelligent processing, compatible with real supervision and operation practices;

4. The possibility of proactive decision-making in real time through resource reallocation, process reinforcement and risk prevention, based on transparent cause-and-effect relationships rather than ex-post indicators.

In practical terms, this study is oriented towards solving a specific applied problem, namely: the proposed gravitational–inertial model is implemented as a computable macro-level tool. The model is designed to transform measurable scenario data into discrete recommendations on reconfiguring the levels of eight safety segments at the level of the maritime sector or an individual shipping company. On this basis, it is planned to develop a Python (Anaconda JupyterLab)–based decision-support module, which, for scenarios in the European region, will automatically calculate the relevant indicators, verify stability thresholds, and output interpretable changes to the configuration of the maritime safety multi-project. Thus, the study not only introduces a conceptual framework but also addresses a concrete control problem: how to transfer a safety multi-project from crisis or stressed regimes into a new balanced state on the basis of formal optimization procedures.

Literature review. The issues outlined in the introduction highlight the need to develop a comprehensive concept for managing a maritime safety project at the macro level. Such concepts are typically described through analogies with processes or phenomena from physics and other exact sciences. In this context, models and concepts describing global processes in the maritime transport sector were analyzed.

In [3], the authors treat global freight flows as a complex network characterized by “scale-free” regularities, gravity-type flow dependencies and diffusion-like dynamics of propagation over network nodes. This approach provides physical intuition for macro-level management of risks and resilience in supply chains (propagation of disruptions, bottlenecks), and lays the groundwork for policies at the level of port clusters and corridors. In turn, [4] formulates safe navigation as an MPC problem with probabilistic (chance-constrained) limitations, where “safety” is represented by barrier functions/admissible sets; trajectories are generated by an EMA router and safety is ensured within the control loop (PSB-MPC).

Further analogies are found in [5], which describes a risk-oriented “decision field” consistent with COLREGs and proposes a risk measure for vessel encounters based on entropy weights and TOPSIS, where the geometry of ship interaction (DCPA, TCPA, relative courses/speeds) is aggregated into a scalar risk indicator. Another study that introduces spatio-temporal barriers (ship domain) and combines them with local path planning also defines a “trust zone” (ship domain). This continues the classical physical analogy with potential/repulsive fields for collision avoidance, but reinforces it with kinematic–geometric constraints and COLREGs requirements [6].

In conceptual modelling of safety processes in the maritime sector, a controlled “flow” structure (stock–flow system) is considered separately in [7]. The authors model port congestion using a system-dynamics approach: causal feedback loops between hinterland demand, throughput capacity and sets of governance measures (infrastructure, multimodality, “smart strategies”, interconnectivity). However, these approaches are not directly suitable for designing a comprehensive maritime safety project that explicitly accounts for the human factor, as they remain narrowly focused on specific processes within the maritime domain.

Instead, attention is drawn to physical analogies of a gravitational–inertial nature, where the state of the system depends on moments and forces that keep an axis aligned in response to external disturbances. Similar ideas have appeared in other societal domains. The first example was identified in a book review that introduces a political metaphor in which a “compass” sets the direction through science, while a “gyroscope” stabilizes via a policy of “limited conflict” and dialogue within communities of citizens. This provides a valuable framework for public policy, but the paper does not offer formalization or precise definitions for the model [8].

Subsequently, the notion of a “cultural gyroscope” was found in [9]. The authors treat the conceptual level of culture as the axis, the institutional/behavioral/artefact levels as the “flywheel”, the employee as a “particle” on the flywheel, and entrepreneurship as the driving force of rotation.

While this idea is conceptually interesting, it remains too abstract for application in large-scale project management systems for maritime safety. A similar idea appears in macro-social and economic analysis, where the author introduces the notion of a "gyroscope-like economy": systems that maintain quasi-equilibrium only due to high "rotation speed" – hyper-mobility of people, goods and capital; once rotation slows down, failures emerge [10].

A more formalized use of gyroscopic framing is presented in an article where the authors apply it to digital transformation. They sketch physical analogues and map them to controllable factors: moment of inertia ↔ urban infrastructure (carrier of stability), "angular velocities" ↔ target thrust and the mechanism of the economic cycle. However, the proposed model is predominantly descriptive and verification-oriented: it identifies that infrastructure, knowledge and the economy correlate with the "effect" of transformation. It relies on an empirical panel and demonstrates statistically significant coefficients for the "infrastructure–knowledge–economy" triad.

By contrast, the maritime sector requires a control-oriented model that explicitly defines regulators. In other words, what is needed is a controllable physical-type model with thresholds, laws of precession and gravitation, and a direct operational linkage to open maritime data and managerial actions. Such a model would be suitable not only for "explaining" but also for actively managing a company and an industry-level programme in real time.

Research objectives. Based on the literature review, it can be stated that although there exist effective approaches and conceptual analogues for describing individual processes in the maritime domain, they do not cover all aspects of maritime safety at the macro level, generally lack formalization and measurable indicators, focus on isolated subsystems of the sector, and do not take into account project life cycles and mission in a global representation.

For this reason, the development of a comprehensive concept within a project-oriented framework for maritime safety management is proposed, which should provide a reference, controllable dynamics with stable benchmarks and well-defined stability thresholds.

By analogy with a gravitational–inertial device embedded in a project macro-environment, such a conceptual model must have a vertical axis corresponding to the project mission; an angular deviation representing strategic drift; spin representing the operational execution rhythm; and a longitudinal moment of inertia reflecting process maturity and institutional capacity. In the model, the external moment of forces is treated as the aggregated pressure of norms, oversight and environmental events, while precession corresponds to the frequency of reprogramming and revision of policies and requirements. The reserve of stable motion is interpreted as execution inertia, which determines the system's ability to maintain course without breakdowns and emergency reorientations.

Normative "gravitation" in the model is represented by the requirements of international conventions, national regulations and safety standards; it pulls the system towards its mission and generates corrective influence only when deviations occur. Hence, the key controllable levers are: increasing project maturity, maintaining a uniform execution rhythm, and reducing external and internal pressure through risk prevention and harmonization of interpretations. At the level of a state, sector or maritime cluster, the impulses of subsystems are aggregated: the better the "mission axes" of individual programmer and organizations are aligned, the lower the need for frequent reprogramming under a given level of external pressure.

In this formulation, the physical analogy of a gyroscopic device is used not as a mere metaphor but as a clearly structured state space for the control problem. The mission axis, execution rhythm and process maturity are mapped to the variables θ, ω_3 and I_3, respectively, while the external pressure of norms and risks is mapped to the disturbance torque τ and the indices H_t, G_t and S_t. Accordingly, the control problem is formulated as governing the evolution of these physically interpretable variables so as to satisfy the stability condition $L \geq L_{crit}$ and to minimise the precession frequency Ω. In other words, the gravitational–inertial model serves as the mathematical backbone that links the practical task of maritime safety management to a well-defined dynamical system with explicit control laws.

The aim of this study is to develop and validate a controllable gravitational–inertial macromodel of maritime transport safety and to implement it as a software-supported tool for multi-project management. To achieve this aim, the following objectives are set:

1. To formalize the analogy between the physical gyrocompass device and the structure of the safety multi-project by defining a consistent system of aggregated indicators (ω_3, I_3, H_t, G_t, S_t, θ, τ, L);

2. To construct influence matrices that link the eight safety segments P_1–P_8 with these indicators on the basis of expert weights and EMSA data;

3. To formulate a stability threshold and controllability laws describing how changes in segment levels affect the momentum L and the precession frequency Ω;

4. To implement an optimization module in Python that solves a weighted least-squares problem and generates discrete recommendations for different regional scenarios;

5. To demonstrate, on six representative scenarios for the European region, how the proposed control mechanism transforms crisis and stressed regimes into a new balanced state.

Main part of the research. From the methodological point of view, the proposed model is operationalized through a sequence of clearly reproducible steps. First, EMSA accident investigation reports and related open statistics are analyzed to derive expert weights that quantify the influence of the eight safety segments P_1–P_8 on the macro-indicators (ω_3, I_3, H_t, G_t, S_t, θ, τ); these weights are encoded in Tables 2–4 and normalized to form the influence matrix A. Second, amplitude ranges for each macro-parameter are specified on the basis of engineering judgement, which yields the diagonal scaling matrix D and the signed influence matrix B. Third, six representative regional scenarios are constructed (Table 5) by fixing plausible combinations of ω_3, I_3, H_t, G_t, S_t, θ, τ that correspond to baseline, stressed and crisis regimes. Fourth, for each scenario the control problem $x^* - x^s = B\Delta p^s$ is solved in a weighted least-squares sense under the stability constraint $L \geq L_{crit}$. Finally, the continuous solution Δp^s is discretized into integer levels $\Delta P_i \in \{-2, ..., 2\}$, which are interpreted as expert recommendations to strengthen, maintain or unload the corresponding segments. Taking into account the above features of the gravitational–inertial concept, we then construct a set of variable parameters with controllable elements of portfolios, programmes and projects within large maritime organizations and cluster systems (Table 1).

Table 1 – Variable parameters of the gravitational–inertial concept

Physical variable/parameter	***Interpretation in project management (macro level)***
Vertical axis (upward direction)	Mission and strategic objectives
Angle θ	Deviation from the mission (strategic loss of project synchronization)
Spin ω_3	Working execution cadence (stable rhythm of planning/ delivery/ audits, throughput capacity)
Precession Ω	Cadence of managerial reorientations (frequency of priority/ policy revisions)
Longitudinal moment of inertia I_3	System maturity (standards, processes, competencies, IT infrastructure, institutional memory)
Transverse moment of inertia $I_\perp$	Stiffness of interactions between subsystems (unified regulations, inter-agency alignment)
Angular momentum $L = I_3\omega_3$	Systemic execution inertia (resilience to turbulence)
Gravitational moment $\tau = mgl\sin\theta$	Aggregate external pressure (regulatory functions, market, risk events, societal demands)
Gravity g	Aggregate set of IMO, flag State and international maritime safety norms and rules, ISPS Code, etc.
Losses $dE/dt \leq 0$	Operational losses (bureaucracy, duplication, “manual” approvals, technical debt)

The analogies in Table 1 are chosen so that each physical variable captures a distinct managerial role. The vertical axis of the spinning top corresponds to the mission and strategic objectives because it defines the reference direction in space relative to which all deviations are measured. The spin ω_3 reflects the execution cadence of the multi-project, as the rotation speed determines how much stabilizing inertia can be accumulated. The longitudinal moment of inertia I_3 is mapped onto process maturity: a more "massive" and structured safety system is harder to deflect from its course. The gravitational moment $\tau = mgl\sin\theta$ aggregates the pressure of regulatory, market and societal forces, which tend to pull the system back towards the mission axis when deviations occur. In this way, the physical structure of the model directly mirrors the architecture of macro-level maritime safety management.

Analogy between g and "normative gravity". Let introduce the normative gravity vector (2):

$$\mathbf{g}_N(t) = G(t)\mathbf{e}_z, \tag{1}$$

where $G(t) \geq 0$ represents the aggregated pressure of norms and rules, and $\mathbf{e}_z$ is the "mission vertical" (normative axis) fixed in space (2).

$$G(t) = k_g\left(\sum_{r\in R} w_r R_r(t) + \sum_{q\in Q} v_q Q_q(t)\right). \tag{2}$$

Here R_r is an indicator of the intensity of the corresponding regime (frequency and strictness of inspections, penalty coefficients, new mandatory requirements, security levels, etc.); Q is a group of situational factors (geopolitics, war risks, hydro- and meteorological conditions, social pressure); $Q_q(t)$ are normalized indices of the influence of such factors; w_r, $v_q \geq 0$ are influence weights; $k_g > 0$ is a scaling coefficient in the torque units of the model. The interpretation is that $G(t)$ is the "pull-to-vertical factor", i.e. the combined effect of norms and environment at a given moment (3).

$$|\tau| = mgl\sin\theta,\ |\tau_N(\theta,t)| = \left|-\frac{\partial V_N}{\partial\theta}\right| = mG(t)l\sin\theta. \tag{3}$$

Taken together, Eqs. (1)–(3) formalise the normative-gravity block of the model. Equation (1) defines the normative gravity vector $g_N(t)$ as a vector aligned with the mission axis $\mathbf{e}_z$ whose magnitude $G(t)$ represents the aggregated pressure of maritime norms and rules; Eq. (2) decomposes $G(t)$ into weighted contributions of regulatory regimes $R_r(t)$ and situational factors $Q_q(t)$; Eq. (3) converts this pressure into a gravitational torque $\tau_N(\theta, t)$ that increases with the deviation angle θ, capturing how mission misalignment generates corrective forces in the system.

We then assume that the corresponding relationships between $G(t)$, the gravitational torque and the system state hold. From this it follows that normative "gravity" does not generate a moment about axis 3, and therefore the projection $L = I_3\omega_3$ is preserved.

Law of controlled precession (macro level) (4).

$$\Omega_{sys} \approx \frac{\tau_{sys}}{I_{3,sys}\cdot\omega_{3,sys}}. \tag{4}$$

Equation (4) expresses the macro-level precession frequency Ω_{sys} as the ratio of the total disturbance torque τ_{sys} to the axial momentum $I_{3,sys}\omega_{3,sys}$; in other words, the higher the maturity $I_{3,sys}$ and execution rhythm $\omega_{3,sys}$, or the lower the disturbance torque τ_{sys}, the less frequently the multi-project has to be reprogrammed.

This leads to a direct organizational conclusion: in order to avoid "rocking" (an excessive frequency of project/portfolio reprogramming), it is necessary to increase system maturity $I_{3,sys}$ and maintain a stable execution cadence $\omega_{3,sys}$, while simultaneously reducing the external and internal torque τ_{sys} (risk prevention, harmonization of interpretations, transparency of decisions).

3. "Global system": aggregation at the level of state/industry/cluster (5).

For a set of coordinated subsystems $i = 1.N$:

$$L_{sys} = \sum_i L_i,\ \tau_{sys} = \sum_i \tau_i,\ \frac{dL_{sys}}{dt} = \tau_{sys}. \tag{5}$$

With well-aligned mission axes (6):

$$L_{sys} \approx \left(\sum_i I_{3,i} \right) \omega_{3,sys}, \ \Omega_{sys} \approx \frac{\sum_i \tau_i}{\left(\sum_i I_{3,i} \right) \omega_{3,sys}}. \quad (6)$$

System stability threshold: $L_{sys} \geq 2\sqrt{I_{\perp,sys} m_{ef} g l_{ef} \cos\bar{\theta}}$.

Here $I_{\perp,sys}$ the first coefficient characterizes the "transverse" stiffness of inter-agency links; $m_{ef} g l_{ef}$ the second is the aggregate "weight" of external pressure; $\bar{\theta}$ the third is the mean deviation angle. Equations (5) and (6) show that, when the mission axes of subsystems are aligned, their individual momenta L_i and disturbance torques τ_i are aggregated into the overall momentum L_{sys} and precession frequency Ω_{sys} of the maritime safety system. The stability inequality defines a minimum value of L_{sys} that must be maintained, meaning that only above this threshold can the system operate in a controlled-precession regime without falling into chaotic reorientations. The meaning is that there exists a minimally required "powerful momentum" L_{sys} (the product of maturity and rhythm), below which a controlled precession regime of projects becomes impossible.

4. Formal model of controlled dynamics

4.1. Continuous time (strategic level). A continuous-time model is introduced in the form of a dynamic system (7, 8).

$$\dot{\theta} = f(\theta, \Omega, ...) + d(t); \quad (7)$$

$$\dot{\omega} = -\alpha\omega_3 - \beta \text{loss} + u_\omega, \ \dot{I}_3 = -\delta I_3 + u_I, \quad (8)$$

where u_ω – "fine-tuning of rhythm" (rhythm of planning/delivery, preventive maintenance, staffing);

u_I – investments in maturity (standards, procedures, competencies, digitalization);

α, β, δ – loss parameters;

$d(t)$ – disturbances (risk events, regulatory changes).

Equations (7) and (8) jointly describe the continuous-time dynamics of the strategic variables. The first equation specifies how the deviation angle θ evolves under the influence of precession and external disturbances, while the second governs the evolution of execution rhythm ω_3 and maturity I_3 as a balance between natural losses and managerial control actions u_ω and u_I.

4.2. Discrete time (tactical / operational level; step = control period) (9, 10).

$$\theta_{k+1} = \theta_k - K_p\theta_k - K_d(\theta_k - \theta_{k-1}) + g\left(\frac{\tau_k}{I_{3,k\omega_3,k}}\right) + v_k; \quad (9)$$

$$\omega_{3,k+1} = (1-\alpha)\omega_{3,k} + u_{\omega,k} - \beta \text{loss}_k, \ I_{3,k+1} = I_{3,k} + u_{I,k} - \delta I_{3,k}, \quad (10)$$

where K_p, K_d form a "PD controller" for mission alignment, and v_k denotes noise/disturbances.

Equations (9) and (10) provide a discrete-time counterpart of the continuous model for a chosen control period. They show how, at each step k, the controller updates the mission angle θ_k, execution cadence $\omega_{3,k}$ and maturity $I_{3,k}$ in response to current deviations, disturbance torque and the selected control actions, thus operationalizing the strategic dynamics for practical planning cycles.

The objective function F_p (a class of controlled optimization problems) (11). This objective function penalizes large deviations of the key indicators θ, Ω and the energy-related term, as well as excessive control efforts u_ω and u_I; it therefore encodes the trade-off between achieving a stable regime and limiting the cost and intensity of managerial interventions:

$$F_p = \min_{u_\omega, u_I} \sum_k \left[\omega_\theta \theta_k^2 + \omega_\Omega \Omega_k^2 + \omega_E \overset{g}{E}{}_k^2 + \omega_u \left(u_{\omega,k}^2 + u_{I,k}^2 \right) \right], \quad (11)$$

subject to the dynamic constraints and the stability threshold $L_k \geq L_{crit,k}$. This is a natural place for applying predictive control methods.

The four controllability laws derived from the obtained relations define the logic of macro-level management. First, the precession law states that the frequency of reorientation Ω increases with growth in the total external disturbance moment τ and decreases as maturity I_3 and operational rhythm ω_3 increase; therefore, before initiating frequent meetings or reprogramming cycles, I_3 should first be reinforced and ω_3 stabilized. Second, the threshold law asserts that when the momentum of stable motion is insufficient ($L < L_{crit}$), the system enters "nutations" – chaotic reorientations and emergency directives; consequently, the condition $L \geq L_{crit}$ must be treated as a hard policy constraint. Third, the energy law fixes that any losses accelerate the depletion of L ($dE/dt \leq 0$), so eliminating sources of loss directly extends the resource of the stable regime. Fourth, the axis alignment law indicates that the smaller the average angular mismatch θ between subsystems ("aligned missions"), the better the individual momentum vectors L_i add up in a single direction and the lower Ω_{sys} becomes for the same τ. Taken together, these provisions establish a hierarchy of managerial actions: priority is given to increasing I_3 and ω_3, guaranteeing the threshold L_{crit}, systematically removing losses, and aligning subsystems around a common mission (Fig. 1).

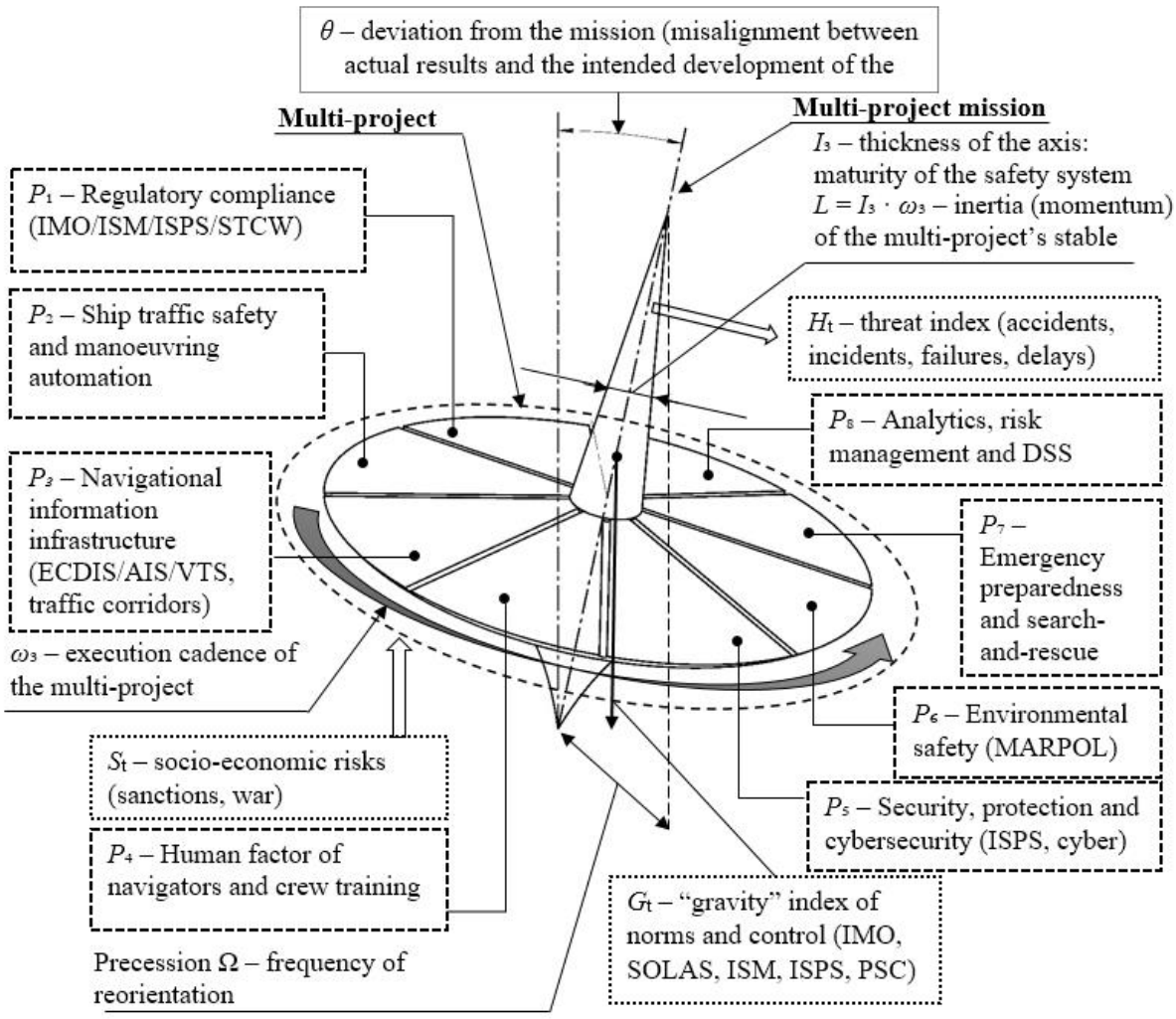


Figure 1 – Diagram of the dynamics of multi-project management in maritime safety

Within multi-project management, the set of tasks can thus be represented as a coherent programme of actions. First, integration is ensured: alignment of the "axes" of all projects with a common mission, minimization of the average deviation θ, and strengthening of inter-agency

interface stiffness (growth of $I_{\perp}$). In parallel, a maturity ramp-up plan for I_3 is implemented: updating procedures and regulations, developing a competence framework, and deploying unified digital registers with a fixed increment step of the maturity indicator. The execution rhythm is stabilized through cadence-based planning, regular audits and preventive cycles, the use of WIP limits, and avoidance of "peaks/valleys" in throughput, which keeps the "spin" ω_3 at the specified level. Resource allocation is organized as a balance between long-term investments u_I (in maturity) and operational support u_ω (for rhythm), with the aim of minimizing the frequency of reorientations Ω under the constraint $L \geq L_{crit}$.

Risk management is directed at reducing the disturbance moment τ through event prevention, early detection of deviations, and unified interpretation of requirements, organized according to a "single window" principle for incidents. The quality and continuous improvement loop is oriented towards minimizing the loss rate dE/dt via elimination of duplication, automation, and targeted efficiency audits with the construction of a "loss map" along the value stream. Stakeholder communications are supported through a consistent information policy and regular reviews centred on the core metrics $\{\theta, \Omega, \omega_3, I_3\}$. When external disturbances increase, controlled pivots are executed: the trajectory is deliberately changed while preserving the I_3 core and following a transition plan that maintains the "spin" ω_3 and does not violate the stability condition. In this formulation, the multi-project becomes both controllable (via the threshold L_{cr}) and measurable (via standardized indicators), ensuring reproducibility of management decisions at the macro level.

Thus, the proposed physical gravitational–inertial model is transformed into a multi-project governance architecture in which maturity and execution rhythm control the frequency of reprogramming, while elimination of "losses" prolongs the "life cycle" of the stable regime of the multi-project. This model is sufficiently rigorous and, at the same time, operational for implementation in real macro-level maritime safety management systems.

Within the proposed model, the internal state of the maritime safety multi-project is described by three basic parameters: the execution cadence ω_3 (the rhythm of operational cycles), the integral process maturity I_3, and the generalized momentum of the stable regime $L = I_3\omega_3$.

In this context, the execution cadence ω_3 denotes the regularity and throughput of operational cycles (planning, service, audits, corrective actions) expressed on a dimensionless scale from "fragmented and irregular" to "continuous and well-paced". The integral process maturity I_3 characterises the degree to which safety-related procedures, competencies, digital tools and institutional memory are formalised and consistently applied. The momentum $L = I_3\omega_3$ therefore represents the reserve of stable motion of the multi-project: high values of L indicate that the system can withstand external disturbances without frequent emergency reorientations. Throughout the paper, these terms are used in this precise operational sense.

To formalize the impact of individual multi-project segments (P_1–P_8) on these parameters, it is reasonable to introduce an expert weight matrix that reflects the relative importance of each segment in maintaining work rhythm, process maturity and the ability of the system to preserve a stable regime under disturbances (Tables 2–4). For expert assessment, we use EMSA reports [11].

The second block of model parameters reflects the interaction of the multi-project with the risk environment, which is described by the threat index H_t, normative "gravity" G_t, socio-geopolitical risk index S_t, and the aggregated disturbance moment τ. These variables characterize how strongly external factors (incidents, regulatory requirements, sanction regimes, geopolitical events) affect the system, forcing it to change its precession, rhythm and even its overall operating mode.

To construct the influence weight matrices in Tables 2–4, an expert elicitation procedure was performed with $m = 6$ experts for $n = 8$ segments $P_1 - P_8$ using a discrete scale $s_{q,i}^{(e)} \in \{0,1,2,3\}$, where q denotes a model parameter (e.g., ω_3, I_3, H_t, G_t, S_t, θ, τ), i is the segment index, and e is the expert index. Aggregated weights for each parameter were computed by averaging and normalizing [12, 13] (12):

$$\bar{s}_{q,i} = \frac{1}{m}\sum_{e=1}^{m} s_{q,i}^{(e)},\ a_{q,i} = \frac{\bar{s}_{q,i}}{\sum_{j=1}^{n} \bar{s}_{q,j}}, \tag{12}$$

where $a_{q,i}$ is the normalized contribution of segment P_i to parameter q.

Inter-expert agreement was assessed by converting scores into ranks and computing Kendall's coefficient of concordance W_q (separately for each parameter q). For each expert e, the scores $\left\{s_{q,i}^{(e)}\right\}_{i=1}^{n}$ were transformed into ranks $r_{q,i}^{(e)}$ (higher score implies higher priority). In the presence of ties, average ranks were used: if a tied group of size t occupies positions $k,...,k+t-1$, then each element is assigned (13):

$$r = \frac{k+\left(k+t-1\right)}{2}. \tag{13}$$

Next, aggregated ranks and their dispersion were computed as (14):

$$R_{q,i} = \sum_{e=1}^{m} r_{q,i}^{(e)},\ \bar{R}_q = m\cdot\frac{n+1}{2},\ S_q = \sum_{i=1}^{n}\left(R_{q,i} - \bar{R}_q\right)^2. \tag{14}$$

Kendall's coefficient with tie correction is (15):

$$W_q = \frac{12S_q}{m^2\left(n^3-n\right) - mT_q},\ T_q = \sum_{e=1}^{m}\sum_{g=1}^{G_e}\left(t_{e,g}^3 - t_{e,g}\right), \tag{15}$$

where $t_{e,g}$ is the size of the g-th tied group in expert e ranking and G_e is the number of tied groups. If needed, the statistical significance of agreement was assessed using the chi-square approximation (16):

$$\chi_q^2 = m\left(n-1\right)W_q,\ df = n-1. \tag{16}$$

Table 2 – Influence of multi-project segments P_1–P_8 on parameters ω_3, I_3, L (0 – minimal; 3 – key)

Multi-project segment	***Contribution to ω_3 (cadence, rhythm)***	***Contribution to I_3 (project maturity)***
P_1. Regulatory and legal compliance	1	3
P_2. Safety of ship traffic control; automation of collision avoidance and manoeuvring	2	2
P_3. Navigational information infrastructure (ECDIS/AIS/VTS)	2	1
P_4. Human factor and crew training	1	3
P_5. Security, protection and cybersecurity	1	1..2
P_6. Environmental safety	1	1
P_7. Emergency preparedness and SAR	1	2
P_8. Analytics, risk management and DSS	2	3

Expert assessment of the contribution of segments P_1–P_8 to these indices makes it possible to identify those areas through which external disturbances are transmitted into the multi-project most intensively.

Table 3 – Influence of multi-project segments P_1–P_8 on parameters H_t, G_t, S_t, τ

Multi-project segment	***Contribution to H_t (operational threats)***	***Contribution to G_t (normative "gravity")***	***Contribution to S_t (socio-geopolitical risks)***	***Contribution to τ (disturbance moment)***
P_1. Regulatory and legal compliance	1	3	1	2
P_2. Safety of ship traffic control; automation of collision avoidance and manoeuvring	3	1	0	2
P_3. Navigational information infrastructure (ECDIS/AIS/VTS)	3	1	0	2
P_4. Human factor and crew training	2	1	0	2
P_5. Security, protection and cybersecurity	2	2	2	3
P_6. Environmental safety	2	2	1	3
P_7. Emergency preparedness and SAR	2	1	1	1..2
P_8. Analytics, risk management and DSS	1..2	1..2	1..2	2

It should be noted that, in the proposed model, the angle θ is treated as an integral indicator of the multi-project's deviation from the mission and strategic goals of the maritime safety system. Unlike local performance indicators, θ reflects the cumulative effect of structural, operational and social disruptions across different segments. Therefore, it is reasonable to introduce a separate table that captures not only the notional "weight" of each segment's influence on θ, but also the qualitative nature of this influence, i.e. how a given block can realign or, conversely, systematically distort the "mission" vector.

Table 4 – Influence of multi-project segments P_1–P_8 on deviation from mission θ

Multi-project segment	***Influence on θ (deviation from mission)***	***Brief description of impact on mission alignment***
P_1. Regulatory and legal compliance	2	Systematic non-compliance with IMO/ISM/ ISPS/STCW requirements gradually diverts the system from its declared safety and reliability objectives.
P_2. Safety of ship traffic control; automation of collision avoidance and manoeuvring	2	Unsafe manoeuvres, COLREG violations and insufficient automation of collision avoidance directly undermine the mission of safe navigation.
P_3. Navigational information infrastructure (ECDIS/AIS/VTS)	2	Shortage or poor quality of navigational information leads to trajectories that do not match the target "safety corridors".
P_4. Human factor and crew training	2	Competence gaps, fatigue and typical navigator errors systematically shift operational practice away from the mission of safe and responsible fleet operation.

Continuation of table 4

P_5. Security, protection and cybersecurity	1	Security and cybersecurity incidents usually cause episodic, though sometimes sharp, deviations, without necessarily changing the long-term strategic vector.
P_6. Environmental safety	2	Ignoring environmental requirements contradicts the mission of sustainable maritime transport, creating a structural deviation from strategic goals.
P_7. Emergency preparedness and SAR	1	The level of emergency preparedness affects mainly the severity of consequences rather than the occurrence of deviations; therefore, its contribution to θ is indirect.
P_8. Analytics, risk management and DSS	3	This segment provides measurement, visualisation and controlled reduction of θ, turning the mission into a set of formalised criteria and regulatory actions.

We perform simulation modelling to assess how the states of the proposed model manifest themselves in the structural components of the maritime sector in the European region under six scenarios (Table 5).

We now carry out a numerical analysis for all scenarios. To this end, a formal calculation model is proposed, based on the data in Table 5 and the qualitative influence weights for segments $P_1 \ldots P_8$.

We first formalize the level of segments P_i. Let us introduce an activity level for each segment $p_i \in [0,3]$, $i = 1,...,8$, where: 0 corresponds to a segment that is practically undeveloped / inactive;

3 corresponds to a segment that is maximally developed / prioritized; p_i is the quantitative representation of its influence.

After normalization we obtain scaled values $p_i^{`} = \frac{p_i}{3} \in [0,1]$.

Next, we construct the influence matrix from the tables and the state vector of the model. We take the vector of macro-parameters: $x = [\omega_3, I_3, H_t, G_t, S_t, \theta, \tau] \in R^7$, a $L = I_3\omega_3$ as a derived indicator. The weights from the tables are interpreted as coefficients: for each segment P_i we have weights on a 0…3 scale.

Table 5 – Summary data of simulation modelling for scenarios 1–6

Scenario	I_3	ω_3	H_t	G_t	S_t	$\theta°$	τ	L_t	Ω	***Qualitative state***
1. Baseline stable	0.70	1.00	0.30	0.40	0.20	15	0.32	0.70	0.46	Stable, moderate precession
2. Norms tightening	0.70	1.00	0.30	0.70	0.20	18	0.44	0.70	0.63	Stable, but with increa-sing reprogramming frequency
3. Operational crisis	0.60	0.80	0.80	0.70	0.30	40	0.66	0.48	1.38	Unstable regime with “nutations”
4. Geopolitical shock	0.70	0.60	0.60	0.60	0.90	45	0.66	0.42	1.57	Unstable regime driven by external shock
5. Improvement programme	0.75	0.90	0.40	0.60	0.40	25	0.48	0.675	0.71	Transition towards a more stable regime
6. New balanced	0.85	1.0	0.20	0.50	0.30	10	0.34	0.935	0.4	Stable controlled precession regime

The data from Tables 2–4 are represented as normalized weights a_{ki}, obtained for example by dividing each raw weight by the sum of weights in the corresponding row (17).

$$a_{ki} = \frac{w_i^k}{\sum_{j=1}^{8} w_j^k}, \; k \in \{\omega, I, H, G, S, \theta, \tau\}. \tag{17}$$

In this way we obtain the influence matrix, which links the segment levels $P_1 \ldots P_8$ to the macro-parameters of the "spinning top" model (18).

$$A = \begin{bmatrix} a_{\omega 1} & \ldots & a_{\omega 8} \\ a_{I1} & \ldots & a_{I8} \\ a_{H1} & \ldots & a_{H8} \\ a_{G1} & \ldots & a_{G8} \\ a_{S1} & \ldots & a_{S8} \\ a_{\theta 1} & \ldots & a_{\theta 8} \\ a_{\tau 1} & \ldots & a_{\tau 8} \end{bmatrix} \in \ddot{Y}^{7\times 8}. \tag{18}$$

Modelling over a time horizon with respect to the segment levels P_i. Can, in a static approximation, be written as $x = x_{\min} + D \cdot Ap$, where $p = [p_1,\ldots,p_8]^T$ – is the vector of segment levels (normalized to [0,1]), $x_{\min}$ is the vector of minimal admissible parameter values, and $D = \operatorname{diag}\left(d_\omega, d_I, d_H, d_G, d_S, d_\theta, d_\tau\right)$ is a diagonal matrix of parameter amplitudes, i.e. the maximum range by which each parameter may change when all segment levels vary from $p_i = 0$ to $p_i = 1$.

For practical application, the model can be viewed as a mapping from an input scenario vector to an output vector of segment-level changes. The input consists of the current macro-parameters $x^{(s)} = \left[\omega_3, I_3, H_t, G_t, S_t, \theta, \tau\right]^T$ for a given scenario *s* and the corresponding target state x^*, which reflects the desired stability level (higher *L*, lower Ω, reduced risks). The model parameters include the influence matrix *B* and the priority matrix *W*, which are calibrated once from expert assessments and kept fixed. The outputs of the model are the continuous adjustment vector $\Delta p^{(s)}$ and its discretized form $\Delta P_i \in \{-2,...,2\}$, which specify how much each segment P_i should be strengthened or unloaded. Thus, the proposed system explicitly separates fixed structural parameters, scenario-dependent inputs and decision outputs that can be directly interpreted by policymakers.

Therefore, for the risk parameters (H_t, G_t, S_t, θ, τ) it is reasonable to introduce a negative sign (19):

$$x_k = x_k^{\text{ref}} - d_k \sum_i a_{ki} p_i, \; k \in \{H, G, S, \theta, \tau\}, \tag{19}$$

where x_k^{ref} is the "worse" baseline level (without control), and strengthening the segments decreases the value of the parameter.

Equation (17) converts the expert scores w_j^k from Tables 2–4 into normalized influence coefficients a_{ki} that sum to one across segments for each macro-parameter *k*. The resulting matrix *A* in Eq. (18) collects these coefficients and links the development levels of segments P_1–P_8 to the macro-parameters of the "spinning-top" model. Equation (19) then adjusts the sign of the risk-related parameters so that strengthening the relevant segments corresponds to a decrease of H_t, G_t, S_t, θ and τ, which is consistent with their interpretation as threat and pressure indices.

In vector form, this property can be written as $x = b + Bp$, where *B* contains positive signs for ω_3, I_3 and negative ones for H_t, G_t, S_t, θ, τ.

In such an approach, if we take, for example, six scenarios with different multiproject parameters:

– the current state vector $x^{(s)}$,

– the desired (reference) state x^*.

Thus, we pose the problem $x^* - x^s = B\Delta p^s$,

where $\Delta p^{(s)}$ are the recommended changes of segment levels for scenario *s*.

Since the system is, as a rule, overdetermined (7 parameters, 8 segments) and partially contradictory, it is logical to formulate a least-squares problem with priority weights (20):

$$\min_{\Delta p^{(s)}} \left\| W\left(B\Delta p^{(s)} - \Delta x^{(s)}\right)\right\|_2^2,\ \Delta x^{(s)} = x^* - x^{(s)},\ -p_i^{(s)} \le \Delta p_i^{(s)} \le 1 - p_i^{(s)},\ i = 1,...,8. \qquad (20)$$

Thus we have the priority matrix of parameters: $W = \mathrm{diag}(w_\omega, w_I, w_H, w_G, w_S, w_\theta, w_\tau)$.

Then, conceptually, the solution can be represented in the form (21).

Equation (20) formulates the problem of finding the change vector $\Delta p^{(s)}$ that minimises the weighted discrepancy between the desired parameter shift $\Delta x^{(s)}$ and the shift generated by segment adjustments $B\Delta p^{(s)}$, subject to capacity bounds for each segment. Equation (21) provides the closed-form solution of this weighted least-squares problem and is used in the software module to compute recommended changes for each scenario.

$$\Delta p^{(s)} = \left(B^T W^2 B\right)^{-1} B^T W^2 \Delta x^{(s)}. \qquad (21)$$

We proceed to ranges of adjustments depending on the scenario parameters.

For a practical solution $\Delta p^{(s)}$ it is advisable to move to discrete levels of intensity. To this end, we introduce the normalized magnitude of change for each segment: $r_i^{(s)} = \left|\Delta p_i^{(s)}\right|$.

Further, we set threshold levels for different scenarios:

$0 \le r_i^{(s)} < 0.1$ – "maintain the current level", $\Delta P_i = 0$;

$0.1 \le r_i^{(s)} < 0.2$ – "moderately strengthen/weaken", $\Delta P_i = \pm 1 level$;

$r_i^{(s)} \ge 0.2$ – "significantly strengthen/weaken", $\Delta P_i = \pm 2 level$.

The sign $\Delta p_i^{(s)}$ indicates which adjustment mode to assign:

– strengthen the segment (if $\Delta p_i^{(s)} > 0$);

– unload/simplify (if $\Delta p_i^{(s)} < 0$), which is important for scenarios where the system is overloaded.

Thus, for each scenario *s* the algorithm provides: set $x^{(s)} \rightarrow$ determine the target $x^* \rightarrow$ choose the priority matrix $W^{(s)} \rightarrow$ solve the least-squares problem for $\Delta p^{(s)} \rightarrow$ reclassify $\Delta p^{(s)}$ into discrete recommendation levels for each P_i.

During corrective actions, *L* and the stability threshold must be taken into account. Thus, we separately monitor: $L = I_3\omega_3$, $L_{кр}$ – the specified threshold.

After determining $\Delta p^{(s)}$, through the formulas for ω_3 and I_3 we obtain (22):

$$\omega_3^{new} = \omega_3^{(s)} + \Delta\omega_3^{(s)},\ I_3^{new} = I_3^{(s)} + \Delta I_3^{(s)},\ L^{new} = I_3^{new} \cdot \omega_3^{new}. \qquad (22)$$

Equation (22) maps the recommended segment changes into updated values of execution rhythm ω_3^{new}, maturity I_3^{new} and the resulting momentum L^{new}; these quantities are then compared with the stability threshold to verify whether the controlled scenario has indeed been moved into a stable regime.

In cases where $L^{new} \ge L_{crit}$, the system signals that the set Δp is insufficient – it is necessary either to increase the target values of ω_3, I_3, or to add the constraint $L^{new} \ge L_{crit}$ to the optimization problem.

Thus, we further proceed to the software implementation of the expert system for analyzing the state of the multiproject of maritime safety management.

Within the framework of the study, a full-fledged software module in Python was implemented and designed as a standalone script. At the beginning of the code, the main libraries are imported: `os` for working with the file system, `numpy as` np for vector computations, `pandas as pd` for tabular data structures, and `matplotlib.pyplot as plt` for plotting. A constant `RESULTS_DIR = r"...\Resalt"` is defined, after which the results folder is automatically created, if it does not yet exist, by means of `os.makedirs(RESULTS_DIR, exist_ok=True)`. The input data arrays are then formed: the scenarios are specified as `pd.DataFrame({...})` with the columns `"Scenario", "I3", "ω3", "Ht", "Gt", "St", "θ", "τ"`, as well as control fields `"L_paper"` and `"Omega_paper"`. The control indicators are computed using vector operations `scenarios["L_calc"] = scenarios["I3"] * scenarios["ω3"]` and `scenarios["Omega_calc"] = scenarios["τ"] / scenarios["L_calc"]`, after which the table is saved to a file by `to_csv(..., encoding="utf-8-sig")`.

The next block of code is responsible for constructing the model matrices. The influence weights of segments $P_1 \ldots P_8$ are described by separate `np.array` arrays (`W_omega, W_I3, W_Ht, W_Gt, W_St, W_tau, W_theta`), which are combined into a "raw" matrix using `np.vstack`. Row-wise normalisation is implemented via the division operation `weights_raw / weights_raw.sum(axis=1, keepdims=True)` using broadcasting; the result is then converted into a DataFrame `A_df = pd.DataFrame(A,index=param_names, columns=[f"P{i+1}" for i in range(8)])`. The parameter amplitudes are specified in the vector `d_vec = np.array([...])`, and the signs are specified in the array `signs = np.array([+1, +1, -1, -1, -1, -1, -1, -1])`. The influence matrix B is formed by the compact command `(signs[:, None] * d_vec[:, None]) * A` and then saved to a file via `B_df.to_csv(...)`. To specify the importance of the parameters, a diagonal priority matrix is used, `W = np.diag(W_diag)`, where `W_diag = np.array([1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1])`.

The core of the expert system is implemented in two functions. The function `compute_recommendations(x_current, x_target, B, W, segments, thresholds=(0.1, 0.2))` takes the current and target state vectors, converts them into NumPy arrays (`np.asarray(..., dtype=float)`), computes the difference `delta_x = x_target - x_current`, and solves a weighted least-squares problem via `np.linalg.solve(BW.T @ BW, BW.T @ rhs)`, where `BW = W @ B` and `rhs = W @ delta_x`. The segment modification vector `delta_p` is then formed, together with the intensities `r = np.abs(delta_p)` and the discrete levels `deltaP_disc`, which are determined by conditional operations on arrays (`deltaP_disc[(r >= t1) & (r < t2)] = 1`, etc.) and are converted into textual recommendations. The new configuration of parameters is calculated as `x_new = x_current + B @ delta_p`, and all results are stored in a DataFrame `rec_df = pd.DataFrame({...})`.

The second function, `classify_state(...)`, implements a simple logical classifier that, based on thresholds for `L`, `Omega`, `Ht`, `St`, and `θ`, returns a textual category of the state ("Stable controlled precession", "Conditionally stable", "Unstable"). In the main loop `for idx, row in scenarios.iterrows()`: the program sequentially processes all scenarios, accumulates the new states in `new_states`, aggregates the recommendations via `pd.concat(all_rec_dfs, ignore_index=True)`, and exports the consolidated results to the files `new_states_after_control.csv` and `segment_recommendations_all_scenarios.csv`. The final visualisation block uses matplotlib: plots are constructed with `plt.plot(...)`, `plt.bar(...)`, labels are configured (`plt.title, plt.ylabel, plt.xticks(rotation=20)`), and then saved as PNG files `L_by_scenario.png`, `Omega_by_scenario.png`, and `DeltaP_scenario3_operational_crisis.png` via

`plt.savefig(os.path.join(RESULTS_DIR, "..."), dpi=300)` followed by `plt.close()`. This demonstrates that a complete software tool has been developed, which combines tabular analytics, linear algebra, and graphical presentation of results within a single code base. As a result of the simulation modelling, the plots shown in Figs. 2–4 were obtained.

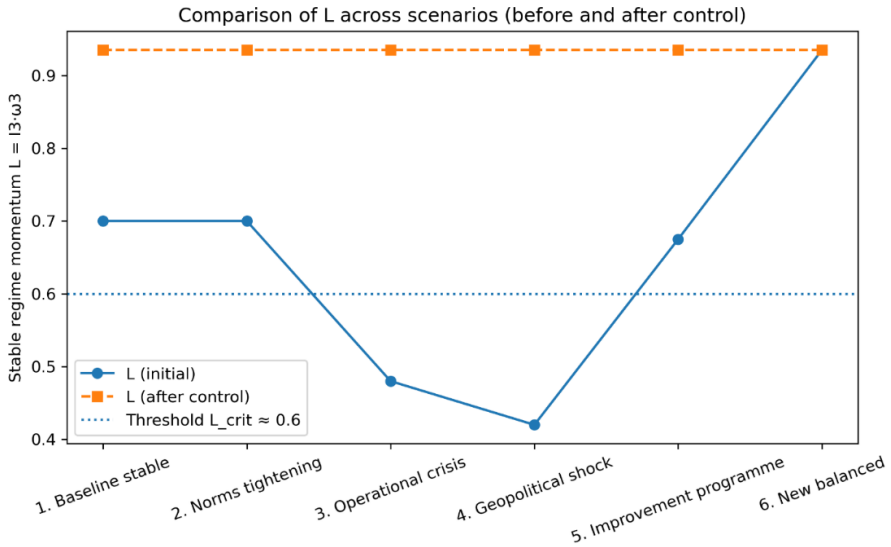


Figure 2 – Stable-regime momentum L

Figures 2–4 visualise the dynamics of the model for the six scenarios introduced in Table 5. For each scenario, the "initial" point corresponds to the uncontrolled state $x^{(s)}$, while the "after control" point is obtained by applying the recommended changes ΔP_i and recomputing L and Ω according to the formulas in Section 4.2. Thus, the trajectories on the plots explicitly show how the optimisation procedure changes the momentum of the stable regime, the precession frequency and the configuration of segment levels over the scenario set.

The plot of the stable-regime momentum L shows that, in the initial state, scenarios 3 ("Operational crisis") and 4 ("Geopolitical shock") have L values below the threshold $L_{crit} \approx 0.6$, while scenario 5 lies close to this boundary, which corresponds to unstable or borderline regimes. After control is applied, all six scenarios converge to the same level $L_{new} \approx 0.935$, which significantly exceeds the threshold, i.e. the model drives any scenario into a stable, balanced regime.

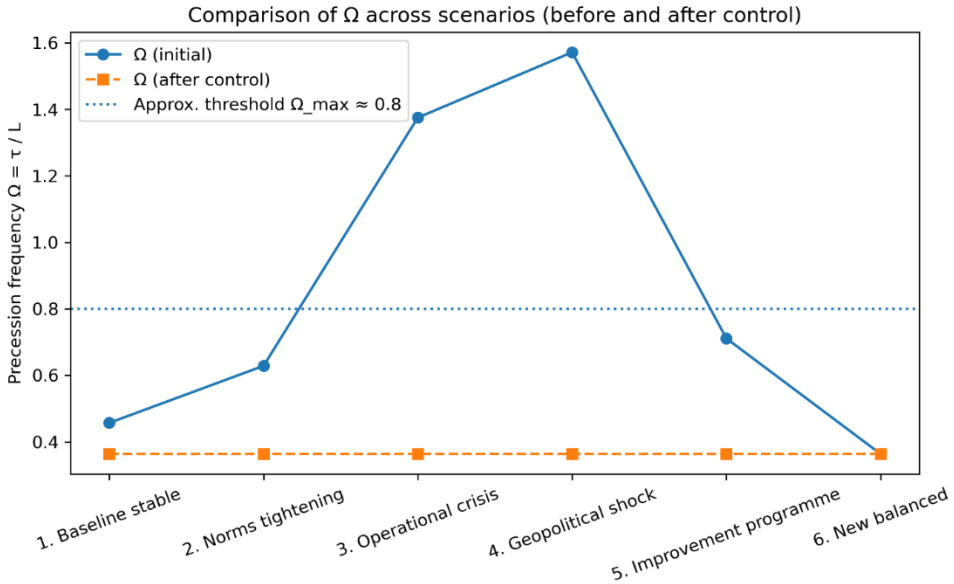


Figure 3 – Precession frequency Ω

The plot of the precession frequency $\Omega = \tau / L$ shows that, before control, scenarios 3 and 4 significantly exceed the recommended threshold $\Omega_{max} \approx 0.8$ (reprogramming frequency > 1.3–1.5),

while scenario 5 approaches a critical level. After applying the control actions, all scenarios have the same value $\Omega_{new} \approx 0.36$, which is well below the threshold, meaning that the system moves into a calm, well-controlled regime with infrequent reconfigurations.

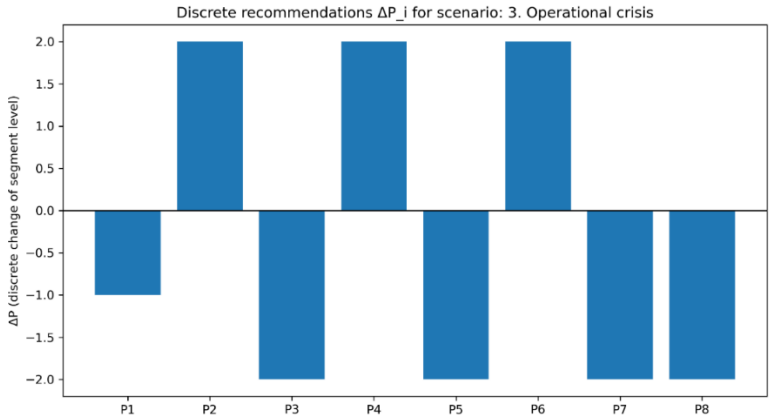


Figure 4 – Bar chart of discrete recommendations ΔP_i

The bar chart of discrete recommendations ΔP_i for the "Operational crisis" scenario illustrates how efforts are redistributed across the segments. The model suggests moderately reducing the load in the regulatory compliance segment (P_1), significantly strengthening segments P_2, P_4, and P_6 (manoeuvring, human factor, environmental safety), and significantly simplifying/unloading P_3, P_5, P_7, and P_8 (navigational infrastructure, security and cybersecurity, emergency readiness, analytics and DSS). This change profile proves sufficient to move the scenario out of operational crisis into the same stable "new balanced" state as for the other scenarios.

A separate program-generated report of the calculations by scenario is formed (Fig. 5).

Check of L and Ω against Table 5 (paper vs calculated):

	Scenario	L_paper	L_calc	Omega_paper	Omega_calc
0	1. Baseline stable	0.700	0.700	0.46	0.457143
1	2. Norms tightening	0.700	0.700	0.63	0.628571
2	3. Operational crisis	0.480	0.480	1.38	1.375000
3	4. Geopolitical shock	0.420	0.420	1.57	1.571429
4	5. Improvement programme	0.675	0.675	0.71	0.711111
5	6. New balanced	0.935	0.935	0.40	0.363636

Normalised influence matrix A (row sums = 1):

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
ω3	0.091	0.182	0.182	0.091	0.091	0.091	0.091	0.182
I3	0.194	0.129	0.065	0.194	0.097	0.065	0.065	0.194
Ht	0.061	0.182	0.182	0.121	0.121	0.121	0.121	0.091
Gt	0.240	0.080	0.080	0.080	0.160	0.160	0.080	0.120
St	0.133	0.000	0.000	0.000	0.267	0.267	0.133	0.200
θ	0.133	0.133	0.133	0.133	0.067	0.133	0.067	0.200
τ	0.114	0.114	0.114	0.114	0.171	0.171	0.086	0.114

Row-sum check: {'ω3': 1.0, 'I3': 1.0, 'Ht': 1.0, 'Gt': 1.0,

Matrix B (with amplitudes and signs):

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
ω3	0.045	0.091	0.091	0.045	0.045	0.045	0.045	0.091
I3	0.058	0.039	0.019	0.058	0.029	0.019	0.019	0.058
Ht	-0.036	-0.109	-0.109	-0.073	-0.073	-0.073	-0.073	-0.055
Gt	-0.096	-0.032	-0.032	-0.032	-0.064	-0.064	-0.032	-0.048
St	-0.093	-0.000	-0.000	-0.000	-0.187	-0.187	-0.093	-0.140
θ	-5.333	-5.333	-5.333	-5.333	-2.667	-5.333	-2.667	-8.000
τ	-0.046	-0.046	-0.046	-0.046	-0.069	-0.069	-0.034	-0.046

In addition, automated recommendations were generated for each scenario (Fig. 6).

SCENARIO: 1. Baseline stable
Current state x^(s): {'ω3': 1.0, 'I3': 0.7, 'Ht': 0.3, 'Gt': 0.4, 'St': 0.2, 'θ': 15.0, 'τ': 0.32}
Desired state x*: {'ω3': 1.1, 'I3': 0.85, 'Ht': 0.2, 'Gt': 0.5, 'St': 0.3, 'θ': 10.0, 'τ': 0.34}

Recommended changes of segment levels P1–P8:

Segment	delta_p_continuous	intensity_r = |delta_p|	deltaP_discrete	Recommendation	Scenario
P1. Regulatory compliance (IMO/ISM/ISPS/STCW)	-1.467	1.467	-2	significantly decrease segment	1. Baseline stable
P2. Traffic safety & manoeuvring automation	6.436	6.436	2	significantly increase segment	1. Baseline stable
P3. Navigational information (ECDIS/AIS/VTS)	-6.282	6.282	-2	significantly decrease segment	1. Baseline stable
P4. Human factor & crew training	0.727	0.727	2	significantly increase segment	1. Baseline stable
P5. Security, protection & cybersecurity	-0.874	0.874	-2	significantly decrease segment	1. Baseline stable
P6. Environmental safety (MARPOL)	-0.770	0.770	-2	significantly decrease segment	1. Baseline stable
P7. Emergency readiness & SAR	1.905	1.905	2	significantly increase segment	1. Baseline stable
P8. Analytics, risk management & DSS	1.185	1.185	2	significantly increase segment	1. Baseline stable

SCENARIO: 3. Operational crisis
Current state x^(s): {'ω3': 0.8, 'I3': 0.6, 'Ht': 0.8, 'Gt': 0.7, 'St': 0.3, 'θ': 40.0, 'τ': 0.66}
Desired state x*: {'ω3': 1.1, 'I3': 0.85, 'Ht': 0.2, 'Gt': 0.5, 'St': 0.3, 'θ': 10.0, 'τ': 0.34}

Recommended changes of segment levels P1–P8:

Segment	delta_p_continuous	intensity_r = |delta_p|	deltaP_discrete	Recommendation	Scenario
P1. Regulatory compliance (IMO/ISM/ISPS/STCW)	-0.185	0.185	-1	moderately decrease segment	3. Operational crisis
P2. Traffic safety & manoeuvring automation	14.734	14.734	2	significantly increase segment	3. Operational crisis
P3. Navigational information (ECDIS/AIS/VTS)	-9.326	9.326	-2	significantly decrease segment	3. Operational crisis
P4. Human factor & crew training	1.212	1.212	2	significantly increase segment	3. Operational crisis
P5. Security, protection & cybersecurity	-3.308	3.308	-2	significantly decrease segment	3. Operational crisis
P6. Environmental safety (MARPOL)	7.032	7.032	2	significantly increase segment	3. Operational crisis
P7. Emergency readiness & SAR	-2.148	2.148	-2	significantly decrease segment	3. Operational crisis
P8. Analytics, risk management & DSS	-3.409	3.409	-2	significantly decrease segment	3. Operational crisis

SCENARIO: 5. Improvement programme
Current state x^(s): {'ω3': 0.9, 'I3': 0.75, 'Ht': 0.4, 'Gt': 0.6, 'St': 0.4, 'θ': 25.0, 'τ': 0.48}
Desired state x*: {'ω3': 1.1, 'I3': 0.85, 'Ht': 0.2, 'Gt': 0.5, 'St': 0.3, 'θ': 10.0, 'τ': 0.34}

Recommended changes of segment levels P1–P8:

Segment	delta_p_continuous	intensity_r = |delta_p|	deltaP_discrete	Recommendation	Scenario
P1. Regulatory compliance (IMO/ISM/ISPS/STCW)	-0.227	0.227	-2	significantly decrease segment	5. Improvement programme
P2. Traffic safety & manoeuvring automation	-7.526	7.526	-2	significantly decrease segment	5. Improvement programme
P3. Navigational information (ECDIS/AIS/VTS)	7.216	7.216	2	significantly increase segment	5. Improvement programme
P4. Human factor & crew training	2.817	2.817	2	significantly increase segment	5. Improvement programme
P5. Security, protection & cybersecurity	2.536	2.536	2	significantly increase segment	5. Improvement programme
P6. Environmental safety (MARPOL)	-2.900	2.900	-2	significantly decrease segment	5. Improvement programme
P7. Emergency readiness & SAR	-0.277	0.277	-2	significantly decrease segment	5. Improvement programme
P8. Analytics, risk management & DSS	1.535	1.535	2	significantly increase segment	5. Improvement programme

Figure 6 – Results of scenario-based modelling of the expert proposal

The resulting automated recommendations may be useful when implementing corrective actions at the macro level of the maritime safety multiproject operation [14–18].

The scientific contribution of this work is threefold. First, a physically consistent gravitational–inertial macro-model of maritime safety is formulated, in which the mission, execution rhythm, process maturity and external pressure are embedded into a single controllable state-space with an explicit stability threshold L_{crit}. Second, a new system of aggregated indicators and influence matrices is proposed that connects eight safety segments $P_1 - P_8$ with the macro-parameters (ω_3, I_3, H_t, G_t, S_t, θ, τ, L) and allows one to derive scenario-specific recommendations by solving a weighted least-squares problem under stability constraints. Third, a full software implementation of the model in Python is developed, which integrates data ingestion, linear-algebra computations, optimization and visual analytics, and demonstrates, on real-world inspired scenarios, how crisis and stressed regimes can be systematically transformed into a stable controlled precession regime.

In contrast to the above works, which either employ physical metaphors in a qualitative way or focus on specific subsystems of the maritime domain, the present study develops a fully formalized and computable gravitational–inertial model tailored to macro-level maritime safety management. The control laws, stability threshold and optimization procedure are derived explicitly within this model and are not borrowed from existing gyroscopic analogies. At the same time, standard building blocks such as least-squares estimation and PD-type regulation are used in a classical manner and are referenced accordingly, while the integration of these elements into a coherent multi-project governance framework constitutes the principal original contribution of the paper.

Conclusion. Therefore, the results reported here should be regarded not as a restatement of known physical models, but as a new project-oriented methodology that rigorously combines the gravitational–inertial analogy, aggregated safety indicators and software-supported scenario optimization for maritime transport safety.

The project-oriented approach based on the gravitational–inertial model proposed in this study forms an integrated framework for managing maritime transport safety at the macro level. The model incorporates a system of aggregated parameters (execution rhythm ω_3, process maturity I_3, threat indices H_t, normative “gravity” G_t, socio-geopolitical risks S_t, strategic deviation θ,

disturbance torque τ and the impulse of the stable regime L), as well as multiproject segments P_1–P_8 that represent key safety domains – from regulatory compliance and the human factor to cybersecurity, environmental safety and DSS. Based on expert weights, influence matrices were constructed and a Python software module was developed that automates scenario assessment, solves a weighted least-squares problem to determine optimal changes in segment levels, and provides discrete recommendations on their strengthening or unloading. Simulation of six typical scenarios for the European region showed that application of the proposed control mechanism makes it possible to transform both crisis [19, 20] and stressed regimes into a stable balanced state with an increased impulse L and a reduced precession frequency Ω, thus ensuring proactive corrective actions at the maritime safety level.

REFERENCES

1. Angular velocity and Eulerian angles. (2021, February 14). Classical Mechanics (Tatum). LibreTexts Physics, from: https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Classical_Mechanics_%28Tatum%29/04%3A_Rigid_Body_Rotation/4.02%3A_Angular_Velocity_and_Eulerian_Angles.

2. University of Virginia, Department of Physics. (n.d.). Euler's angles [Lecture notes, PDF]. Retrieved 2025, from: https://galileoandeinstein.phys.virginia.edu/7010/CM_26_Euler_Angles.pdf.

3. Kaluza, P., Kölzsch, A., Gastner, M. T., & Blasius, B. (2010). The complex network of global cargo ship movements. *Journal of the Royal Society Interface*, 7(48), 1093–1103.

4. Tengesdal, T., Johansen, T. A., & Brekke, E. F. (n.d.). Chance-constrained PSB-MPC for autonomous surface vessels: *EMA route planning and safety control* (Unpublished manuscript).

5. Xiong, X., Wang, R., Gong, Y., Chen, H., & Chen, H. (2023). Risk assessment for COLREGs-compliant autonomous collision avoidance decision. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11, 422.

6. Wang, P., Hu, Q., Wang, C., & Lian, C. (2021). Ship domain model for multi-ship collision avoidance. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(3), 307. https://doi.org/10.3390/jmse9030307.

7. Xu, B., Li, J., Liu, X., & Yang, Y. (2021). System dynamics analysis for the governance measures against container port congestion. *IEEE Access*, 9, 13612–13623. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049967.

8. Hosticka, C. J. (1995). Review of the book Compass and gyroscope: Integrating science and politics for the environment (K. N. Lee). *JSTOR*. (Stable ID: 30172495).

9. Wu, W., & Zhao, J. (2018). Cultural gyroscope model: Matching staff with organizations. *Journal of Research in International Business and Management*, 5(1), 90–95. https://doi.org/10.14303/jribm.2018.019.

10. Xiang, B. (2020). The gyroscope-like economy: Hypermobility, structural imbalance and pandemic governance in China. *Inter-Asia Cultural Studies*, 21(4), 521–532. https://doi.org/10.1080/14649373.2020.1832305.

11. European Maritime Safety Agency. (n.d.). Accident investigation publications: Annual overview. Retrieved from https://www.emsa.europa.eu/accident-investigation-publications/annual-overview.html?utm_source.

12. Dong, Zewei & Yang, Jingxuan & Yuan, Runze & Su, Guangzhen & Lei, Ming (2025). A Game-Theoretic Kendall's Coefficient Weighting Framework for Evaluating Autonomous Path Planning Intelligence. Automation. 6. 85. https://doi.org/10.3390/automation6040085.

13. Gwet, K. L. (2014). Measures of association and item analysis. In Handbook of inter-rater reliability: The definitive guide to measuring the extent of agreement among raters (4th ed., Chap. 12, pp. 343–365). Advanced Analytics, LLC.

14. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Onishchenko, O., Prabowo, A., Jurkovič, M., Sagaydak, O., & Pavlova, N. (2025). Systematic approach to ergatic systems risk management in maritime

operations. *Journal of Risk Analysis and Crisis Response*, 15, 22. https://doi.org/10.54560/jracr.v15i3.633.

15. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Savieleva, I., Koryakin, K., Prabowo, A., Jurkovič, M., & Sapiha, V. (2025). Performance criteria assessment of marine radionavigation systems reliability under degradation factors. *IET Intelligent Transport Systems*, 19. https://doi.org/10.1049/itr2.70094.

16. Sagaydak, O., Melnyk, O., Voloshyn, A., & Ternovsky, V. (2025). Mathematical model of selecting the optimal scenario for ship operations based on a risk-oriented network of criteria. *Herald of the Odessa National Maritime University*, 206–222. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-3-206-222.

17. Zinchenko, S. (2024). Using redundant control to minimize energy consumption. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, (1), 163–173. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.163-173.

18. Nosov, P. S., Zinchenko, S. M., Prokopchuk, Yu. A., Popovych, I. S., & Litovchenko, V. I. (2021). Influence human factor on safety's planning route of water transport. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, 3(21), 36–51. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2021.1.24.057-070.

19. Ponomaryova, V., & Nosov, P. (2024). Development of a method for predicting hazardous ship trajectories under uncertainty of navigator actions. *Technology Audit and Production Reserves*, 5(2(79)), 44–55. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.313523.

20. 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.

Носов П. С. ПРОЄКТНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД У ЗАВДАННЯХ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ ЗА ПРИНЦИПОМ ГРАВІТАЦІЙНО-ІНЕРЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

У даній статті запропоновано проєктно-орієнтований підхід щодо управління безпекою морського транспорту що спирається на фізичні аналогії гравітаційно-інерційної моделі. В огляді літератури, показано, що традиційні підходи зосереджуються на окремих показниках і процесах морського транспорту: затримки, інциденти, невідповідності, однак це не надає цілісної керованої концепції сукупності проєктів безпеки та їх стійкості до зовнішніх і внутрішніх збурень.

У рамках статті розроблено формалізовану систему узагальнених параметрів, що включає в себе ритм виконання ω_3, зрілість I_3, індекси загроз H_t, нормативної «гравітації» G_t, соціально-геополітичних ризиків S_t, стратегічне відхилення θ, момент збурень τ, імпульс стійкого режиму L. Окремо додано сегменти мультипроєкту P_1-P_8, що охоплюють нормативну відповідність, керування рухом, навігаційну інфраструктуру, людський фактор, охорону й кібербезпеку, екологічну безпеку, аварійну готовність і СППР. Це дало можливість на основі експертних ваг побудовано матриці впливів і сформулювати закони керованості, порогові умови стійкості та критерії для мультипроєктного керування.

Окремою частиною дослідження є розробка і застосування програмного модуля на мові Python (Anaconda JL), який реалізує задачі зважених найменших квадратів, автоматично оцінює імовірні сценарії та генерує експертні рекомендації щодо стабілізації стану безпеки морського транспорту. Результати імітаційного моделювання показали, що запропонований підхід дає змогу зменшувати загрози кризових режимів, наближати їх до стійкого збалансованого стану з підвищеним імпульсом L.

Практичне значення роботи полягає в тому, що модель може бути інтегрована в цифрові платформи моніторингу, використовувати відкриті дані EMSA, служб і контролюючих відомств у портах, компаніях та слугувати основою для формування складних мультипроєктів безпеки галузі морського транспорту, узгоджених із місією судноплавних компаній і міжнародних морських організацій.

Ключові слова: *проєктно-орієнтований підхід; гравітаційно-інерційна модель; мультипроєкт безпеки мореплавства; експертна система; сценарний аналіз; управління проєктами; автоматизація; Python; інтелектуальні системи.*

© Nosov P.

Статтю прийнято до редакції 21.11.2025

УДК 004.942:656.61.052

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ СПРОЩЕНИХ УЯВЛЕНЬ НА ПРОЦЕСИ ПОВОРОТУ СУДНА

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

Носов П. С., *к.т.н., доцент, завідувач кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій ім. проф. Р. В. Мерката, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766.*

Об'єктом дослідження є процеси повороту судна.

Точні моделі у вигляді системи диференційних рівнянь можуть оброблятися у бортовому обчислювачі системи керування. Але на більшості суден такого спеціалізованого обчислювача немає, тому виникає необхідність оцінювати поведінку судна по спрощеним уявленням. Спрощені уявлення стали розроблятися для пояснення незвичних поведінкових ефектів, які спостерігаються на борту судна, як то видиме обертання навколо полюсу повороту, обертання судна, яке штовхають два буксири лагом, при появі поздовжньої швидкості, «вислючий» ефект, тощо. Обов'язковою умовою побудови спрощених уявлень є усталений рух судна. Так, видимий полюс повороту може спостерігатися лише на усталеній циркуляції. Під час перехідних процесів він швидко переміщується, не фіксуючись в одній точці. Спрощені уявлення повинні не тільки пояснювати незвичні поведінкові ефекти, але й узгоджуватися з базовими положеннями теоретичної механіки. На жаль, у деяких публікаціях і навіть керівництвах по управлінню судном, використовуються уявлення, які не вірно трактують поведінку судна. У роботі спростовано помилкові уявлення щодо полюса повороту, центру бокового опору і центру обертання. Отриманий результат пояснюється використанням повної математичної моделі (системи диференційних рівнянь лінійного і кутового руху судна) як еталону, наукового підходу, положень теоретичної механіки та гідродинаміки. Критичний аналіз існуючих уявлень проведено для правильного розуміння судноводіями поведінки судна, що дозволить уникнути прийняття помилкових управлінських рішень та підвищити безпеку судноводіння.

Ключові слова: *безпека судноплавства; полюс повороту; центр бокового опору; центр обертання; вислючий ефект.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.143-155

Вступ. Питання безпеки є ключовим у судноплавстві. Від його правильного вирішення залежить цілісність судна, вантажу та людського життя. Існує декілька основних напрямів підвищення безпеки судноплавства. Одним із них є постійне підвищення компетентності (знань, умінь та навичок) судноводіїв. Проте, як показує практика, даний підхід в останні десятиліття не дає пропорційних затраченим зусиллям результатів, через, це значно зріс потік інформації для прийняття рішення і судноводій не встигає її обробляти в реальному часі. Другий напрям – впровадження автоматизованих систем керування, які виконують «чорнову» роботу по переробці первинної інформації, відображенні необхідних для прийняття рішення даних, формуванні попереджувальних повідомлень тощо. У таких системах управлінські рішення все одно приймаються судноводієм. Третім напрям є забезпечення міцності корпусів суден, які працюють у складних умовах навантаження [1], підвищення довговічності корпусів, шляхом використання полімерних покриттів та сучасних методів контролю [2, 3] тощо. Четвертий і найбільш радикальний напрям на сьогодні – використання автоматичних модулів керування у автоматизованих системах. Представником такого модуля на сучасних суднах є авторульовий. Судноводій приймає рішення про застосування автоматичного модуля і потім лише спостерігає за його роботою. Можливості сучасних бортових обчислювачів дозволяють вирішувати і більш складні задачі, ніж підтримування руху заданим курсом чи заданим маршрутом. Вирішення деяких з них, наприклад, автоматичного скидання кінетичної енергії при неминучому зіткненні [4], автоматичного запобігання виникненню параметричного резонансу [5], автоматичного оптимального керування надлишковими структурами виконавчих пристроїв [6, 7], автоматичного обертання конвенційного одно гвинтового судна навколо полюсу повороту

[8], та інші, опубліковані авторами раніше, дозволяють суттєво підвищити надійність та ефективність систем керування.

Безпечність судноводіння залежить від коректності моделей, закладених у керівництва по судноводінню, якщо мова йде про ручне керування судном, або в математичне забезпечення, якщо мова йде про автоматичні модулі керування. Система динамічних рівнянь, яка описує лінійний (1) та кутовий (2) рух судна, наведена, наприклад, у описі математичної моделі тренажера Navi Trainer 6 [9] та багатьох інших джерелах

$$\begin{cases} (m+\lambda_{11})\dfrac{\partial V_x}{\partial t} = (m+\lambda_{22})V_y\omega_z - (m+\lambda_{33})V_z\omega_y + \sum\limits_{j=1}^{k} F_{xj}; \\ (m+\lambda_{22})\dfrac{\partial V_y}{\partial t} = (m+\lambda_{33})V_z\omega_x - (m+\lambda_{11})V_x\omega_z + \sum\limits_{j=1}^{k} F_{yj}; \\ (m+\lambda_{33})\dfrac{\partial V_z}{\partial t} = (m+\lambda_{11})V_x\omega_y - (m+\lambda_{22})V_y\omega_x + \sum\limits_{j=1}^{k} F_{zj}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} (I_x+\lambda_{44})\dfrac{\partial \omega_x}{\partial t} = (I_y+\lambda_{55})\omega_y\omega_z - (I_z+\lambda_{66})\omega_z\omega_y + (\lambda_{22}-\lambda_{33})V_yV_z + \sum\limits_{j=1}^{k} M_{xj}; \\ (I_y+\lambda_{55})\dfrac{\partial \omega_y}{\partial t} = (I_z+\lambda_{66})\omega_z\omega_x - (I_x+\lambda_{44})\omega_x\omega_z + (\lambda_{33}-\lambda_{11})V_xV_z + \sum\limits_{j=1}^{k} M_{yj}; \\ (I_z+\lambda_{66})\dfrac{\partial \omega_z}{\partial t} = (I_x+\lambda_{44})\omega_x\omega_y - (I_y+\lambda_{55})\omega_y\omega_x + (\lambda_{11}-\lambda_{22})V_xV_y + \sum\limits_{j=1}^{k} M_{zj}. \end{cases} \quad (2)$$

Найпроблемнішою частиною таких моделей є визначення зовнішніх сил та моментів через складну взаємодію надводних та підводних елементів судна з навколишнім середовищем. Динамічні рівняння лінійного (1) та кутового (2) руху судна можуть оброблятися у бортовому обчислювачі, для прогнозування руху, вирішення інших задач автоматичного керування. Але на більшості суден такого спеціалізованого обчислювача немає, тому виникла необхідність оцінювати поведінку судна по спрощеним уявленням. Спрощені уявлення стали розроблятися для пояснення неочевидних ефектів, які спостерігаються на борту судна, як то видиме обертання навколо полюсу повороту, початок обертання судна, яке штовхають два буксири лагом, при появі поздовжньої швидкості, «віслючий» ефект тощо. При цьому, такі уявлення зводяться до визначення характеру переміщення особливих точок судна, як то центру обертання, центру бокового опору та полюсу повороту. Обов'язковою умовою побудови спрощених уявлень є усталений рух судна. Так, видимий полюс повороту може спостерігатися лише на усталеній циркуляції. Під час перехідних процесів він швидко переміщується, не фіксуючись в одній точці. На жаль, у деяких публікаціях і навіть керівництвах по управлінню судном, використовуються уявлення, які не вірно трактують поведінку судна. Такі уявлення повинні не тільки пояснювати неочевидні ефекти поведінки судна, але й узгоджуватися з математичною моделлю руху судна та базовими положеннями теоретичної механіки і гідродинаміки.

Об'єктом дослідження є процеси повороту судна.

Предметом дослідження є критичний аналіз спрощених уявлень на процеси повороту судна.

Постановка задачі. Провести критичний аналіз спрощених уявлень на процеси повороту судна та пояснити неочевидні ефекти у поведінці судна, використовуючи повну математичну модель (систему динамічних рівнянь поздовжнього і кутового руху), науковий підхід, положення теоретичної механіки та гідродинаміки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найбільш важливими роботами за останні 40 років, пов'язаними з дослідженням поведінки судна, є роботи H. Hooyer,

Ch. Tzeng, A. G. Chase, H. Cauvier, S. G. Seo, керівництво по судноводінню 2014 року, написане інструкторами порту Ревель.

У статті [10] розглядається поведінка судна, яке штовхають два буксири лагом із рівними силами і рівними плечами до центру обертання (автор називає його Pivot Point). При появі поздовжньої швидкості судна, воно починає обертатися. На думку автора, причиною обертання є зміщення центру обертання у напрямку руху судна, збільшення, за рахунок цього, плеча одного буксиру і зменшення плеча іншого буксиру.

Властивості полюса повороту, як умовної точки обертання, були розглянуті у статті [11]. Автор наводить формулу визначення положення полюса повороту $R = -\frac{V_y}{\omega_z}$, де V_y – бокова швидкість судна, ω_z – кутова швидкість обертання судна відносно центру ваги. Проведено лінеаризацію диференціальних рівнянь у каналах бічного та кутового рухів, для усталеного руху наведено формулу визначення положення полюса повороту через гідродинамічні характеристики судна та керування.

Значний вклад у розуміння поведінки полюса повороту внесла стаття капітана Кав'є [12]. Вважалося, що при відхиленні стерна судно обертається навколо центру обертання, який може зміщуватися у напрямку руху судна. Практичні маневрування показали, що таке уявлення призводить до навалювання судна на стінку доку при заході або виході. Автором показано, що існуючі уявлення про полюс повороту не враховували бокову швидкість, яка виникала при відхиленні стерна. Із врахуванням цієї швидкості, судно оберталося не навколо центру обертання, а навколо іншої точки – полюсу повороту, який знаходився по іншу сторону від міделя, що і було причиною навалювання. Також, у статті детально описано інший центр – Center of Lateral Resistance (COLR), який автор вважає точкою опори для важелів.

У роботі [13], для знаходження положення полюса повороту, автор використовує векторне рівняння $V + \omega \times R = 0$ та знаходить дві координати положення полюса повороту: абсцису $R_x = -\frac{V_y}{\omega_z}$ і ординату $R_y = \frac{V_x}{\omega_z}$. У загальному випадку, за наявності бокової і поздовжньої швидкості, полюс повороту розташовується не в діаметральній площині судна, як вважалося раніше, а в площині OX_1Y_1, паралельній палубі судна. В усталеному русі положення полюса повороту, що визначається абсцисою і ординатою, співпадає з центром циркуляції.

Метою статті [14] є формулювання правильних визначень, дослідження теоретичного аспекту полюса повороту та його застосування для практичного виконання базових і спеціальних маневрів. Вкладом авторів статті у розвиток теорії полюса повороту є дослідження поведінки полюса повороту для плоского руху судна, за наявності поздовжньої, бокової і кутової швидкості рискання. Автори вводять три центри: центр E планарного обертання, центр S обертання судна і полюс повороту P та розглядають положення цих центрів для різних варіантів обертання: чистий обертальний рух (Yaw only), боковий та обертальний рух (Sway+Yaw), поздовжній та обертальний рух (Surge+Yaw), поздовжній, боковий та обертальний рух (Surge+Sway+Yaw). У матеріалах першої та другої [15] статті положення полюса повороту розраховується відносно центру ваги.

Залежність плеча бокової гідродинамічної сили (положення центру бокового гідродинамічного опору) від кута дрейфу наведена у підручнику [16]. Дана залежність має вигляд $\bar{l}_R = 0{,}5 + \frac{l_{ЦБО}}{L} - \frac{\beta}{180}$, де $\bar{l}_R = \frac{l_R}{L}$ – відносне плече бокової гідродинамічної сили, β – кут дрейфу, $l_{ЦБО}$ – зміщення центру бокового опору відносно центру ваги при $\beta = 90^\circ$,

L – довжина судна. Як видно із наведеної формули, залежність відносного плеча бокової гідродинамічної сили від кута дрейфу має лінійний характер і змінюється у межах $|\beta| \le 0{,}5$.

У керівництві [17], розділ 5, розглянуті властивості полюса повороту, центру бокового опору (Neutral Point) та центру дрейфу (Center of Drift). Наведені дані грунтуються в основному на роботі Кав'є [12], з невеликими доповненнями.

Розрахунок гідродинамічних сил та моментів наведено у роботі [18]. На основі відомих експериментальних даних, за допомогою багатофакторного квазілінійного (лінійного за коефіцієнтами) регресійного аналізу, отримані вирази для констант поліноміальних моделей гідродинамічних сил і моменту на корпусі судна. Як фактори (регресори) взяті різні безрозмірні відношення геометричних параметрів судна, таких як довжина, ширина, осадка, коефіцієнт повноти. При виборі регресійних моделей оцінювалися значення нормованого R-квадрату та стандартних помилок.

У статті [19] розглянута задача статичної постановки судна з непрямостінними обводами корпусу на хвилю. Отримані залежності згинальних моментів і перерізуючих сил від частоти і амплітуди зустрічного хвилювання. Проведено аналіз впливу непрямостінності обводів корпусу на величини згинальних моментів і перерізуючих сил.

Проєктування та оптимізація форми корпусу судна, з метою мінімізації опору та забезпечення інших проєктних вимог, є добре відомою проблемою теорії та проєктування корабля. Запропонований у роботі [20] метод проєктування та оптимізації форми корпусу використовує CFD аналіз для оцінки опору при систематичних перетвореннях поверхні корпусу. Кожна окрема трансформація відповідає новому варіанту форми корпусу з перетвореною ділянкою поверхні. Усі варіанти, що підготовлені на основі початкової форми корпусу, належать до першого кроку оптимізаційного процесу. Вони використовуються у CFD розрахунках для оцінки змін опору у спокійній воді. У результаті, може бути отримана оптимальна форма по шпангоутах, що виражає оптимальний поздовжній розподіл постійного об'єму корпусу та відповідає оптимізованій формі поверхні корпусу. Даний метод був застосований до носових частин двох суден, включаючи добре відому форму корпусу KCS. Отримані результати оптимізації в умовах спокійної води були додатково оцінені на хвилюванні.

У статті [21] розглянуто обґрунтований вибір розмірів рибальського судна з великим коефіцієнтом повноти. Для вирішення поставленого завдання розроблено математичний апарат, до якого увійшли рівняння проєктування, у тому числі рівняння плавучості, мас, місткості, коефіцієнта повноти ватерлінії, стійкості, потужності, відносного подовження, коефіцієнта поздовжньої повноти, а також граничні умови та розрахунок економічних показників. Ключовим показником економічної рентабельності проєкту було визначено ефективність капіталовкладень. Для пошуку найбільш ефективного судна виконано варіативний розрахунок – розв'язання системи рівнянь із варіацією деяких вихідних даних. За результатами варіативного розрахунку визначено найбільш вдалі поєднання основних характеристик судна, що забезпечують найкращі економічні показники.

У статті [22] досліджувалося оцінювання маневреності високошвидкісних суден на ранніх стадіях їх проєктування. Раніше для цього використовувалися експериментальні, аналітичні та емпіричні методи. У наш час чисельні методи також застосовуються, зважаючи на їх точність і невеликий час обчислення. У роботі представлено гібридний чисельно – теоретичний метод для обчислення гідродинамічних коефіцієнтів із використанням CFD моделювання на основі рівнянь RANS. Комбінованим методом розраховано лінійні та нелінійні гідродинамічні коефіцієнти корпусу судна. Проведено порівняння результатів моделювання із розрахованими напівемпіричним методом Левандовського.

Підсумовуючи, слід зазначити, що останні уявлення про положення центру обертання, центру бокового опору та полюса повороту є наступними:

1. Положення центру обертання зміщується у напрямку руху судна [10].
2. COLR [12] / Neutral Point [17] є точкою опори для важелів.

3. Початкове положення COLR/ Neutral Point визначається положенням центру ваги та положенням центру площі підводної поверхні.

4. Положення COLR/Neutral Point залежить від диференту та поздовжньої швидкості судна.

5. Центр бокового опору (Centre of Drift) є точка, куди прикладені результуючі усіх сил: зовнішніх сил буксира, вітру тощо, сила стерна, гідродинамічна сила опору [17].

6. Судно не обертається навколо центру ваги [17].

7. Положення полюса повороту визначається абсцисою і ординатою та відраховується від центру ваги судна [13].

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є проведення критичного аналізу спрощених уявлень на процеси повороту судна та пояснення неочевидних ефектів у поведінці судна. Задачами дослідження є: аналіз літературних джерел та формування списку останніх уявлень про полюс повороту, центр бокового опору і центр обертання; спростування помилкових уявлень, на основі повної математичної моделі лінійного і кутового руху судна, як еталону, положень теоретичної механіки та гідродинаміки; формулювання висновків.

Основна частина. Нижче детальніше розглядаються помилкові уявлення про процеси обертання судна. Спочатку наводяться авторські цитати, а потім їх спростування. Надалі, автори даної статті використовують позначення центру бокового гідродинамічного опору, як CoLR, у який прикладена результуюча бокова гідродинамічна сила, та позначення COLR [12], положення якого визначено між центром ваги і центром бокового гідродинамічного опору.

Уявлення 1. «As long as the ship develops no headway or sternway, the result of the tugs' effort is sheer lateral motion of the ship. However, as soon as the ship starts moving through the water, ahead or astern, we see that a swing develops… We can simply say that head motion brings the pivot point forward which shortens the distance of the point of impact of the forward tug to the pivot point and consequently reduces the effective leverage of the forward tug. At the same time, the distance of the point of impact of the after tug to the pivot point increases which in turn increases the effective leverage of the after tug» [10].

Третє рівняння системи (2), за відсутності кутових швидкостей крену $\omega_x = 0$ і диференту $\omega_y = 0$, матиме вигляд

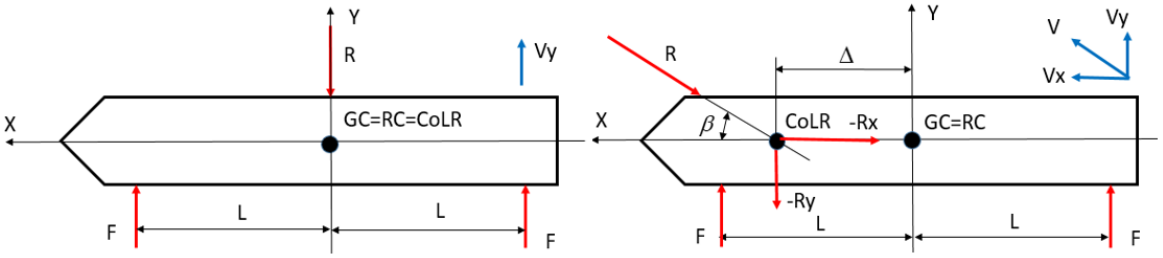
$$(I_z + \lambda_{66})\frac{\partial \omega_z}{\partial t} = (\lambda_{11} - \lambda_{22})V_x V_y + \sum_{j=1}^{k} M_{zj}\,. \qquad (3)$$

Із рівняння (3) видно, що за наявності поздовжньої та бокової швидкості руху (як у описаному вище експерименті) з'являється обертаючий момент $M_1 = (\lambda_{11} - \lambda_{22})V_x V_y$.

Оцінка величини моменту. Приєднані маси води $\lambda_{11}, \lambda_{22}$ та приєднаний момент інерції води λ_{66} можна розрахувати за формулами $\lambda_{11} = \frac{T}{2L}m$, $\lambda_{22} = \frac{2T}{B}\left(1 - \frac{B}{2L}\right)m$, $\lambda_{66} = \frac{2T}{B}\left(1 - 1.6\frac{B}{L}\right)I_z$ де m – маса судна, I_z – момент інерції судна, L – довжина судна, B – ширина судна, T – осадка судна. Наприклад, для судна «Сормовський» $m = 4.514e^6 кг$, $L = 119.2м$, $B = 13.4м$, $T = 3.5м$ $I_z = \frac{m}{12}\left(L^2 + B^2\right) = \frac{4.514e^6}{12}\left(119{,}2^2 + 13.4^2\right) = 5417e^6[кгм^2]$, $\lambda_{11} = \frac{3.5}{2\times 119.2}4.514e^6 = 0.066e^6[кг]$, $\lambda_{22} = \frac{2\times 3.5}{13.4}\left(1 - \frac{13.4}{2\times 119.2}\right)4.514e^6 = 2.23e^6[кг]$, $\lambda_{66} = \frac{2\times 3.5}{13.4}\left(1 - 1.6\frac{13.4}{119.2}\right)5417e^6 = 2329e^6[кг]$. Для поздовжньої швидкості

$V_x = 2м/с$, бокової швидкості $V_y = 1м/с$, величина моменту становить $M_1 = (\lambda_{11} - \lambda_{22})V_x V_y = \left(0.066e^6 - 2{,}23e^6\right) \times 1 \times 2 = -4.32e^6 [нм]$.

Другою причиною є зміщення центру бокового опору CoLR. На рис 1. наведені системи сил у описаному експерименті [10], за відсутності та наявності поздовжнього руху.



а) б)

Рисунок 1 – Система сил за відсутності та наявності поздовжнього руху

В усталеному стані, за відсутності поздовжнього руху, рис 1 а), сили буксирів F урівноважуються силою гідродинамічного опору R, прикладеною до CoLR, який співпадає з центром ваги GC. Моменти сил від буксирів також урівноважені, тому судно рухається лагом, без обертання.

За наявності бокового і поздовжнього руху, рис. 1 б), виникає кут дрейфу β між вектором швидкості судна і діаметральною площиною. Результуюча сила гідродинамічного опору діє під кутом β до діаметральної площини, а її складові $-R_x$ та $-R_y$ діють відповідно вздовж та перпендикулярно до діаметральної площини. Сила $-R_x$ не створює обертального моменту, тому, що її плече відносно GC дорівнює нулю, а бокова сила $-R_y$ створює момент $M_2 = -R_y \Delta$, де Δ – плече бокової гідродинамічної сили до центру обертання (центру ваги). У підручнику [16] наведена формула визначення відносного плеча бокової гідродинамічної сили

$$\bar{l}_R = 0{,}5 + \frac{l_{ЦБО}}{L} - \frac{\beta}{180}, \qquad (4)$$

де β – кут дрейфу у градусах, $l_{ЦБО}$ – зміщення центру бокового опору відносно центру обертання для $\beta = 90^\circ$, $\Delta = \bar{l}_R L$.

Для розглянутого вище прикладу $V_x = 2м/с$, $V_y = 1м/с$, $\beta = \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2}\right) = 27^\circ$, $\bar{l}_R = 0{,}5 - \frac{27}{180} = 0.35$, $\Delta = \bar{l}_R L = 0{,}35 \times 119{,}2 = 41{,}72 м$.

Для усталеного руху $R_y = C_y \rho \frac{V_y^2}{2} LT$, де $C_y = \pi\lambda\nu\frac{\beta}{2}$ – коефіцієнт бокового гідродинамічного опору корпусу, $\lambda = \frac{L}{B}$ – видовження корпусу, $\nu = 0.25$ – характеристика корпусу.

$$C_y = \pi\lambda\nu\frac{\beta}{2} = 3.14 \times \frac{119.2}{13.4} \times 0.25 \times \frac{1}{2} \times \frac{27}{57.3} = 1.65,$$

$$R_y = C_y \rho \frac{V_y^2}{2} LT = 1.65 \times 1024 \times \frac{1^2}{2} \times 119.2 \times 3.5 = 0.35e^6 [H],\ M_2 = -0.35e^6 \times 41.72 = -14.6e^6 [H \cdot м]$$

Моменти M_1 та M_2 одного знаку, їх сума дорівнює

$M_1 + M_2 = -4.32e^6 - 14.6e^6 = -18.92e^6[H \cdot м]$.

Сумарний момент створює кутове прискорення

$$\frac{\partial \omega_z}{\partial t} = \frac{M_1 + M_2}{(I_z + \lambda_{66})} = -\frac{18.92e^6}{5417e^6 + 2329e^6} = -0.0024[рад/с^2] = -0.14[гр/с^2].$$

Рухаючись з таким прискоренням, судно за $t = 10c$ повернеться на кут $\varphi = \frac{\partial \omega_z}{\partial t} t^2 = -0.14 \times 100 = 14.0[гр]$.

Як видно із вищенаведеного, причиною обертання судна є поява двох моментів: $M_1 = (\lambda_{11} - \lambda_{22}) V_x V_y$ та $M_2 = -R_y \Delta$, а не зміщення центру обертання, який залишається у центрі ваги судна.

Уявлення 2. «At a given moment the COLR of a vessel is that point where, if you apply an «effective» lateral force no rotation (if the vessel has a steady heading) will occur. Acting on this point, lateral force has no arm lever, therefore no turning moment, it only pushes the vessel sideways» [12]. «A transverse force, exerted on the neutral line, moves the ship sideways in the direction of the force without any rotation» [17].

На рис. 2 зображено випадок прикладання бокової сили F у центр бокового опору CoLR.

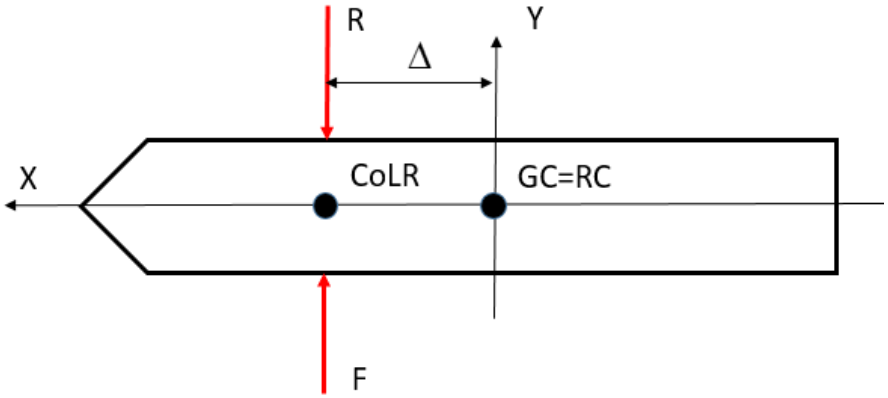


Рисунок 2 – Прикладання бокової сили до CoLR

Автори робіт [12] та [17], очевидно, мають на увазі положення теоретичної механіки, що сила, яка проходить через центр обертання, не створює обертаючого моменту, а значить центр бокового опору COLR є центром обертання. Насправді бокова сила F, прикладена до CoLR, не створює обертального моменту тому, що в усталеному русі (*if the vessel has a steady heading)* сила гідродинамічного опору R дорівнює прикладеній силі F і протилежно направлена, $R = -F$. Бокова сила F та сила гідродинамічного опору R прикладені в одну точку CoLR, мають рівні плечі Δ до центру ваги, а отже, і моменти від цих сил відносно центру ваги рівні, але протилежно направлені, $F\Delta - R\Delta = 0$. Отже, бокова сила, прикладена у центр бокового опору CoLR не створює обертального моменту не тому, що CoLR є центром обертання, а тому, що сума моментів прикладеної сили і сили гідродинамічного опору відносно центру ваги дорівнює нулю.

Уявлення 3. «The starting point of the COLR is a point between the centre of gravity of the ship and the centre of underwater surface area, when this two do not coincide» [12]. «If ship dead in the water the Neutral point is close to the centre of gravity» [17].

Під терміном «початкове положення» автори, очевидно, мали на увазі відсутність диференту і поздовжньої швидкості. У цьому випадку центр бокового опору CoLR, за визначенням, повинен знаходитись у центрі підводної поверхні корпусу судна, незалежно від положення центру ваги.

Уявлення 4. «The position of the COLR depends on the centre of gravity, the centre of the underwater surface area (hull shape and trim), the pressure fields around the hull» [12]. The Neutral point is a physical point. Its position depends on the position of the centre of gravity, the centre of buoyancy, the centre of the underwater area (shape of the hull, trim) and of the pressure field around the hull [17].

Положення CoLR, як центру бокового гідродинамічного опору, залежить від положення центру підводної поверхні (визначається формою і диферентом), поля тиску навколо судна і кута дрейфу. Положення CoLR, як центру прикладання бокової гідродинамічної сили, залежить від положення центру ваги лише через диферент (але диферент вже враховано).

Залежність положення плеча бокової гідродинамічної сили (CoLR) від кута дрейфу наведена вище, формула (4). На рис. 3 зображено графік залежності (4). При зміні кута дрейфу в діапазоні $0^\circ \le |\beta| \le 180^\circ$, відносне плече бокової гідродинамічної сили (положення COLR) змінюється в межах $-0{,}5 \le l_R \le 0.5$. Вплив кута дрейфу на положення COLR є найсуттєвішим фактором із названих. Саме він дозволяє пояснити «віслючий» ефект. На рис. 3 показано діапазон положень ЦБО для малих кутів дрейфу $0^\circ \le \beta \le 30^\circ$. Якщо сила буксира F буде прикладена лівіше положення ЦБО, як на рис. 3, то в усталеному русі $R = F$, а момент відносно центру ваги від сили опору R буде більшим моменту від сили буксира і судно почне повертатися назустріч прикладеній силі.

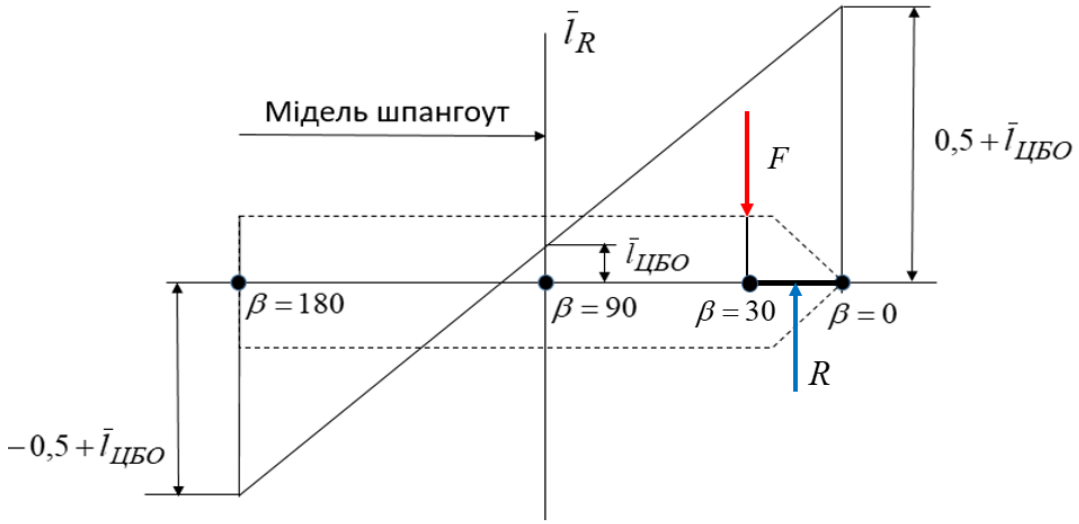


Рисунок 3 – Залежність плеча бокової гідродинамічної сили від кута дрейфу

Уявлення 5. «The Centre of Drift (D) is the point where the resultant of all hydrodynamic forces is acting: ·external forces: tugs, wind, etc., rudder force, underwater resistance UWR, lift and drag as a function of speed and drift angle» [17].

Згідно з положеннями гідродинаміки, у центр бокового опору прикладена лише результуюча гідродинамічна сила (underwater resistance). Зовнішня сила буксира прикладена у точці контакту буксира із корпусом судна. Зовнішня сила вітру прикладена у центрі парусності судна. Сила керма прикладена у центрі керма тощо. При перенесенні даних сил у Centre of Drift (центр бокового опору) потрібно додатково враховувати моменти, які вони створюють.

Уявлення 6. «A ship does not turn around its centre of gravity» [17].

Автори керівництва по судноводінню, очевидно, мають на увазі, що судно обертається навколо полюсу повороту, а не навколо центру ваги. Насправді обертання судна навколо полюсу повороту видиме лише для усталеного руху судна і є приватним випадком загального руху, який описується системою диференційних рівнянь (1) та (2). Диференційні рівняння (1) та (2) описують рух центру ваги судна і обертання судна навколо центру ваги.

Дані рівняння з часів Ейлера використовувалися для моделювання руху різних об'єктів і пройшли перевірку практикою. Отже, обертання судна навколо полюсу повороту є приватним випадком бокового та обертального (по рисканню) руху судна навколо центру ваги, видиме за умови усталеного руху.

Основні результати та їх обговорення. Проведено критичний аналіз спрощених уявлень на процеси повороту судна та наведені пояснення неочевидних ефектів у поведінці судна. Спростовано помилкові уявлення щодо полюса повороту, центру бокового опору і центру обертання. Отриманий результат пояснюється використанням повної математичної моделі (системи диференційних рівнянь лінійного і кутового руху судна) як, наукового підходу, положень теоретичної механіки та гідродинаміки. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що дозволяють пояснити незвичні ефекти у поведінці судна лише зміщенням центру бокового опору, який є центром прикладання бокової гідродинамічної сили і не має ніякого відношення до центру обертання (центру прикладання важелів сил). Положення центру бокового гідродинамічного опору залежить лише від диференту, поздовжньої швидкості судна і кута дрейфу. Центром обертання судна є центр ваги. Критичний аналіз існуючих уявлень проведено для правильного розуміння судноводіями поведінки судна, що дозволить уникнути прийняття помилкових управлінських рішень та підвищити безпеку судноводіння. Отримані результати є відтворюваними і можуть застосовуватися при розробці керівництв для судноводіїв.

Висновки. Проведено огляд літературних джерел, присвячених дослідженню поведінки особливих точок судна: центру обертання, центру бокового опору та полюсу повороту. Встановлено, що найближчі технічні рішення містяться в роботах H. Hooyer, Ch. Tzeng, A. G. Chase, H. Cauvier, S. G. Seo, керівництву по судноводінню 2014 року, порт Ревель. На жаль, у деяких публікаціях і навіть керівництвах по управлінню судном, використовуються уявлення, які не вірно трактують вплив особливих точок на поведінку судна. Проведено критичний аналіз таких уявлень на основі повної математичної моделі (системи динамічних рівнянь лінійного та кутового руху судна) як еталону, наукового підходу, положень теоретичної механіки та гідродинаміки. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що дозволяють пояснити незвичну поведінку судна лише зміщенням центру бокового опору, який є центром прикладання бокової гідродинамічної сили і не має ніякого відношення до центру обертання (центру прикладання важелів сил).

Теоретичне значення отриманих результатів полягає у: поясненні поведінки судна, включаючи незвичні поведінкові ефекти, лише зміщенням центру бокового опору, виявленні хибних уявлень про поведінку судна, які не узгоджуються з математичною моделлю (динамічними рівняннями поздовжнього та кутового руху судна), положеннями теоретичної механіки та гідродинаміки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для розробки керівництв по судноводінню, наданні судноводіям правильного розуміння поведінки судна, що дозволить уникнути прийняття хибних управлінських рішень та підвищити безпеку судноплавства.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути пов'язані з проведенням критичного аналізу інших хибних уявлень про поведінку судна, які закладаються в керівництва для судноводіїв. Невірне розуміння процесів поведінки судна є одним із найнебезпечніших факторів, який може сприяти підвищенню ризиків ручного керування. Подальше виявлення хибних уявлень про поведінку судна, їх спростування на основі наукового підходу, законів теоретичної механіки, гідродинаміки, спираючись на повну математичну модель, дозволить суттєво зменшити такі ризики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Louda P., Marasanov V., Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A. The Theory of Similarity and Analysis of Dimensions for Determining the State of Operation of Structures Under Difficult Loading Conditions. *Materials*, 2022, 15(3), 1191 https://doi.org/10.3390/ma15031191. URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/15/3/1191.

2. Babichev S., Sharko O., Sharko A., Mikhalyov O. Soft Filtering of Acoustic Emission Signals Based on the Complex Use of Huang Transform and Wavelet Analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Springer, 1020, pp. 3–19 https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1.

3. Louda P., Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A. Experimental and Theoretical Study of Plastic Deformation of Epoxy Coatings on Metal Substrates Using the Acoustic Emission Method, *Materials*, 2022, 15(11), 3791. https://doi.org/10.3390/ma15031191 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9181548/.

4. 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*, pp. 496–500, 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 2023. https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275545. https://ieeexplore.ieee.org/document/10275545.

5. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Mateichuk V., Nosov P., Popovych I., Perederyi V. Automatic Prevention of the Vessel's Parametric Rolling on the Wave, *CEUR-WS.org*, 2024, Vol. 3668, pp. 235–246, (COLINS-2024). https://ceur-ws.org/Vol-3668/paper16.pdf.

6. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Popovych I., Nosov P., Onyshko D., Kalinichenko Ye. Reconfiguration of Redundant Structures of Ship Actuators Using Zero Motion Method, *IEEE Xplore.* ACIT-2025, Šibenik, CROATIA, 17–19 September 2025. https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185810.

7. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Kobets V., Kyrychenko K. Intelligent system for reconfiguring the redundant structure of ship actuators without disturbance, *CEUR*, Vol 3983, pp. 115–126.

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*, Vol. 3513, pp. 130–140, 2023 (ICST-2023). https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper11.pdf.

9. Navi-Trainer Professional 6. Ship Motion Mathematical Modeling Description, version 6.0, Wärtsilä Voyage Oy, Date of issue: February 2024.

10. Hooyer H. H. Behavior and Handling of Ships. Cornell Maritime Press, 1983.

11. Tzeng Ch. Analysys of the pivot point for a turning ship, *Journal of marine science and technology*, 1998, 6(1), pp. 39–44. http://jmst.ntou.edu.tw/marine/6/39-44.pdf.

12. Cauvier H. The Pivot Point. The PILOT, *The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association*, 2008, pp. 295. http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf.

13. Artyszuk J. Pivot point in ship manoeuvring. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*, 2010, 20(92):13-24.

14. Seo S. G. The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring. Proceedings of IMLA, 2011, Vol. 1, Issue 29, pp. 271–280. https://www.academia.edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_Manoeuvring.

15. Seo S. G. Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2016, Vol. 10, Issue 4, pp. 605–612. https://doi.org/12.12716/1001.10.04.09.

16. Дьомін, С. І., Жуков, Є. М., Кубачов, Н. А. Управління судном: підручник для

ВНЗ // С. І. Дьомін, Є. М. Жуков, Н. А. Кубачов та ін, 1991, 359 с.

17. Port Revel. Shiphandling. Cource Manual, 2014.

18. Kryvyi O., Miyusov M., The Creation of Polynomial Models of Hydrodynamic Forces on the Hull of the Ship with the help of Multi- factor Regression Analysis, *8-th International Maritime Science Conference. IMSC,* Budva, Montenegro, 2019.

19. Бітюков М. А., Герасимов К. Д., Кирилов П. А., Чистяков Р. С., Застосування чисельних методик для оцінки впливу непрямостінності корпусу судна на величину хвильових навантажень, *Праці Криловського державного наукового центру* S-I (1), 98–101, Грудень 2022. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-98-101.

20. Давидов, І., Печенюк, А. Дослідження впливу форми носової частини судна на його опір в умовах тихої воді та хвилювання, *Вісник Одеського національного морського університету*, 2023. https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-7-20.

21. Чуреєв Є. А., Романюта Д. А., Білоусов В. А., Миколаїв І. І., Обґрунтування та вибір основних характеристик малого рибальського судна з великою повнотою корпусу, Известия КДТУ, 2022.

22. Begovic E., Panahi S., Rinauro B., Rosano G., Determination of Hydrodynamic Maneuvering Coefficients of a Planing Hull Using CFD with the Aid of SDT, *Progress in Marine Science and Technology*, Vol. 7, 65–77, 2023. https://doi.org/10.3233/PMST230010.

23. Zinchenko S., Kalinichenko Ye., Kozachok Yu., Mateichuk V. Influence of hull and cargo contours on lateral force and yaw torque in real – time vessel control systems. Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy, 2024, Vol. 2, № 29, p. 24–34. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.024-034.

REFERENCES

1. Louda, P., Marasanov, V., Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A. (2022). The Theory of Similarity and Analysis of Dimensions for Determining the State of Operation of Structures Under Difficult Loading Conditions, Materials, 2022, 15(3), 1191. https://doi.org/10.3390/ma15031191. https://www.mdpi.com/1996-1944/15/3/1191.

2. Babichev, S., Sharko, O., Sharko, A., Mikhalyov, O. (2020). Soft Filtering of Acoustic Emission Signals Based on the Complex Use of Huang Transform and Wavelet Analysis. Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, 1020, pp. 3–19. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1.

3. Louda, P., Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A. (2022). Experimental and Theoretical Study of Plastic Deformation of Epoxy Coatings on Metal Substrates Using the Acoustic Emission Method, Materials, 15(11), 3791. https://doi.org/10.3390/ma15031191 https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9181548/.

4. 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, pp. 496–500, 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland. https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275545. https://ieeexplore.ieee.org/document/10275545.

5. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Mateichuk, V., Nosov, P., Popovych, I., Perederyi, V. (2024). Automatic Prevention of the Vessel's Parametric Rolling on the Wave, CEUR-WS.org, Vol. 3668, pp. 235–246. (COLINS-2024). https://ceur-ws.org/Vol-3668/paper16.pdf.

6. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Popovych, I., Nosov, P., Onyshko, D., Kalinichenko, Ye. (2025). Reconfiguration of Redundant Structures of Ship Actuators Using Zero Motion Method, IEEE Xplore. ACIT-2025, Šibenik, CROATIA, 17–19 September 2025. https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185810.

7. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Kobets, V., Kyrychenko, K. (2025). Intelligent system for reconfiguring the redundant structure of ship actuators without disturbance, CEUR, Vol 3983, pp. 115–126.

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, pp . 130–140, (ICST-2023). https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper11.pdf.

9. Navi-Trainer Professional 6. Ship Motion Mathematical Modeling Description, version 6.0, Wärtsilä Voyage Oy, Date of issue: February 2024.

10. Hooyer, H. H. (1983). Behavior and Handling of Ships. Cornell Maritime Press.

11. Tzeng, Ch. (1998). Analysys of the pivot point for a turning ship. Journal of marine science and technology 6(1), pp. 39–44. http://jmst.ntou.edu.tw/marine/6/39-44.pdf.

12. Cauvier, H. The Pivot Point. (2008). The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association. p. 295. http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf.

13. Artyszuk, J. (2010). Pivot point in ship manoeuvring. Scientific Journals Maritime University of Szczecin 20(92):13-24.

14. Seo, S. G. (2011). The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring. Proceedings of IMLA. Vol. 1, Issue 29, pp. 271–280. https://www.academia.edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_Manoeuvring.

15. Seo, S. G. (2016). Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.10, Issue 4, pp. 605–612. https://doi.org/12.12716/1001.10.04.09.

16. Demin, S. I., Zhukov, E. M., Kubachev, N. A. (1991). Upravlenie sudnom: uchebnik dlya VUZov, 359 s.

17. Port Revel (2014). Shiphandling. Cource Manual.

18. Kryvyi, O., Miyusov, M. (2019). The Creation of Polynomial Models of Hydrodynamic Forces on the Hull of the Ship with the help of Multi- factor Regression Analysis, 8-th International Maritime Science Conference. IMSC, Budva, Montenegro.

19. Bitiukov, M. A., Herasymov, K. D., Kyrylov, P. A., Chystiakov, R. S. (2023). Zastosuvannia chyselnykh metodyk dlia otsinky vplyvu nepriamostinnosti korpusu sudna na velychynu khvylovykh navantazhen, Pratsi Krylovskoho derzhavnoho naukovoho tsentru S-I (1), 98–101, Hruden 2022. https://doi.org/10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-98-101.

20. Davydov, I., Pecheniuk, A. (2023). Doslidzhennia vplyvu formy nosovoi chastyny sudna na yoho opir v umovakh tykhoi vodi ta khvyliuvannia, Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu. D https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-7-20.

21. Chureev, E. A., Romanyuta, D. A., Belousov, V. A., Nikolaev, I. I. (2022). Obosnovanie i vybor osnovnykh kharakteristik malogo rybolovnogo sudna s bol′shoj polnotoj korpusa, Izvestiya KGTU. https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-67-71-86.

22. Begovic, E., Panahi, S., Rinauro, B., Rosano, G. (2023). Determination of Hydrodynamic Maneuvering Coefficients of a Planing Hull Using CFD with the Aid of SDT, Progress in Marine Science and Technology, Vol. 7, 65–77, 2023. https://doi.org/10.3233/PMST230010.

23. Zinchenko, S., Kalinichenko, Ye., Kozachok Yu., Mateichuk V. (2024). Influence of hull and cargo contours on lateral force and yaw torque in real - time vessel control systems. Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy, Vol 2, № 29, p. 24–34. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.024-034.

Zinchenko S. M., Nosov P. S. CRITICAL ANALYSIS OF SIMPLIFIED VIEWS OF SHIP TURNING PROCESSES

Exact models in the form of a system of differential equations can be processed by the on-board computer of the control system. However, on most ships there is no such specialized computer, and therefore there is a need to evaluate the behavior of the ship using simplified representations. Simplified representations began to be developed to explain unusual behavioral effects observed on board the ship, such as the apparent rotation around the pivot point, the rotation of a ship pushed by two tugboats with a time lag, when longitudinal speed appears, the "donkey" effect, etc. A prerequisite for constructing simplified representations is the steady motion of the ship. Thus, the apparent pivot point can be observed only in a steady circulation. During transient processes, it moves quickly, without being fixed at one point. Simplified representations should not only explain unusual behavioral effects, but also be consistent with the basic provisions of theoretical mechanics. Unfortunately, some publications and even manuals on ship control use concepts that do not correctly interpret the behavior of the ship. Such concepts should not only explain the non-obvious effects of the ship's behavior, but also be consistent with the full mathematical model of the ship's motion and with the basic provisions of theoretical mechanics and hydrodynamics. The object of research is the ship's turning processes. The paper critically analyzes simplified concepts of the ship's turning processes and provides explanations of non-obvious effects in the ship's behavior. Misconceptions about the pivot point, the center of lateral resistance, and the center of rotation are refuted. The results obtained are explained using a mathematical model (a system of differential equations of linear and angular motion of the ship) as a reference, as well as the scientific approach, and provisions of theoretical mechanics and hydrodynamics. A critical analysis of existing concepts was carried out to ensure the correct understanding of the ship's behavior by shipowners, which will allow them to avoid making erroneous management decisions and to increase the safety of navigation. The results obtained are reproducible and can be used both in the development of manuals for navigators and in software for automatic control modules.

Key words: *navigation safety; pivot point; center of lateral resistance; center of rotation; donkey effect.*

© Зінченко С. М., Носов П. С.

Статтю прийнято до редакції 05.12.2025

УДК 656.61

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН ПЕРЕКРИТТЯ ПОЛІГОНІВ З РІЗНОЮ ПРІОРИТЕТНІСТЮ ІНФОРМАЦІЇ У ECDIS

Петровський А. В., *к.т.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: andreyanybody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3337-9577.*

Запропоновано метод аналітичного визначення контурів перетину двовимірних полігонів – Intersection Polygon Contour Analysis (IPCA), що включає алгоритм знаходження множини контурів перетину, які можуть бути як зовнішніми, так і вкладеними. Отримані результати можуть бути використані у навігаційних і геоінформаційних системах. У математичній моделі IPCA все формується через: аналітичну перевірку перетинів лінійних ребер, вставлення точок у ребра, послідовне збирання циклів через орієнтований граф, обробку вкладеності з позиційної аналітики. IPCA враховує вкладені контури, дірки, орієнтацію, цикли, працює з полігонами, дірками, можливе розширення на криві, але тоді потрібно вручну обробляти всі ребра. Алгоритм, побудований на основі моделі IPCA чітко і поетапно аналізує вкладеність, за допомогою аналітичних перевірок положення контурів один відносно одного. Метод IPCA найкраще підходить для задач, де потрібна висока точність, важливо враховувати структуру вкладеності або потрібен точний контроль над геометрією результату і має однозначні переваги, коли: потрібний повний контур перетину, не тільки площа чи факт перетину; є вкладені контури / дірки, і критично важливо зберегти топологію; можуть бути вироджені випадки і потрібно обробити їх точно.

Ключові слова: *перетин полігонів; Intersection Polygon Contour Analysis; ECDIS; SENC.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.156-165

Вступ. Розвинення навігаційних інформаційних систем, Electronic Chart Display and Information System (ECDIS), надає все більше даних та інструментів для реалізації задач судноводія на навігаційному містку. Все це розширює можливості судноводія і підвищує адекватність прийняття рішень завдяки більшій повноті навігаційної інформації. Зростання кількості отриманої інформації з різних джерел і можливість відображення полігонів по координатах у повідомленнях одразу, одночасно ускладнює процес аналізу отриманої інформації судноводієм. Особливо це стосується полігонів даних, які побудовані в автоматизованому режимі після отримання такої інформації, а саме: з різною пріоритетністю приділення уваги до небезпеки інформації. Прикладом може стати отримання повідомлення від NavTex та AIO, якщо вони при відображенні на карті, мають полігони даних з перетинанням. Якщо перехід планується у досить жвавому трафіку, з наявністю обмеженого навігаційного простору і характеризується багатьма інформаційними накладаннями разом з тимчасовими об’єктами, автоматизація підсвічування спірних за пріоритетністю приділення уваги контурів/площ ручної коректури/AIO/NavTex поглибить ступінь пророоблення маршруту на навігаційні перешкоди.

Постановка проблеми. Накладання додаткової інформації на System Electronic Navigational Chart (SENC) звичайно є геометричними полігонами. Перетин геометричних фігур – це ключова задача у багатьох прикладних сферах: навігації, картографії, комп'ютерній графіці. Складність полягає в обробці полігонів та визначенні вкладених контурів для автоматизованого візуального виявлення загальних контурів після коректури навігаційних карт SENC/накладання полігонів даних з AIO/NavTex у ECDIS при попередній прокладці маршруту руху судна (рис. 1).

Необхідні вхідні умови реалізації такої задачі:

– невелика кількість і складність перетинів, оскільки всі площадні об’єкти при коректурі карти SENC мають в основному прості фігури (полігони, кола) з власним пріоритетом при оцінці навігаційної небезпеки;

– наявність внутрішніх вкладених контурів, які можуть бути відображені на карті від різних типів повідомлень;

– необхідність точного визначення загальних площ при перетинанні для визначення пріоритету такої ділянки у подальшому аналізі;

– немає значення, як швидко діє алгоритм, оскільки використання його планується у статичній обстановці, на кроці побудови попередньої прокладки.

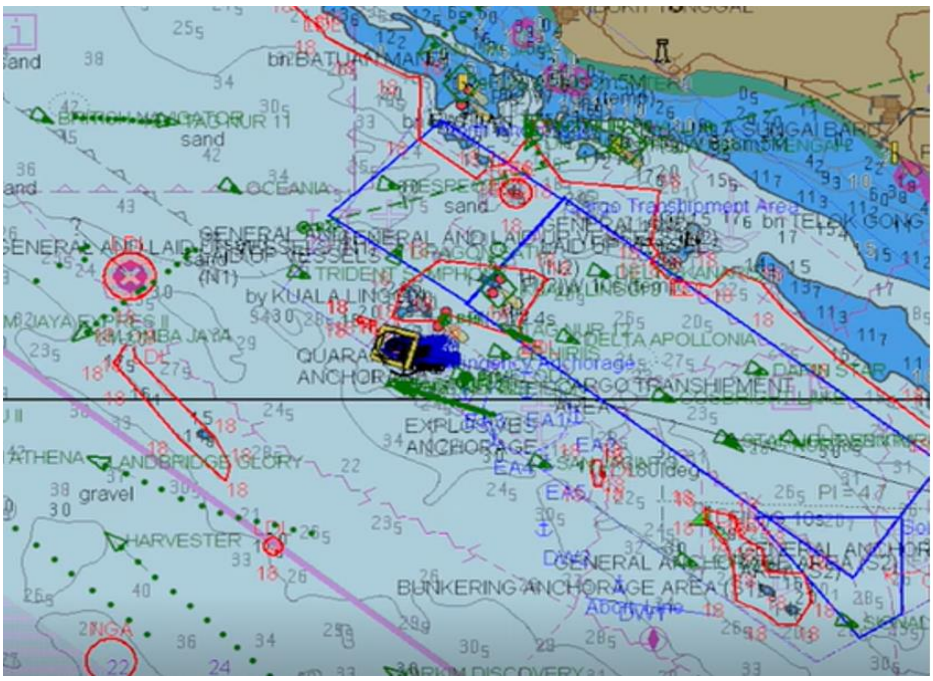


Рисунок 1 – Приклад Overlap навігаційної карти
(перетину полігонів синього кольору – результатом є трикутник)

Актуальність дослідження. Чинні системи ECDIS не надають автоматично загальних контурів при перетинанні полігонів з різним пріоритетом небезпеки після коректури карти SENC. Іноді, оператор ECDIS може взагалі не побачити наявність перетину, оскільки такі площі можуть візуалізуватися однаково при відсутності зміни налаштувань для різних типів повідомлень, які розглядаються штурманом при попередній прокладці. У такому випадку пріоритет небезпеки загальної зони перетину буде завжди відповідати останньому контуру, що в деяких умовах не є коректним. Автоматична візуалізація таких зон для оператора однозначно приверне увагу і надасть можливість правильно призначити пріоритет.

На цей час досить багато науковців світу проводили дослідження зі схожого напряму. У [1] досліджено перетин лінії з опуклим полігоном, використання проєктивної просторової репрезентації для підвищення точності. Однак залишається складність реалізації через проєктивну геометрію, модель орієнтована тільки на опуклі полігони, є непридатною для довільних, може бути повільніше за прості евклідові методи на малих наборах даних. Робота [2] надає модель, яка працює тільки для опуклих полігонів, присутній складніший математичний апарат підвищує поріг знань для soft-розробників. Дослідження [3] реалізують модель обчислення площі перетину довільних полігонів із великими/складними формами за допомогою Graphics Processing Unit (GPU) та методів апроксимації, що накладає вимоги до наявності у системі продуктивного GPU, крім того, апроксимації знижують точність. У [4] показано розширення алгоритму Greiner–Hormann, щоб обробляти вироджені перетини коректно, але має підвищену складність реалізації через обробку численних винятків, високі вимоги до числової стабільності, також бажаним є подвійна точність обчислень. Алгоритм для відсікання полігона прямокутним вікном, із параметричним представленням ребер представлено у [5]. Він жорстко прив’язаний до прямокутного вікна і непридатний для довільних контурів, а параметричний підхід може втрачати точність при дуже малих/дуже великих координатах. Робота [6] надає алгоритм, який реконструює полігони з контурів,

працює паралельно з GPU, з акцентом на збір сегментів і порівняння контурів внутрішніх/зовнішніх. Потребує GPU та відповідної мікропроцесорної інфраструктури, складно узгоджувати внутрішні та зовнішні контури у складних топологіях, паралельні алгоритми ускладнюють налаштування й тестування. У дослідженнях [7] описаний метод є спеціалізованим: працює лише для сіток однакової топології, і, використання методу Монте-Карло й растеризації, призводять до апроксимаційної похибки при складних межах, але головне – потребує потужного GPU, погана масштабованість на дуже великих моделях із високою роздільністю. Робота [8] демонструє метод для накладання двох квадратних сіток з однаковою топологією й оптимізує кількість випадків перетинів ребер. Присутні обмеження на топологію сіток, ускладнена обробка дірок, особливо при складних внутрішніх контурах. У роботі [9] надані дослідження з продуктивності просторової індексації для швидкого пошуку кандидатів на перетин полігонів. Запропонована індексація не дає точного результату, а лише список кандидатів, що потребує другої стадію перевірки. Представлений у [10] базовий алгоритм визначення належності точки та взаємної диз'юнктності фігур, теж має недоліки: не описана масштабованість для багатокутників великої складності, чутливість до вироджених випадків.

Таким чином багато наукових робіт не дають контур перетину як результат, а тільки площу або факт перетину, не у всіх є підтримка вкладених контурів або дірок.

Метою дослідження є розробка формальної математичної моделі для 2D полігонів із вкладеними контурами та алгоритму, який формує множину контурів перетину разом із вкладеними контурами. Об'єктом дослідження є процес визначення зон (контурів) перетину двовимірних полігонів із різною пріоритетністю в SENC.

Задачі дослідження:

– розробити формальну математичну модель для 2D полігонів із вкладеними контурами;

– створити алгоритм, що формує множину контурів перетину разом із вкладеними контурами;

– протестувати модель на прикладі 2D з метою подальшого застосування для векторних карт.

Методи дослідження: аналітичні методи (побудова й розв'язання систем рівнянь для точок перетину ребер); параметризація контурів полігонів; алгоритмічний аналіз графів (для збору сегментів у замкнені цикли); аналітичні перевірки положення контурів один відносно одного (приналежність/вкладеність).

Основна частина. Пропонується метод аналітичного визначення контурів перетину двовимірних полігонів – Intersection Polygon Contour Analysis (IPCA), що включає алгоритм знаходження множини контурів перетину, які можуть бути як зовнішніми, так і вкладеними.

Вхідними даними математичної моделі є полігон A з множиною замкнутих контурів:

$$A = \left\{C_A^{(0)}, C_A^{(1)}, \dots, C_A^{(k)}, \right\},$$

де $C_A^{(0)}$ – зовнішній контур (порядок обходу проти годинникової стрілки);

$C_A^{(i)}, i = 1..k$ – внутрішні контури (дірки, порядок обходу за годинниковою стрілкою);

і полігон B: $B = \left\{C_B^{(0)}, C_B^{(1)}, \dots, C_B^{(m)}, \right\}$.

Аналітичний опис контурів.

Кожен контур C параметризується функцією: $r(t) = \big(x(t), y(t)\big), t \in [0,1]$

Області, що відповідають полігонам з дірками:

$$W_A = \left\{x \in R^2 : x \in int\left(C_A^{(0)}\right) \text{ та } x \notin \bigcup_{i=1}^{k} int(C_A^{(i)})\right\};$$
$$W_B = \left\{x \in R^2 : x \in int\left(C_B^{(0)}\right) \text{ та } x \notin \bigcup_{i=1}^{m} int(C_B^{(j)})\right\}. \quad (1)$$

Кроки побудови контуру перетину:

1. Першим кроком є пошук точок перетину ребер.

Для кожної пари ребер:

$$e_{A,i}^{(p)}: r_{A,i}^{(p)}(t), t \in [t_1, t_2]\,;$$
$$e_{B,j}^{(q)}: r_{B,j}^{(q)}(s), s \in [s_1, s_2]\,,$$

розв'язують систему рівнянь:

$$r_{A,i}^{(p)}(t) = r_{B,j}^{(q)}(s); \qquad t \in [t_1, t_2], s \in [s_1, s_2]\,, \tag{2}$$

що еквівалентно:

$$\begin{cases} x_{A,i}^{(p)}(t) = x_{B,j}^{(q)}(s)\,; \\ y_{A,i}^{(p)}(t) = y_{B,j}^{(q)}(s)\,. \end{cases} \tag{3}$$

2. Далі визначають приналежності точок ребрам полігонів.

Для будь-якої точки *p*, що належить ребру, перевіряється приналежність до W_A та аналогічно W_B:

$$p \in int\left(C_A^{(0)}\right) \text{ і } p \notin \bigcup_{i=1}^{k} int\left(C_A^{(i)}\right)\,;$$
$$q \in int\left(C_B^{(0)}\right) \text{ і } q \notin \bigcup_{i=1}^{m} int\left(C_B^{(j)}\right)\,. \tag{4}$$

3. Формування контурів перетину $R = A \cap B$.

Контур *R* складається з ребер *e*, для яких $\forall q \in e\colon\ q \in W_A \cap W_B$.

4. Обробка вкладених контурів.

Кожен контур $C_R^{(m)}$ визначається як цикл ребер, що складають замкнену ламану.

Орієнтація контуру задає його тип:

– проти годинникової стрілки (зовнішній контур);
– за годинниковою стрілкою (дірка – вкладений контур).

Визначення вкладеності базується на перевірці належності точок одного контуру до області обмеженої іншим.

Алгоритм побудови множини контурів перетину з вкладеними контурами.

1. Проведення параметризації ребер полігонів *A* і *B*.
2. Пошук точок перетину ребер шляхом розв'язання системи рівнянь.
3. Вставлення точок перетину у контури полігонів *A* і *B* – розбиття ребер.

У кожному контурі $C_A^{(i)}$ для ребра $e_{A,i}^{(k)}$точки перетину $P_{A,i}^{(k)} \subset e_{A,i}^{(k)}$впорядковуються по параметру τ. Ребро розбивається на сегменти:

$$S_{A,i}^{(k,r)} = \left\{ r_{A,i}^{(k)}(\tau)\colon \tau \in [\tau_r, \tau_{r+1}] \right\}, \tag{5}$$

де τ_r – параметри точок перетину та кінців ребра з вершинами (0 і 1).

Аналогічно для ребер $e_{B,j}^{(m)}$.

4. Перевірка належності кожного сегменту полігонам *A* і *B* за допомогою прямо-променевого тесту.

Перевірка приналежності точки *q* до *int(C)* здійснюється через алгебраїчний прямо-променевий тест:

– надається прямий промінь з *q* у напрямку, наприклад, *x*.
– визначається кількість перетинів променю з ребрами контуру *C*.
– якщо кількість непарна, то $q \in int(C)$, інакше – зовні.

5. Вибір сегментів, що належать перетину $W_A \cap W_B$.

Обирають сегменти *S* таких ребер полігонів *A* і *B*, для яких $\forall p \in S\colon\ p \in W_A \cap W_B$.

6. Формування циклів контурів з послідовності сегментів утворених точками перетину.

Побудова множини контурів $R = C_R^{(m)}$ відбувається шляхом послідовного з'єднання сегментів кроку 5, враховуючи точки перетину як «вершини» нового графу.

Вершинами такого графу є точки:

$V = \{$всі вершини контурів A і B та точки перетину $P\}$.

Ребрами графу є сегменти, які належать перетину $W_A \cap W_B$.

Тоді ставиться задача – знайти всі цикли, як замкнені шляхи у графі $G = (V, E)$. Знайдені цикли відповідають контурам $C_R^{(m)}$.

7. Визначення орієнтації контурів і класифікація на зовнішні та вкладені.

Для кожного контуру $C_R^{(m)}$, заданого послідовністю вершин $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ обчислюють орієнтацію через функцію:

$$orient\left(C_R^{(m)}\right) = \sum_{k=1}^{n} (x_k y_{k+1} - y_k x_{k+1}), \quad V_{n+1} = V_1 \,. \tag{6}$$

Якщо при цьому $orient\left(C_R^{(m)}\right) > 0$, орієнтація проти годинникової стрілки – зовнішній контур, якщо $orient\left(C_R^{(m)}\right) < 0$, то це є дірка – вкладений контур.

Для визначення вкладеності між контурами для кожного контуру $C_R^{(m)}$ і $C_R^{(n)}$, $m \neq n$, потрібно перевірити, чи виконується умова: $C_R^{(n)} \subset int\left(C_R^{(m)}\right)$, тестуючи, наприклад, одну вершину $V \in C_R^{(n)}$ на приналежність до $int\left(C_R^{(m)}\right)$.

8. Побудова множини результатних контурів з координатами вершин $R = \left\{C_R^{(m)} : m = 1, \dots, M\right\}$, де кожен контур $C_R^{(m)} = \left\{V_1^{(m)}, V_2^{(m)}, \dots, V_{n_m}^{(m)}, \right\}$ має таку послідовність координат вершин контуру.

Результати і аналіз використання. Реалізація запропонованого методу мовою програмування Python 3.12 у середовищі Spider 6.0 здійснена на площині (рис. 2).

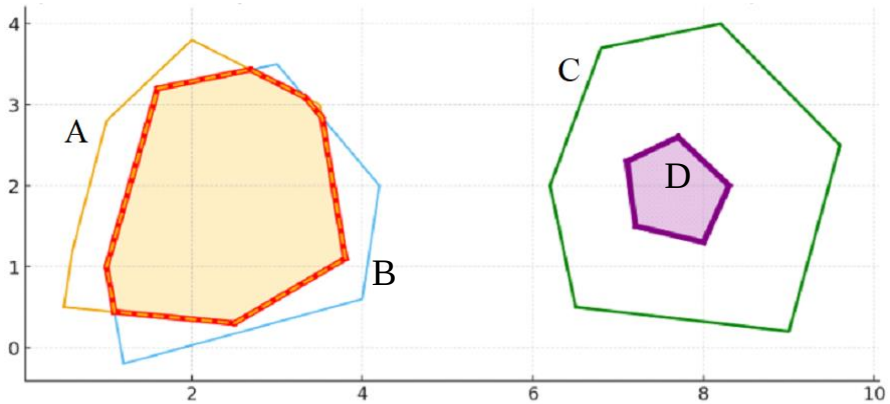


Рисунок 2 – Результат моделювання виділення загальних контурів і площ (червона лінія та фіолетова) при перетину полігонів A∩B із зовнішнім полігоном C і вкладеним полігоном D

Результати показали достатню ефективність запропонованої моделі. Подальше використання на навігаційних картах буде здійснено в рамках побудови загальної системи візуалізації окремого функціоналу ECDIS стосовно попередньої прокладки, для чого і створюються окремі модулі (відповідно до теми науково-дослідної роботи за №0125U003422) [11–14].

Розроблений метод IPCA має низку переваг і недоліків, залежно від контексту його застосування (навігаційні карти, ГІС, САПР, геометричне моделювання тощо).

Переваги методу IPCA:

1. Аналітична точність. Вся побудова базується на системах рівнянь, а не евристичних операціях. Немає втрати точності при роботі з лінійними сегментами – обчислення відбувається точно в координатній формі.

2. Придатність для вкладених структур. Модель повністю підтримує вкладені контури (дірки, багатоконтурні структури), на відміну від простих Boolean-операцій.

3. Контроль над кожним етапом. Контроль над кожним кроком: перетин, розбиття ребер, перевірка належності, формування циклів. Це зручно для налаштування, дослідження граничних випадків (наприклад, торкання ребер або точок), інтеграції з користувальницькою логікою.

4. Не потребує сітки або растеризації. На відміну від методів, які вимагають побудови піксельної сітки (растеризації), IPCA повністю векторний.

5. Гнучкість розширення. Метод легко адаптується для обробки:

– множин полігонів;
– полігонів із криволінійними краями (наприклад, через сплайни);
– інших геометричних фігур (кола, дуги тощо).

Недоліки методу IPCA:

1. Обчислювальна складність. При великій кількості вершин (особливо з багатьма точками перетину) обсяг обчислень різко зростає.

2. Потребує точного чисельного обчислення. У випадку дуже близьких або вирівняних точок (наприклад, майже паралельні відрізки) накопичення похибок може викликати артефакти – потрібні механізми округлення / епсилон-пороги.

3. Неінтуїтивність реалізації. На відміну від бібліотек типу Clipper або GEOS (наприклад для реалізації мовою програмування Python), реалізація вимагає повного контролю над:

– розбиттям ребер;
– побудовою графу;
– циклічною перевіркою вкладеності.

4. Необхідність роботи з топологією. Потрібно правильно впорядковувати вершини, уникати самоперетинів, дубльованих точок і т. д. Помилка в побудові графа → некоректний контур → порушення геометрії.

5. Порівняно важкий старт. Для простих задач (наприклад, перевірка перетину двох квадратів) IPCA може виявитися "надто складним" – немає сенсу, якщо не потрібна деталізація результату.

Аналіз теоретичної результативності зведений до таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння IPCA з наявними дослідженнями

Критерій	***IPCA***	***Наявні підходи***
1	2	3
Аналітичність / точність	Дуже висока: системи рівнянь, точно відрізки, точки перетину, контури, вкладеність	Результати деяких досліджень (наприклад, “degenerate intersections”, “projective space”) прагнуть підвищити точність або обробку кордонів, але часто з обмеженнями (опуклі полігони, лінія полігон, або апроксимації)
Підтримка вкладених контурів / дірок	Так, IPCA враховує вкладені контури, дірки, орієнтацію, цикли	У багатьох дослідженнях розглядаються полігони із дірками, але рідше дуже деталізовано цикли та вкладеність у результаті перетину (особливо при вироджених перетинах)

Продовження таблиці 1

1	2	3
Обробка вироджених випадків	IPCA може бути адаптований до вироджених випадків (точки/краї, що дотикаються тощо)	Так. «Clipping simple polygons with degenerate intersections» та «projective space representation»
Складність / ефективність	IPCA може бути значно повільніший, якщо вхід великий і багато перетинів; алгоритмічна складність висока для великих полігонів	Методи GPU прискорення, O(log N) алгоритми (для опуклих випадків), спеціалізовані бібліотеки часто оптимізовані для практичних задач
Універсальність типів об'єктів	Полігони, з дірками, можливо розширення на криві; треба вручну обробляти всі ребра	Багато методів обмежені: опуклі полігони, лінія полігон, або просто полігон прямокутне вікно, або апроксимації

Метод IPCA найкраще підходить для задач, де:
- потрібна висока точність;
- важливо враховувати структуру вкладеності;
- потрібен точний контроль над геометрією результату.

Не рекомендується застосовувати IPCA там, де достатньо приблизної побудови або потрібна висока швидкодія без деталізації (наприклад, у real-time графіці без дірок). Разом з тим вказане обмеження може з часом бути не суттєвим залежно від задач і умов використання. Наприклад, визначення точного контуру враження при накладанні контуру враження від боєзапасу БПЛА на ймовірний контур маневрування піхоти (який теж можливо будувати полігоном залежно від наявних укрить). При цьому швидкодія є головною для штучного інтелекту БПЛА, а точність визначення контуру враження у режимі реального часу не є обов'язковою, сенсу використання розробленого методу немає. Але, якщо будуть використовуватися швидкі елементи мікропроцесорної техніки: процесор, пам'ять, шина даних, то звісно, користі від отримання точного контуру буде більше, оскільки буде можливість, як подовження розробленого методу, здійснити моделювання різних позицій скиду заряду БПЛА для отримання найбільш точного контуру враження при можливих маневрах цілей.

Таким чином, метод IPCA має однозначні переваги, коли: потрібний повний контур перетину, не тільки площа чи факт перетину; є вкладені контури / дірки, і критично важливо зберегти топологію; можуть бути вироджені випадки і потрібно обробити їх точно.

Висновки. Запропонована модель IPCA дозволяє ефективно аналітичним чином знаходити множини контурів перетину двовимірних полігонів з урахуванням вкладених контурів. Метод базується на параметризації, а також на тестах приналежності для побудови конкретних контурів.

Перспективи подальших досліджень. Сучасні роботи по перетинах і булевим операціям підкреслюють тренд до поєднання *точності* і *масштабованості* – наприклад, 3D-EPUG-Overlay [15] демонструє, що exact-алгоритми (Simulation of Simplicity, multi-precision rational arithmetic) можна зробити паралельними для великих задач з гарантіями коректності, хоча це й ускладнює реалізацію. Паралельно розвиваються підходи, які дають інтерактивну робастність при виконанні булевих операцій на великих наборах даних [16]. З іншого боку, GPU-растерні підходи дають велику швидкість у задачах обчислення площ та попередньої фільтрації кандидатів, але вимагають спеціалізованої інфраструктури і додаткових кроків для відновлення топологічно коректних векторних контурів [17]. Сучасні «фільтри предикатів» дозволяють зменшити навантаження на exact-арифметику, зберігаючи

надійність у більшості випадків [18]. Ці напрямки показують можливі шляхи розвитку IPCA: інтегрувати адаптивні фільтри та/або елементи паралельної індексації для кращої масштабованості при збереженні аналітичної точності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Skala, V. Robust line-convex polygon intersection computation in E^2 using projective space representation. Machine Graphics & Vision, 32(3/4), 3–16. https://doi.org/10.22630/MGV.2023.32.3.1.

2. Skala V. A new fully projective O(log N) point-in-convex polygon algorithm: a new strategy, The Visual Computer 41(7):4839-4850, 2024, https://doi.org/10.1007/s00371-024-03693-9.

3. Yi Gao, Bo Wu, Jianxin Luo, Hangping Qiu, GPU-based Arbitrary Polygon Intersection Area Algorithm, DEStech Transactions on Engineering and Technology Research, 2017, https://doi.org/10.12783/dtetr/ismii2017/16652.

4. Erich L Foster, Kai Hormann, Romeo Traian Popa, Clipping simple polygons with degenerate intersections, Computers & Graphics: X, Volume 2, 2019, 100007, ISSN 2590-1486, https://doi.org/10.1016/j.cagx.2019.100007.

5. Sushil Chandra Dimri, Umesh Kumar Tiwari, Mangey Ram, An efficient algorithm to clip a 2D-polygon against a rectangular clip window, Applied Mathematics, Volume 37, pages 147–158, 2022, https://doi.org/10.1007/s11766-022-4556-0.

6. Ji R, Niu Z, Chen L. GPU-Accelerated Algorithm for Polygon Reconstruction. Applied Sciences. 2025; 15(3):1111. https://doi.org/10.3390/app15031111.

7. Xihua Xu, Shengxin Zhu, Symmetric Sweeping Algorithms for Overlaps of Quadrilateral Meshes of the Same Connectivity, Lecture Notes in Computer Science In book: Computational Science – ICCS, 2018, pp.61-75, https://doi.org/10.1007/978-3-319-93713-7_5.

8. Molano R., Sancho J. C., Ávila M.M., Rodríguez P. G., Caro A. Obtaining the user-defined polygons inside a closed contour with holes, Science and Business Media LLC, The Visual Computer, Volume 40, Springer Science and Business Media LLC, 2024, pages 6369–6387, https://doi.org/10.1007/s00371-023-03170-9.

9. Zhou, Chen & Li, Manchun. Performance evaluation of spatial indexing to identify polygon intersection. Geocarto International. Volume 35. pp.1–18. https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1624987.

10. Gavrilov, T. Programming of the search algorithm for point belonging to the polygon and the mutual non-intersection of the figures. Technology Audit and Production Reserves, 3(3(35), 29–32. https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.105505.

11. Петровський А. В., Авторське свідоцтво № 134311 Комп'ютерна програма «WeatherCheckRoute» 12.03.2025.

12. Петровський А. В., Авторське свідоцтво № 133972 Комп'ютерна програма «S57ViewerVisualCatzocPointEnc» 03.03.2025.

13. Петровський А. В., Авторське свідоцтво № 135551 Комп'ютерна програма «WaveCheckAnalyze» 29.04.2025.

14. Петровський А. В., Авторське свідоцтво № 135550 Комп'ютерна програма «SimulationBridgeMasterE» 29.04.2025.

15. Magalhães S. V. G., Franklin W. R., Andrade M. V. A. An efficient and exact parallel algorithm for intersecting large 3-D triangular meshes using arithmetic filters. Computer-Aided Design. 2019. Vol. 111. 102801. https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.102801.

16. Cherchi G., Pellacini F., Attene M., Livesu M. Interactive and Robust Mesh Booleans. ACM Transactions on Graphics. 2022. https://doi.org/10.1145/3550454.3555460.

17. Gao Y., Luo J. et al. A GPU-Based Rasterization Algorithm for Boolean Operations on Polygons. IEICE Transactions on Information and Systems. 2017. https://doi.org/10.1587/transinf.2017EDL8119.

18. Bartels T., Fisikopoulos V., Weiser M. Fast floating-point filters for robust predicates. Bit Numer Math. 2023. Vol. 63. P. 31. https://doi.org/10.1007/s10543-023-00975-x.

REFERENCES

1. Skala, V. (2023). Robust line-convex polygon intersection computation in E^2 using projective space representation. Machine Graphics & Vision. Vol. 32, No. 3/4. P. 3–16. https://doi.org/10.22630/MGV.2023.32.3.1.

2. Skala, V. (2024). A new fully projective O(log N) point-in-convex polygon algorithm: a new strategy. The Visual Computer. Vol. 41, No. 7. P. 4839–4850. https://doi.org/10.1007/s00371-024-03693-9.

3. Gao, Y., Wu, B., Luo, J., Qiu, H. (2017). GPU-based Arbitrary Polygon Intersection Area Algorithm. DEStech Transactions on Engineering and Technology Research. https://doi.org/10.12783/dtetr/ismii2017/16652.

4. Foster, E. L., Hormann, K., Popa, R. T. (2019). Clipping simple polygons with degenerate intersections. Computers & Graphics: X. Vol. 2. 100007. https://doi.org/10.1016/j.cagx.2019.100007.

5. Dimri, S. C., Tiwari, U. K., Ram, M. (2022). An efficient algorithm to clip a 2D-polygon against a rectangular clip window. Applied Mathematics. Vol. 37. P. 147–158. https://doi.org/10.1007/s11766-022-4556-0.

6. Ji, R., Niu, Z., Chen, L. (2025). GPU-Accelerated Algorithm for Polygon Reconstruction. Applied Sciences. 2025. Vol. 15, No. 3. 1111. https://doi.org/10.3390/app15031111.

7. Xu, X., Zhu, S. (2018). Symmetric Sweeping Algorithms for Overlaps of Quadrilateral Meshes of the Same Connectivity. In: Computational Science – ICCS. P. 61–75. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93713-7_5.

8. Molano, R., Sancho, J. C., Ávila, M. M., Rodríguez, P. G., Caro, A. (2024). Obtaining the user-defined polygons inside a closed contour with holes. The Visual Computer. 2024. Vol. 40. P. 6369–6387. https://doi.org/10.1007/s00371-023-03170-9.

9. Zhou, C., Li, M. (2019). Performance evaluation of spatial indexing to identify polygon intersection. Geocarto International. 2019. Vol. 35. P. 1–18. https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1624987.

10. Gavrilov T. (2017). Programming of the search algorithm for point belonging to the polygon and the mutual non-intersection of the figures. Technology Audit and Production Reserves. 3(3(35)). P. 29–32. https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.105505.

11. Petrovskyi, A. V. (2025). Avtorske svidotstvo №134311 Komp′yuterna programa «WeatherCheckRoute». 12.03.2025.

12. Petrovskyi, A. V. (2025). Avtorske svidotstvo №133972 Komp′yuterna programa «S57ViewerVisualCatzocPointEnc». 03.03.2025.

13. Petrovskyi, A. V. (2025). Avtorske svidotstvo №135551 Komp′yuterna programa «WaveCheckAnalyze». 29.04.2025.

14. Petrovskyi, A. V. (2025). Avtorske svidotstvo №135550 Komp′yuterna programa «SimulationBridgeMasterE». 29.04.2025.

15. Magalhães, S. V. G., Franklin, W. R., Andrade, M. V. A. (2019). An efficient and exact parallel algorithm for intersecting large 3-D triangular meshes using arithmetic filters. Computer-Aided Design. 2019. Vol. 111. 102801. https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.102801.

16. Cherchi, G., Pellacini, F., Attene, M., Livesu, M. (2022). Interactive and Robust Mesh Booleans. ACM Transactions on Graphics. 2022. https://doi.org/10.1145/3550454.3555460.

17. Gao, Y., Luo, J. et al. (2017). A GPU-Based Rasterization Algorithm for Boolean Operations on Polygons. IEICE Transactions on Information and Systems. https://doi.org/10.1587/transinf.2017EDL8119.

18. Bartels, T., Fisikopoulos, V., Weiser, M. (2023). Fast floating-point filters for robust predicates. Bit Numer Math. Vol. 63. P. 31. https://doi.org/10.1007/s10543-023-00975-x.

Petrovskyi A. MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING OVERLAPPING ZONES OF POLYGONS WITH DIFFERENT INFORMATION PRIORITIES IN ECDIS

This paper introduces Intersection Polygon Contour Analysis (IPCA), an analytical method for detecting and accurately reconstructing the intersection contours of two-dimensional polygons with different information priorities in Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS). As the volume of navigational data from diverse sources such as NavTex and Admiralty Information Overlay (AIO) grows, ship navigators increasingly face overlapping hazard polygons that may differ in priority. For safe voyage planning, it is not enough to know that polygons overlap—the exact geometry of their shared boundaries must also be defined. The proposed IPCA approach is grounded in analytical geometry and delivers precise coordinates for every intersection vertex. Each polygon is first represented as a set of closed contours: external boundaries oriented counter-clockwise and internal holes oriented clockwise. Polygon edges are parameterized, and systems of linear equations are solved to find all intersection points. These points are inserted into the original contours, subdividing edges into ordered segments. Using an oriented-graph framework, valid segments are assembled into closed cycles that capture every intersection contour, including nested holes. Orientation tests then distinguish exterior boundaries from interior voids, thereby preserving full topological accuracy. Unlike many existing methods that rely on rasterization, convexity assumptions, or GPU-based approximations, IPCA provides exact vector geometry and maintains complete nesting relationships, enabling accurate hazard-priority assessment in ECDIS. A prototype Python implementation demonstrates the method's effectiveness on representative navigation scenarios, where execution speed is sufficient for static pre-voyage planning. IPCA thus offers a robust solution whenever high analytical precision and faithful topological reconstruction are essential. Beyond maritime navigation, it can be applied to geographic information systems, computer-aided design, and other domains that require accurate, detailed intersection contours for complex polygonal data.

Key words: *polygon intersection; Intersection Polygon Contour Analysis; ECDIS; SENC.*

© Петровський А. В.

Статтю прийнято до редакції 16.11.2025

УДК 656.61.052(045)

ПІДГОТОВКА МОРЯКІВ У КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ: АНАЛІЗ ВИКЛИКІВ І ІННОВАЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ

Піпченко О. Д., *д.т.н., доцент Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: nav.researches@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6878-0619;*
Конон Н. М., *Ph.D., старший викладач Національного університету «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, e-mail: scientia.nk@gmail.com, ORCID: 0000-0003-4651-7622;*
Конон В. В., *Ph.D., Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, ORCID: 0000-0002-9962-482X;*
Богаченко Є. А., *Ph.D., Національний університет «Одеська морська академія», м. Одеса, Україна, ORCID: 0009-0005-9070-4996.*

Морська галузь, на яку припадає за обсягом понад 80% світової торгівлі, стикається з безпрецедентними викликами в підготовці кадрів до сучасних вимог, зумовлених такими чинниками, як цифровізація, декарбонізація, глобалізація ринку праці та демографічні трансформації. У цій статті проаналізовано еволюцію морської освіти та професійної підготовки (МЕТ), ідентифіковано ключові бар'єри (дефіцит сучасних тренажерних комплексів, проблеми з доступом до мереж і стрімке моральне старіння навичок), а також окреслено трансформаційні перспективи, що відкриваються завдяки впровадженню змішаних форм навчання та технологій віртуальної й доповненої реальності (VR/AR). Опираючись на галузеві звіти, нормативно-правові акти та педагогічні дослідження, автори пропонують концепцію «Змішаної моделі підготовки», яка інтегрує теоретичні онлайн-компоненти, практичні заняття на тренажерах і верифікацію компетентностей, забезпечуючи гнучкість, високу якість та доступність. Дослідження містить практичні рекомендації для стейкхолдерів (регуляторних органів, судновласників і освітніх установ) щодо гармонізації стандартів змішаного навчання, розроблення сучасних інструментів оцінювання та інвестицій у цифрову інфраструктуру. Завдяки впровадженню інноваційних підходів і посиленню співпраці морський сектор зможе сформувати висококваліфіковану та стійку робочу силу, здатну ефективно адаптуватися до технологічного прогресу, вимог сталого розвитку та забезпечення безпеки на морі.
Ключові слова: *морська освіта та підготовка моряків; змішане навчання; цифровізація; тренажери; екологічна стійкість; компетенції; IMO; STCW.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.166-176

Вступ. Морська галузь забезпечує за обсягом понад 80% міжнародної торгівлі, залишаючись критично важливим компонентом світової економіки. У XXI столітті морський транспорт стикається з такими викликами, як: стрімка цифровізація, екологічні вимоги, демографічні зрушення та глобалізація ринку праці. Ці тенденції суттєво змінюють вимоги до підготовки моряків і висувають нові стандарти до систем морської освіти та навчання (МЕТ). Водночас пандемія COVID-19, зміна клімату, геополітичні потрясіння та нові вимоги IMO, зокрема стратегія декарбонізації до 2050 року, актуалізують необхідність трансформації традиційних підходів до навчання на флоті. Незважаючи на численні виклики (брак тренажерних потужностей, нерівномірний доступ до якісного інтернету, моральне старіння навичок), сектор морської підготовки отримує нові можливості завдяки інноваціям: віртуальна та доповнена реальність, модульні курси, оцінювання на основі даних, дистанційні платформи. У цій статті розглянуто рушійні сили трансформації МЕТ та запропоновано концептуальну модель змішаного навчання, що поєднує гнучкість онлайн-компонентів із практичною цінністю очних тренажерних сесій. Також окреслено практичні рекомендації для стейкхолдерів задля формування сталої, кваліфікованої морської робочої сили.

Постановка проблеми. Успішне функціонування світових транспортних ланцюгів постачань загострило операційні виклики, з якими стикаються приблизно два мільйони моряків у всьому світі. Поряд з геополітичною напруженістю, волатильними ринками

чартеру та змінами, спричиненими кліматом, такими як відкриття арктичних маршрутів, післяпандемічний сплеск попиту на морські перевезення посприяв ущільненню графіків рейсів, скороченню часу обороту в портах та формуванню нових вимоги до цифрового моніторингу. Водночас регуляторні очікування зросли: Стратегія IMO 2023 року щодо скорочення викидів парникових газів встановлює амбітну мету досягнення нульового рівня викидів у судноплавстві до 2050 року, з проміжними цілями значного скорочення до 2030 року. Це стимулює розвиток проектів з використання аміаку, водню та метанолу як палива, які вимагають абсолютно нових протоколів безпеки. Крім того, у травні 2024 року, під час 108-ї сесії IMO, було ухвалено Резолюцію MSC.560(108) [1], яка вносить зміни до Кодексу STCW для боротьби з насильством і домаганнями на морі, водночас ініціюючи всебічний перегляд Конвенції та Кодексу. Крім того, диверсифікація національностей серед моряків ускладнює уніфікацію контролю за дотриманням міжнародних вимог, оскільки різні країни мають відмінні освітні стандарти, культурні особливості та рівні акредитації, що призводить до варіативності в інтерпретації та впровадженні норм, таких як Конвенція STCW, і вимагає додаткових зусиль для гармонізації процесів. На тлі такого динамічного та вимогливого контексту, це дослідження розглядає нагальну проблему: Як системи морської освіти та навчання (MET) можуть еволюціонувати, щоб забезпечити необхідну повноту компетенцій без покладання надвеликих витрат чи часових навантажень на моряків і роботодавців на міжнародному рівні?

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Морська галузь стикається з багатогранними викликами та можливостями, оскільки глобалізація, технології й регуляторний тиск змінюють сектор. Ранні дослідження розглядали глобалізацію як «гонку донизу» для праці моряків, наприклад автори роботи [2] зафіксували зміщення робочих місць до країн із нижчою оплатою праці. У сучасних умовах, результати опитувань Mission to Seafarers Happiness Index [3] демонструють, що доступ до структурованого розвитку кар'єри тісно корелює з наміром офіцерів залишатися в професії навіть на суднах під відкритими реєстрами (рис. 1), підкреслюючи роль навчання й підтримки у збереженні кадрів [4].

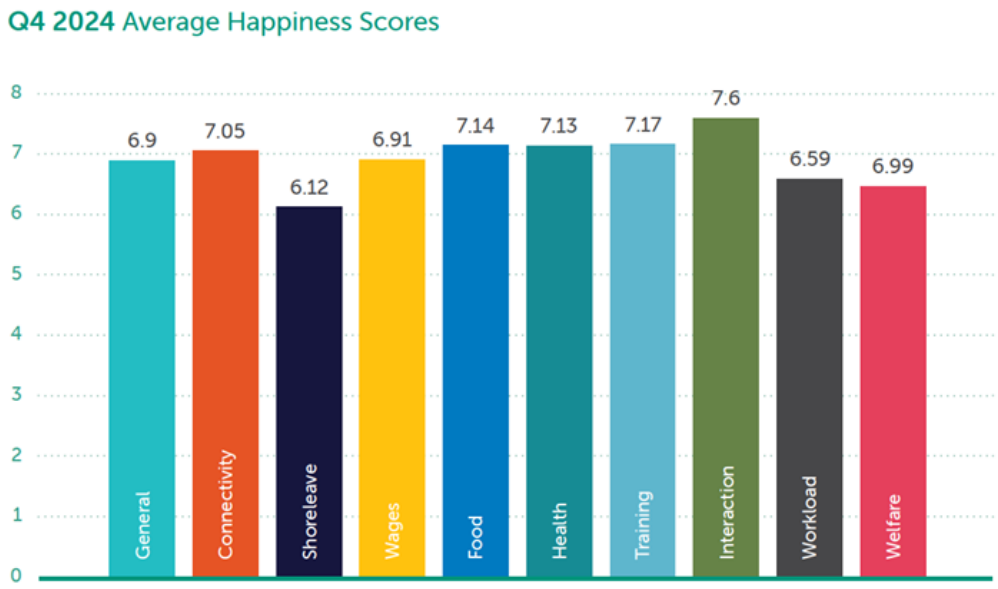


Рисунок 1 – Індекс щастя моряків за 4 квартал 2024 року (Mission to Seafarers, 2024) [3]

Технологічний прогрес і цифровізація трансформують морську освіту й підготовку (MET), пропонуючи рішення для усунення прогалин у компетенціях. Автор дослідження [5] акцентує на ролі цифрових інструментів у покращенні доступності й навчального середовища. У систематичному огляді [6], автори доводять, що імерсивні та неімерсивні морські симулятори покращують результати навчання, забезпечуючи реалістичний,

практичний досвід, який поєднує теорію з практикою. У роботі [7] автори закликають упроваджувати сучасні технології моделювання, зокрема XR і повномасштабні симулятори, для створення інтерактивного навчання, тоді як в іншій статті [8] автори пропонують змішаний підхід у межах гармонізованої моделі ПДНВ, поєднуючи традиційні та технологічні методи для підвищення ефективності підготовки. Загалом ці дослідження підкреслюють зростаючу вагу цифрових, симуляційних і змішаних методів у МЕТ.

Галузеві рекомендації й спільні ініціативи посилюють прагнення до формування інноваційних рамок підготовки. Oil Companies International Marine Forum (OCIMF, 2022) [9] формує поведінкові цілі для танкерних операцій, які вже інтегровано у матриці підвищення кваліфікації. Керівництво Maritime and Coastguard Agency (MCA) (2025) оновлює правила фінансування Support for Maritime Training (SMarT), дозволяючи дистанційні компоненти у затверджених курсах кадетів за умови дотримання стандартів Merchant Navy Training Board [10]. Доповнюючи ці зусилля, відповідно до звіту SkillSea «Future Skills and Competence Needs», прискорена цифровізація й екологічні регуляції вимагають гнучких, симуляційних модулів підготовки, виділяючи чотири ключові компетенції: технологічно опосередковану командну роботу, симуляційне лідерство, прийняття рішень у галузі «зелених» технологій та розвинені цифрові/дані навички (IoT, блокчейн, big data-логістика). Також пропонується система «стекових» курсів для безперешкодного переходу між морськими й береговими посадами [11].

Слід відзначити, що питання дотримання правил залишається критично важливим: постійні прогалини у сертифікації моряків становлять загрозу безпеці та юридичний ризик. Дані портових наглядів (Paris MoU, Tokyo MoU) послідовно фіксують недійсні чи відсутні сертифікати ПДНВ серед провідних причин затримань у період 2019–2023 рр. [12, 13]. Крім того, Конвенція MLC про працю в морському судноплавстві зобов'язує судновласників забезпечувати відповідність і придатність екіпажу до служби, що перетворює дефіцит компетентності на вагомий ризик невідповідності міжнародним вимогам [14].

У довгостроковій перспективі автоматизація та забезпечення екологічної сталості радикально трансформують попит на робочу силу. Звіт Всесвітнього морського університету (WMU) «Transport 2040: Automation, Technology, Employment – The Future of Work» прогнозує, що до 2030 р. передбачається зростання попиту на спеціалістів дистанційних операцій, що дозволить створити тисячі нових берегових робочих місць, а також підвищити загальну якість праці за умов забезпечення належних трудових стандартів [15].

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є аналіз трансформаційних викликів та можливостей у сфері підготовки моряків у контексті глобалізаційних змін, а також розробка концептуальної моделі змішаного навчання (blended training), спрямованої на забезпечення ефективності, якості та доступності морської освіти.

Задачі дослідження включають:

1) Дослідження основних глобальних трендів, що впливають на морську освіту (цифровізація, декарбонізація, глобалізація, демографічні зміни) [16].

2) Визначення ключових викликів у підготовці моряків, зокрема проблем доступу до тренажерів, цифрової інфраструктури та актуальності компетенцій.

3) Аналіз сучасних можливостей та передових практик у сфері МЕТ.

4) Розроблення концепції змішаного навчання, що інтегрує онлайн-теорію, практичне тренажерне навчання та цифрове оцінювання.

5) Надання практичних рекомендацій для регуляторних органів, навчальних закладів та судновласників щодо впровадження інноваційних форматів навчання.

Виклад основного матеріалу.

1. Чотири рушійні сили змін у підготовці моряків

Компетентнісна програма морської освіти й підготовки (МЕТ) формується чотирма взаємопов'язаними мета-рушіями, кожен із яких висуває специфічні виклики та відкриває можливості для розвитку навчальних програм. Цими рушійними силами є: цифровізація,

декарбонізація, глобалізація ринку праці та демографічні зміни. Вони відображають еволюцію судноплавної галузі й вимагають адаптивних, далекоглядних стратегій підготовки.

Цифровізація трансформує морські операції завдяки передовим технологіям, таким як ECDIS 2.0 (електронна картографічна й інформаційна система, оновлена до стандарту даних S-100 для підвищення точності навігації), сенсорний «ф'южн» (інтеграція багатьох джерел даних для оперативної ситуаційної обізнаності), системи підтримки рішень на основі ШІ та розширення центрів дистанційних операцій із моніторингу й керування суднами. Це скорочує часові рамки для ухвалення рішень, отже, програми МЕТ мають надавати пріоритет розвитку навичок швидкої реакції та взаємодії з комплексними цифровими інтерфейсами, наприклад, через симулятори, що відтворюють аварійні сценарії на мостику чи в машинному відділенні.

Декарбонізація, зумовлена глобальними вимогами щодо сталого розвитку, прискорює впровадження альтернативних палив (аміаку, водню та метанолу), а також берегових систем живлення, акумуляторних батарей і показників інтенсивності викидів, таких як Carbon Intensity Indicator (CII) та Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI). Це запроваджує нові протоколи безпеки та вимагає навичок оптимізації показників у реальному часі, отже, курси МЕТ мають включати підготовку з «зелених» технологій і екологічної відповідності.

Глобалізація ринку праці підкреслює дедалі більш транснаціональний характер екіпажів, оскільки судноплавні компанії активно залучають кадри з різних регіонів світу. Це зумовлює необхідність забезпечення переносимості сертифікатів (portability of qualifications), аби кваліфікації визнавалися в різних юрисдикціях, а також розвитку міжкультурної компетентності для ефективної комунікації та командної взаємодії. Для систем морської освіти та підготовки (МЕТ) це ускладнює процес акредитації, вимагаючи впровадження стандартизованих рамок і культурно адаптованих навчальних модулів для подолання регуляторних і соціальних бар'єрів.

Демографічні трансформації охоплюють дві суперечливі тенденції: старіння офіцерського складу в традиційних країнах-постачальниках моряків, що загрожує дефіцитом кваліфікованих кадрів, та збільшення частки представників цифрових уродженців (Digital Natives), які надають перевагу гнучким, онлайн-орієнтованим формам навчання, що відповідають їхнім цифровим очікуванням. Це трансформує парадигму освіти, спонукаючи провайдерів МЕТ до інтеграції онлайн-платформ, мобільного контенту та персоналізованих графіків з метою залучення й утримання молодих талантів.

Ці рушійні сили не діють ізольовано; їхня взаємодія ускладнює проєктування ефективних програм. Наприклад, декарбонізація підвищує потребу в цифрових навичках, оскільки двигуни на альтернативному паливі значною мірою покладаються на цифрові системи керування. Молодше, техноорієнтоване покоління охочіше сприйматиме онлайн-платформи, які водночас полегшують міжнародне визнання сертифікатів. Інший вид взаємодії проявляється в тому, що цифровізація через технології дистанційних операцій може перемістити робочі ролі з моря на берег, що узгоджується з демографічними уподобаннями щодо гнучких форм праці. Розуміння цих взаємозв'язків є ключовим для створення всеосяжних програм МЕТ, чутливих до потреб галузі.

Значення цих спостережень підкріплюється звітом Всесвітнього морського університету WMU Transport 2040: Automation, Technology, Employment – The Future of Work, який наголошує на нагальності адаптації до зазначених драйверів [15]. У документі прогнозується, що до 2030 року значна частка суднових офіцерів потребуватиме поглибленої підготовки з цифрового управління системами, аналітики даних та роботи з альтернативними паливами для задоволення технологічних та екологічних вимог. Також очікується сплеск попиту на фахівців з дистанційних операцій, що може створити тисячі нових берегових робочих місць і, відповідно, трансформувати традиційні кар'єрні траєкторії в контексті зазначених мета-рушійних сил.

2. Ключові виклики

2.1 Очне тренажерне навчання (проблеми матеріальної бази)

Незважаючи на те, що Конвенція ПДНВ встановлює мінімальні стандарти підготовки, аудити Європейської агенції з морської безпеки (EMSA) та Міжнародної морської організації (IMO) фіксують значні відмінності в якості тренажерів, кваліфікації інструкторів та валідності оцінювання в навчальних центрах. Сучасний комплекс повномасштабного тренажера навігаційного містка або машинного відділення класу А зазвичай коштує від 250 000 до 1 000 000 дол. США, тоді як вартість багатомісткових або комбінованих тренажерів перевищує кілька мільйонів. Багато академій у провідних країнах-постачальниках робочої сили (Філіппінах, Індонезії) покладаються на застаріле обладнання чи настільні тренажери, які не забезпечують належного рівня реалізму. Це знижує готовність курсантів до складних суднових сценаріїв, про що, зокрема, свідчить аудит EMSA 2020 року на Філіппінах, який виявив дефіцит тренажерів і слабкий моніторинг курсів.

2.2 Дистанційне навчання «берег-берег» (проблеми доступності)

Змішані моделі навчання, які передбачають трансляцію VR або настільних сесій між моряком-клієнтом і акредитованим навчальним центром, забезпечують гнучкість, проте стикаються з двома основними перешкодами.

– Обмежена інфраструктура: У багатьох регіонах функціонує лише кілька навчальних центрів із повномасштабними тренажерами, що змушує моряків долати значні відстані або чекати своєї черги.

– Нерівномірна якість інтернету: Високошвидкісне оптоволоконне з'єднання з низькою затримкою доступне в Північній Європі чи Сінгапурі, але в провінційних районах Індії та Західної Африки воно нестабільне або відсутнє. Ця «цифрова прірва» ускладнює синхронні консультації та тестування в реальному часі, непропорційно впливаючи на моряків із регіонів із обмеженим підключенням.

2.3 Віддалене/VR-навчання на борту (проблеми зв'язку в морі)

Нові рішення, такі як «хмарний» VR або симуляції за участю оцінювача, вимагають стабільного з'єднання зі швидкістю щонайменше 50 Мбіт/с і затримкою до 200 мс. Традиційні системи, як-от FleetBroadband, забезпечують лише кілобітні швидкості. Супутникові системи низькоорбітального зв'язку (LEO), зокрема Starlink Maritime та OneWeb, пропонують швидкість до 100 Мбіт/с, але капітальні витрати (~5 тис. дол. США) та щомісячні платежі (1–5 тис. дол. США) є непосильними для багатьох судновласників. Як наслідок, моряки на суднах із обмеженим зв'язком не можуть брати участь у VR-тренуваннях або переглядати онлайн-відеотрансляції.

2.4 Застарівання навичок і кадровий дефіцит

Стрімкий темп технологічних і регуляторних змін призводить до швидшого морального старіння навичок, ніж системи МЕТ встигають адаптувати навчальні програми. Звіт BIMCO/ICS Seafarer Workforce Report (2021) прогнозує потребу в приблизно 89 500 додаткових офіцерів до 2026 року (рис. 2), що підкреслює важливість безперервного підвищення кваліфікації та утримання кадрів [17]. Водночас дані Paris MoU (2024) постійно вказують на «Сертифікати екіпажу» та «Бортові навчання й інструктажі» як основні причини затримань суден у період 2019–2023 років, що свідчить про критичні прогалини в компетентності та нагальну потребу в прискореному оновленні навчальних програм [12].

2.5 Добробут моряків і ризики плинності кадрів

Попри інфраструктурні та кваліфікаційні виклики, питання добробуту моряків залишається критично важливим. Хоча публічні дані щодо репатріацій через проблеми з психічним здоров'ям обмежені, опитування ISWAN та ITF послідовно вказують на незадовільний добробут як ключовий чинник плинності кадрів (staff turnover). Стрес, ізоляція та брак рівних можливостей для навчання під час тривалих рейсів загострюють психологічні проблеми, що може знижувати ефективність систем морської освіти та підготовки (МЕТ), якщо курсанти й офіцери втрачають мотивацію або передчасно залишають галузь. Розв'язання цієї проблеми вимагає інтеграції програм підтримки добробуту з технічною підготовкою.

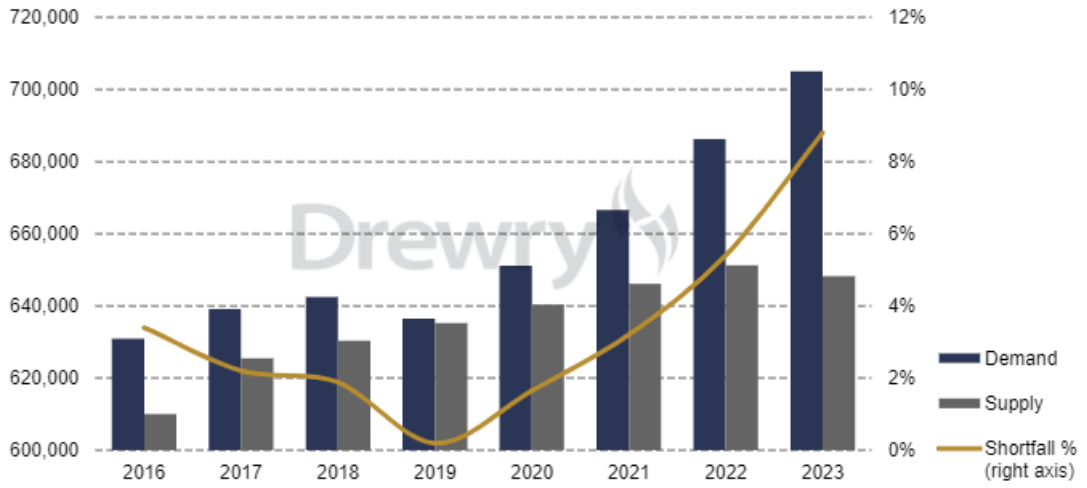


Рисунок 2 – Глобальний попит і пропозиція офіцерів, 1 січня 2023 року [17]

3. Можливості та передові практики

Попри вагомі виклики, що стоять перед морською освітою й підготовкою (MET), нині з'являється низка інноваційних можливостей та кращих практик, покликаних усунути інфраструктурні прогалини, проблеми доступності та задовольнити нові потреби галузі. Ці рішення спираються на технології, педагогіку, регуляторні рамки й підходи, засновані на даних, щоб підвищити якість підготовки та забезпечити моряків компетенціями для сучасної морської діяльності. Нижче наведено ключові можливості, здатні трансформувати системи підготовки.

3.1 Змішане навчання для гнучкості та економічної ефективності

Змішане навчання, що інтегрує асинхронні онлайн-модулі теоретичної підготовки з концентрованими очними сесіями практичного тренажерного навчання, забезпечує економічно ефективне та гнучке вирішення проблем доступності освіти. Завдяки скороченню часу перебування курсантів у навчальних центрах цей підхід зменшує витрати на проживання та оптимізує планування доступу до тренажерів. Модель визнається сумісною з вимогами Кодексу STCW щодо підготовки навігаційного складу: курсанти засвоюють теоретичний матеріал онлайн, після чого застосовують знання в реалістичних симуляціях, що сприяє подоланню дефіциту тренажерних потужностей (див. п.п. 2.1).

3.2 Імерсивні технології для опрацювання складних сценаріїв

Технології віртуальної та доповненої реальності (VR/AR) трансформують MET, надаючи змогу відпрацьовувати складні або небезпечні сценарії, такі як ліквідація витоків аміачного палива, операції з віддаленим мостиком за умов високої затримки зв'язку чи ознайомлення з новим обладнанням до його встановлення на судні. Ці інструменти усувають обмеження застарілих тренажерів (п.п. 2.1) і частково компенсують обмеження зв'язку на морі (п.п. 2.3), пропонуючи портативне та масштабоване навчання, яке функціонує навіть в офлайн-режимі або за мінімальної пропускної здатності.

3.3 Регуляторно зумовлена підготовка для спеціалізованих операцій

Нові міжнародні кодекси, зокрема Polar Code та IGF Code, встановлюють обов'язкові вимоги до підготовки для роботи в екстремальних умовах або з альтернативними видами палива, що стимулює розроблення інноваційних навчальних програм і методів оцінювання. Інтеграція такої спеціалізованої підготовки в MET дає змогу подолати проблему застарівання навичок (п.п. 2.4) та забезпечує відповідність глобальним стандартам безпеки й сталого розвитку.

3.4 Галузеві ініціативи для вдосконалення поведінкових компетентностей

Ініційовані галуззю програми зміщують фокус із технічних аспектів на людський фактор. Програма OCIMF SIRE 2.0 акцентує на поведінкових показниках під час танкерних інспекцій, заохочуючи компанії до впровадження структурованого тренажерного навчання [9]. TMSA 3 встановлює ключові показники ефективності (KPI) для оцінки безпечної

поведінки, гармонізуючи МЕТ з вимогами індустрії та усуваючи недоліки, виявлені під час перевірок Port State Control (п.п. 2.4).

3.5 Мікрокредити та системи трансферу кваліфікацій

Мікрокредити у вигляді цифрових бейджів дозволяють морякам поступово накопичувати короткострокові курси для здобуття повноцінних кваліфікацій. Проєкт SkillSea розробляє систему трансферу кваліфікацій між європейськими академіями, сприяючи мобільності моряків і подоланню викликів глобалізованого ринку праці. Модульний підхід забезпечує поетапне підвищення кваліфікації у цифрових і «зелених» напрямах, полегшуючи перехід між морськими та береговими посадами [11].

3.6 Оцінювання на основі даних для об'єктивного зворотного зв'язку

Сучасні тренажери застосовують порогові значення KPI, візуалізовані на інформаційних панелях, що забезпечує точний і об'єктивний дебрифінг. Цей підхід, узгоджений із TMSA 3, трансформує МЕТ від суб'єктивного оцінювання до культури безпеки, заснованої на даних. Чіткий зворотний зв'язок сприяє усуненню варіативності якості підготовки (п.п. 2.1) і забезпеченню надійної верифікації компетентностей у змішаних або дистанційних форматах навчання.

4. Застосування передових практик: запропонована модель змішаного навчання

Спираючись на можливості та передові практики, викладені в розділі 3, пропонується концептуальна модель Blended Learning Model як масштабована та якісна рамка для морської освіти й підготовки (МЕТ). Ця модель забезпечує стандартизовані результати навчання, водночас пропонуючи економічно вигідні й гнучкі формати, що відповідають викликам дефіциту тренажерних потужностей, проблемам доступності та швидкому моральному старінню навичок. Вона складається з трьох послідовних фаз (рис. 3), які інтегрують цифрові інструменти, практичний досвід і сувору оцінку, готуючи моряків до сучасних вимог галузі відповідно до Кодексу ПДНВ.

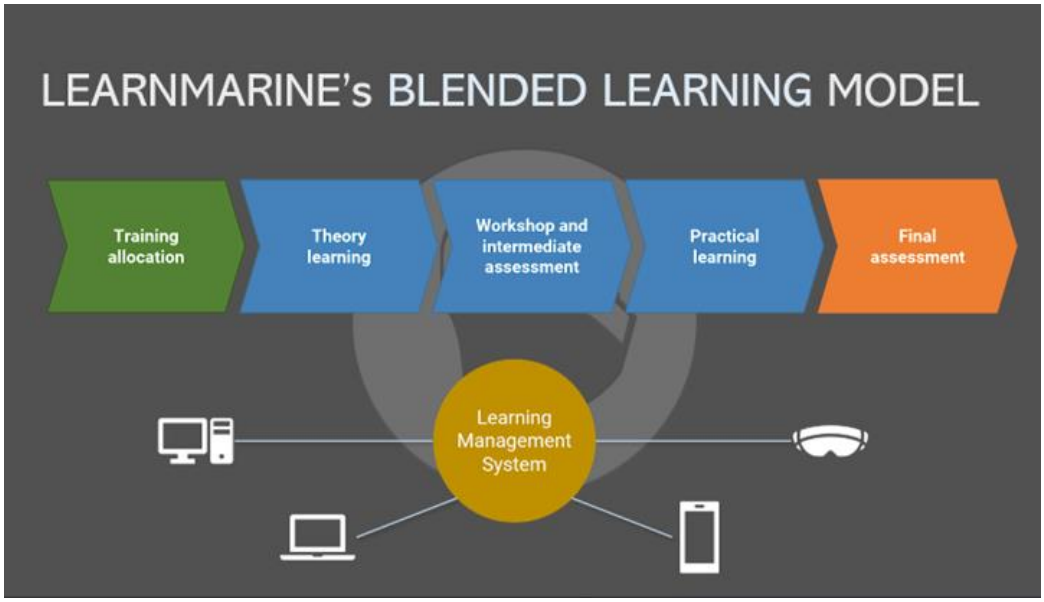


Рисунок 3 – Модель змішаного навчання Learnmarine

4.1 Фаза 1: Онлайн-теоретична підготовка

Початкова фаза забезпечує здобуття ґрунтовних теоретичних знань через інтерактивну платформу електронного навчання (e-learning), доступну курсантам і чинним офіцерам у всьому світі. До програми входять мультимедійні модулі з базових компетенцій ПДНВ, актуальних регуляторних оновлень (наприклад, Polar Code та IGF Code), а також нових тем, таких як безпека альтернативних палив, цифрові навігаційні системи тощо. Інструменти самоперевірки (тести та сценарії) гарантують опанування матеріалу перед переходом до наступного етапу та дозволяють навчатися в індивідуальному темпі. Асинхронний формат мінімізує потребу в очній присутності (усуває бар'єри, описані в п.п.

2.1) і скорочує витрати, хоча вимагає вирішення проблем нерівномірного доступу до інтернету (п.п. 2.2).

4.2 Фаза 2: Практична підготовка на тренажерах

Після теоретичної частини слухачі проходять інтенсивний практичний курс у тренажерному центрі. Під керівництвом інструкторів вони відпрацьовують навички та прийняття рішень у реалістичних умовах, використовуючи сучасні повномасштабні тренажери навігаційного містка та машинного відділення. Сценарії охоплюють реагування на витік аміаку, дистанційні операції з високою затримкою сигналу, штурманську роботу в штормових умовах тощо. Концентрований формат оптимізує доступ до тренажерів і усуває прогалини в якості застарілого обладнання (п.п. 2.1), забезпечуючи переносимість навичок на реальне судно.

4.3 Фаза 3: Оцінювання компетентності та сертифікація

Завершальна фаза передбачає всебічну перевірку компетентностей за допомогою тренажерних сценаріїв та практичних вправ з використанням оцінювання на основі даних і кількісних KPI (див. п.п. 3.6). Після успішного складання іспитів учасники отримують цифрові мікрокредити або накопичують їх для повної сертифікації; результати зберігаються в базі даних для зручної перевірки під час аудитів, підтвердження відповідності вимогам і використання в постійному вдосконаленні курсів. Такий формат узгоджується з підходом SIRE 2.0, де акцент робиться на поведінкових компетентностях (п.п. 3.4), і підтримує «стекову» модель кваліфікацій (п.п. 3.5), спрощуючи кар'єрне зростання моряків.

Основні результати та їх обговорення. У результаті аналізу сучасного стану морської освіти та підготовки (МЕТ) встановлено, що традиційні підходи вже не відповідають динамічним викликам глобалізованої морської галузі. Зокрема, ідентифіковано дефіцит кваліфікованих офіцерів, зростання психологічного навантаження на моряків, обмежений доступ до сучасних тренажерів у країнах, що розвиваються, а також фрагментованість підходів до впровадження цифрових технологій у навчанні. На підставі даних міжнародних організацій та професійних спілок доведено, що ефективне реформування МЕТ можливе лише за умови інтеграції трьох ключових компонентів: онлайн-навчання, тренажерної підготовки та об'єктивної оцінки компетентностей. Запропонована змішана модель підготовки моряків демонструє потенціал підвищення якості навчального процесу, зниження витрат та забезпечення доступності освіти для ширшого кола майбутніх фахівців. Обговорення результатів свідчить, що впровадження технологій VR/AR, систем дистанційного іспиту та цифрового моніторингу успішності дає змогу не лише адаптувати навчання до сучасних вимог, а й поліпшити відповідність стандартам STCW. Водночас для широкого застосування такої моделі необхідна міжнародна гармонізація підходів, оновлення нормативної бази та інвестиції в цифрову інфраструктуру навчальних закладів.

Висновки. Морська індустрія перебуває на критичному етапі розвитку морської освіти та навчання (МЕТ), де інновації та співпраця здатні подолати виклики, такі як прогалини в обладнанні, проблеми зі зв'язком, застаріла навичок та регуляторні вимоги, водночас реалізуючи можливості цифровізації та декарбонізації.

Для формування робочої сили, готової до викликів майбутнього, зацікавлені сторони – регулятори, судновласники, постачальники навчання та моряки – повинні надати пріоритет таким заходам:

– гармонізації стандартів змішаного навчання через ІМО та галузеві органи для забезпечення глобальної послідовності та відповідності STCW;

– розробці інструментів оцінювання на базі ШІ з адаптивним тестуванням, аналітикою симуляторів і дистанційним наглядом для отримання достовірних і вимірюваних показників компетентності;

– інвестиціям у цифрову інфраструктуру через партнерства для подолання розривів у доступності в регіонах з недостатнім забезпеченням;

– інтеграції модульних курсів зі стекуванням для нових навичок, таких як робота з альтернативними паливами та навігація в полярних регіонах, з метою протидії застарілості;

– акценту на поведінкових компетентностях через змішані підходи для формування культури безпеки та врахування людських факторів, зокрема командної роботи та прийняття рішень.

Прийняття змішаного навчання, імерсивних технологій та оцінювання на основі даних забезпечить доступніший і ефективніший МЕТ за умови тісної співпраці зацікавлених сторін. Цей підхід подолає бар'єри, сприятиме рівності та сформує стійку робочу силу, адаптовану до вимог XXI століття, гарантуючи безпеку, сталість і операційну досконаліть.

Перспективи подальших досліджень. У межах майбутніх наукових досліджень доцільно зосередитися на емпіричній верифікації запропонованої моделі змішаного навчання за участю реальних груп слухачів у різних регіонах, зокрема в країнах з обмеженим доступом до цифрової інфраструктури. Крім того, актуальним є вивчення ефективності імерсивних технологій (VR/AR) у підвищенні поведінкових компетентностей моряків порівняно з традиційними тренажерами. Окремої уваги заслуговує розроблення інструментів адаптивного тестування на базі ШІ для об'єктивної оцінки рівня підготовки в дистанційному форматі. У довгостроковій перспективі важливим напрямом є створення методології інтеграції систем стекування мікрокваліфікацій у глобальні реєстри сертифікації, що забезпечить мобільність і визнання компетенцій моряків на міжнародному ринку праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. International Maritime Organization. *Resolution MSC.560(108)*. 2024. Retrieved from https://puc.overheid.nl.

2. Alderton T., Bloor M., Kahveci E., Lane T., Sampson H., Thomas M., Winchester N., Wu B. & Zhao M. The global seafarer: Living and working conditions in a globalized industry. International Labour Office. 2004.

3. Mission to Seafarers. *Seafarers Happiness Index Q4*. 2024. Retrieved from https://www.seafarershappinessindex.org.

4. Pipchenko O., Torskiy V. & Kozyr O. Charting a course for career growth: Choosing the right training for your future. Seaways – The Nautical Institute. 2025.

5. Bhardwaj S. Digitalisation of maritime education and training. 2019. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/337906014_Digitalization_of_Maritime_Education_and_Training.

6. Shah P., Lim C. & Yeo G. Immersive and non-immersive maritime simulators: A systematic review of learning gain. *Journal of Marine Science and Engineering, 11*(1), 2023. 147.

7. Pipchenko O. & Konon N. MET enhancement using modern simulation technologies: XR, web and full mission. *Journal of Maritime Research, 22*(1), 2025. 404–412.

8. Pipchenko O. D. & Kovtunenko D. A suggestion of an application of blended learning in MET through a harmonized STCW model. *TransNav, 14*(3), 2020. 545–548.

9. OCIMF. *SIRE 2.0 Programme Introduction and Guidance*. Version 1.0. 2022.

10. Maritime & Coastguard Agency. Support for Maritime Training (SMarT). 2025. Retrieved from https://www.gov.uk/guidance/support-for-maritime-training-smart.

11. Oksavik A., Hildre H. P., Pan Y., Jenkinson I., Kelly B., Paraskevadakis D. & Pyne R. Future Skills and Competence Needs. *SkillSea Project*. 2020. Retrieved from https://www.skillsea.eu.

12. Paris MoU. *Port State Control Annual Report*. 2024. Retrieved from https://parismou.org.

13. Tokyo MoU. *Annual Report on Port State Control in the Asia-Pacific Region*. 2024. Retrieved from https://www.tokyo-mou.org.

14. International Labour Organization. *Maritime Labour Convention*. 2006.

15. World Maritime University. *Transport 2040 Phase 2: Impact of Technology on Seafarers – The Future of Work*. 15. 2023.

16. United Nations. Sustainable Development Goal 4: Quality Education. 2024. Retrieved from https://sdgs.un.org/goals/goal4.

17. BIMCO and ICS. *Seafarer Workforce Report. 2021*.

18. Drewry. *Manning Annual Review and Forecast 2023/24*. 2023. Retrieved from https://commons.wmu.se.

REFERENCES

1. International Maritime Organization (2024). *Resolution MSC.560(108)*. Retrieved from https://puc.overheid.nl.

2. Alderton, T., Bloor, M., Kahveci, E., Lane, T., Sampson, H., Thomas, M., Winchester, N., Wu, B. & Zhao, M. (2004). The global seafarer: Living and working conditions in a globalized industry. International Labour Office.

3. Mission to Seafarers (2024). *Seafarers Happiness Index Q4*. Retrieved from https://www.seafarershappinessindex.org.

4. Pipchenko, O., Torskiy, V. & Kozyr, O. (2025). Charting a course for career growth: Choosing the right training for your future. Seaways – The Nautical Institute.

5. Bhardwaj, S. (2019). Digitalisation of maritime education and training. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/337906014_Digitalization_of_Maritime_Education_and_Training.

6. Shah, P., Lim, C. & Yeo, G. (2023). Immersive and non-immersive maritime simulators: A systematic review of learning gain. *Journal of Marine Science and Engineering, 11*(1), 147.

7. Pipchenko, O. & Konon, N. (2025). MET enhancement using modern simulation technologies: XR, web and full mission. *Journal of Maritime Research, 22*(1), 404–412.

8. Pipchenko, O. D. & Kovtunenko, D. (2020). A suggestion of an application of blended learning in MET through a harmonized STCW model. *TransNav, 14*(3), 545–548.

9. OCIMF (2022). *SIRE 2.0 Programme Introduction and Guidance*. Version 1.0.

10. Maritime & Coastguard Agency (2025). Support for Maritime Training (SMarT). Retrieved from https://www.gov.uk/guidance/support-for-maritime-training-smart.

11. Oksavik, A., Hildre, H. P., Pan, Y., Jenkinson, I., Kelly, B., Paraskevadakis, D. & Pyne, R. (2020). Future Skills and Competence Needs. *SkillSea Project*. Retrieved from https://www.skillsea.eu.

12. Paris MoU (2024). *Port State Control Annual Report*. Retrieved from https://parismou.org.

13. Tokyo MoU (2024). *Annual Report on Port State Control in the Asia-Pacific Region*. Retrieved from https://www.tokyo-mou.org.

14. International Labour Organization. (2006). *Maritime Labour Convention*.

15. World Maritime University (2023). *Transport 2040 Phase 2: Impact of Technology on Seafarers – The Future of Work*. 15.

16. United Nations. (2024). Sustainable Development Goal 4: Quality Education. Retrieved from https://sdgs.un.org/goals/goal4.

17. BIMCO and ICS (2021). *Seafarer Workforce Report.*

18. Drewry (2023). *Manning Annual Review and Forecast 2023/24*. Retrieved from https://commons.wmu.se.

Pipchenko O. D., Konon N. M., Konon V. V., Bogachenko Ye. A. SEAFARER TRAINING IN THE CONTEXT OF GLOBALIZATION: ANALYSIS OF CHALLENGES AND INNOVATIVE OPPORTUNITIES

The maritime industry, accounting for over 80% of global trade by volume, faces unprecedented challenges in preparing personnel to meet contemporary demands driven by digitalization, decarbonization, labor market globalization, and demographic transformations. These megatrends are fundamentally reshaping maritime education and training (MET) systems, necessitating a transition from conventional methodologies to adaptive,

data-driven, and technology-enhanced approaches. This article provides a comprehensive analysis of the evolving landscape of MET, identifying critical barriers such as the shortage of modern simulator facilities, limited access to reliable high-speed internet for remote learning, the rapid obsolescence of professional competencies, and disparities in certification quality across regions. Concurrently, it delineates transformative opportunities enabled by the integration of blended learning models, immersive virtual and augmented reality (VR/AR) technologies, performance-based assessment frameworks, and modular micro-credentialing systems. Drawing on industry reports, regulatory frameworks (including IMO and MLC resolutions), and pedagogical research, the study proposes a conceptual "Blended Learning Model" that integrates three sequential phases: online theoretical instruction, hands-on simulator-based training, and AI-driven competency evaluation. This model is designed to address infrastructure deficiencies, enhance accessibility, and ensure high-quality training outcomes while aligning with the Standards of Training, Certification, and Watchkeeping (STCW) requirements and industry expectations for future-ready seafarers. The online theoretical phase leverages interactive e-learning platforms, offering multimedia modules on STCW competencies, updated regulatory codes (e.g., Polar Code, IGF Code), and emerging topics such as alternative fuel safety and digital navigation systems. The simulator-based training phase focuses on practical skill development in realistic scenarios, mitigating the limitations of outdated equipment. The final phase employs data-driven assessments with quantitative KPIs to ensure robust competency verification, supporting career progression through stackable micro-credentials. The research provides actionable recommendations for stakeholders—regulatory bodies, shipowners, and educational institutions—to harmonize blended learning standards, develop modern assessment tools, and invest in digital infrastructure to bridge disparities in access, particularly in underserved regions. By adopting flexible and scalable digital learning technologies, the maritime sector can cultivate a highly skilled and resilient workforce capable of navigating technological advancements, sustainability imperatives, and stringent safety demands in 21st-century shipping. The study not only critically examines structural barriers but also articulates a forward-looking vision for resilient seafarer training in a rapidly evolving global environment, emphasizing the need for international collaboration to ensure equitable and effective MET systems.

Key words: *maritime education and training; blended learning; digitalization; simulators; environmental sustainability; competencies; IMO; STCW.*

© Піпченко О. Д., Конон Н. М., Конон В. В., Богаченко Є. А.

Статтю прийнято до редакції 04.08.2025

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

TRANSPORT TECHNOLOGIES

UDC 656:02

MODEL OF THE TRANSPORT PROBLEM IN THE CASE OF CARGO DELIVERY BY TWO DIFFERENT TYPES OF VEHICLES

Slavych V. P., *Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport Systems and Technical Service of Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: vslavich@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7882-4198;*
Biloushchenko D. Yu., *Student of the Department of Transport Systems and Technical Service of Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine, e-mail: s6782581@kntu.edu.ua.*

The article considers the features of modeling the transport problem in the case when the cargo can be delivered by two different types of vehicles. The classical transport model does not take into account the variability of transportation costs by type of transport, which requires the construction of special mathematical models and methods for reducing them to a standard form. The aim of the work is to construct special types of models of the transport problem in the case of cargo delivery by the number of types of vehicles, more than two, and to propose algorithms for solving such transport problems by reducing them using appropriate procedures to the classical model. Three approaches to the formalization of multimodal transportation have been developed. The first approach is based on the sequential transportation of cargo by both types of transport, which involves the formation of a final cost matrix as the sum of the corresponding elements of a three-dimensional matrix. The second approach involves the choice of the type of transport that provides the lowest delivery cost for each individual "supplier–consumer" connection. The third approach is based on the introduction of a probability matrix or partial cargo shares, which determine what part of the cargo should be transported by each mode of transport. For each of the models, procedures are proposed for reducing the three-dimensional cost structure to a two-dimensional form, which allows the application of the potential method to find the optimal transportation plan. The numerical examples presented confirm the correctness and practical applicability of the proposed models. The results obtained can be used to optimize logistics schemes, manage multimodal transportation, and also to develop software tools to support decision-making in transport systems.

***Key words**: transport problem; interaction of transport modes; potential method; multimodal transportation; freight transportation; optimal delivery plan.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.178-186

Introduction. The transportation problem is one of the basic tools of optimization analysis in logistics and operations research. Its classical formulation involves the delivery of cargo from suppliers to consumers by a single mode of transport, provided that the volumes and costs of transportation are known. However, the real practice of transportation is much more complicated: in many cases, cargo is transported by several types of vehicles, which significantly affects the cost structure and organization of the logistics process. Combined, multimodal or intermodal transportation allows to increase the flexibility of transportation schemes, but at the same time imposes additional requirements on mathematical models, which must take into account different transportation options, their cost, availability and limitations.

Scientific sources mainly consider modifications of the transport problem that take into account time, resource or technological parameters, however, the problem of formalizing the delivery of goods by several modes of transport is still insufficiently studied.

In particular, an approach to building a model in which the cost of transportation between each "supplier-consumer" pair is presented in the form of a multidimensional structure is required, and the optimization process requires reducing such a problem to a form suitable for the application of classical solution methods.

In this context, it is relevant to develop models of the transport problem for cases where the cargo can be transported by two or more types of vehicles, as well as to determine algorithms for their effective solution. This work is devoted to these issues, in which several approaches to building a model are proposed and methods for transforming multidimensional data into a classical transport formulation are demonstrated.

Analysis of recent achievements and publications. Recent studies indicate an increased focus on the development of multimodal and combined transportation, which form the basis for improving mathematical models of transport processes. The works [1–4] focus on conceptual approaches to the organization of multimodal chains, determining the criteria for their effectiveness and the impact of digitalization and integration with European logistics practices on transport systems. In particular, the review [4] summarizes modern optimization methods and demonstrates the trend of transition from general logistics concepts to formalized models using mathematical and algorithmic tools, while [3] emphasizes the role of digital technologies in improving the efficiency of multimodal freight transportation.

Important for the research topic are works directly related to the modification of the transport problem. Publications [5], [6] consider adaptations of the classical transport model for specific conditions, in particular grouping of suppliers and optimization of delivery at individual enterprises. These approaches form a methodological basis for building models with the reduction of multidimensional cost structures to two-dimensional ones, which is important in the context of cargo delivery by various modes of transport.

Modern works on synchromodal and combined transportation emphasize the need for flexible choice of transport mode depending on resource availability, network conditions, and cost. Publications [7–9] demonstrate the possibilities of combining optimization models with simulation, modular routing concepts, and heuristic algorithms to achieve lower logistics costs and better utilization of transport resources. Works [10], [11] also consider dynamic route updating and the application of machine learning methods, in particular Q-learning, which allows increasing the efficiency of transport systems in changing conditions.

Researchers pay considerable attention to uncertainty in logistics processes, equilibrium conditions, and environmental requirements. Publications [11–16] emphasize the need to build robust and low-carbon models of transport routes under uncertain demand and time-varying conditions. In particular, [12], [14] investigate equilibrium and optimization models for multimodal networks with intermodality and uncertainty, while industry-oriented examples [13], [15] consider cold chain logistics and perishable goods, demonstrating the practical importance of taking into account technical, environmental, and technological constraints.

The analysis of sources shows that despite the significant development of multimodal and synchromodal approaches, specialized formal models that describe the case of cargo delivery by two different modes of transport and the procedure for reducing the three-dimensional cost matrix to the classical transport problem have not been studied sufficiently. The works closest to this topic are [5], [6], however, they consider other aspects of transport model modification. Thus, the topic of the article is relevant and fills an important gap in modern research, creating prerequisites for the further development of models and optimization algorithms in the field of multimodal transport.

Goal and problem statement. In the practice of freight transportation, quite often the cargo has to be delivered not by one, but by two or more different types of transport, for example, by road and rail. In this case, it is obvious that the cost of transporting cargo from suppliers to consumers for different types of transport will be different. Therefore, when applying the model of the transport problem and the method of its solution for such situations, the necessary changes are required.

The purpose of this work is to construct special types of models of the transport problem in the case of cargo delivery by the number of types of vehicles, more than two, and to propose algorithms for solving such transport problems by reducing them to the classical model using appropriate procedures.

Presentation of the main research material. Let there be given m cargo suppliers $A_1, A_2, \ldots, A_i, \ldots, A_m$, in which cargo is concentrated in quantities $a_1, a_2, \ldots, a_m$ units, respectively. This cargo must be transported to n cargo consumers $B_1, B_2, \ldots, B_j, \ldots, B_n$, *who need it in quantities* $b_1, b_2, \ldots, b_n$ *units,* respectively. The cargo can be transported by two types of vehicles and the cost of transporting a unit of cargo by each type is known, which are given in the form of a three-dimensional matrix:

$$\left(\begin{array}{cccc} C_{11}^1 & C_{12}^1 & \dots & C_{1n}^1 \\ C_{21}^1 & C_{22}^1 & \dots & C_{2n}^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{m1}^1 & C_{m2}^1 & \dots & C_{mn}^1 \\ \hline C_{11}^2 & C_{12}^2 & \dots & C_{1n}^2 \\ C_{21}^2 & C_{22}^2 & \dots & C_{2n}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{m1}^2 & C_{m2}^2 & \dots & C_{mn}^2 \end{array}\right), \quad (1)$$

or abbreviated:

$$C_{ij}^k,$$

where i – the number of the cargo supplier, $i = \overline{1,m}$;
j – the number of the cargo consumer, $j = \overline{1,n}$;
k – type of vehicle, $k = \overline{1,2}$.

It is necessary to draw up a transportation plan that allows you to transport all cargo from suppliers, satisfy the needs of all consumers, and has the lowest cost.

Let us denote the transportation plan by:

$$X = \begin{Bmatrix} x_{11}^1, x_{12}^1, \dots, x_{1n}^1, x_{21}^1, x_{22}^1, \dots, x_{2n}^1, \dots, x_{m1}^1, x_{m2}^1, \dots, x_{mn}^1, \\ x_{11}^2, x_{12}^2, \dots, x_{1n}^2, x_{21}^2, x_{22}^2, \dots, x_{2n}^2, \dots, x_{m1}^2, x_{m2}^2, \dots, x_{mn}^2, \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

where x_{ij}^k – the amount of cargo transported from supplier i to consumer j by mode of transport k.

Let's build a model of this problem.

The objective function of such a problem will be:

$$F = C_{11}^1 \cdot x_{11}^1 + C_{12}^1 \cdot x_{12}^1 + \dots + C_{1n}^1 \cdot x_{1n}^1 + C_{21}^1 \cdot x_{21}^1 + C_{22}^1 \cdot x_{22}^1 + \dots + C_{2n}^1 \cdot x_{2n}^1 + \dots + C_{m1}^1 \cdot x_{m1}^1 + C_{m2}^1 \cdot x_{m2}^1 + \dots + C_{mn}^1 \cdot x_{mn}^1 + C_{11}^2 \cdot x_{11}^2 + C_{12}^2 \cdot x_{12}^2 + \dots + C_{1n}^2 \cdot x_{1n}^2 + C_{21}^2 \cdot x_{21}^2 + C_{22}^2 \cdot x_{22}^2 + \dots + C_{2n}^2 \cdot x_{2n}^2 + \dots + C_{m1}^2 \cdot x_{m1}^2 + C_{m2}^2 \cdot x_{m2}^2 + \dots + C_{mn}^2 \cdot x_{mn}^2 = \sum_{k=1}^{2} \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} C_{ij}^k \cdot x_{ij}^k \to \min.$$

Let us consider several different submodels of such a problem, depending on the specific conditions under which the cargo can be redistributed across different modes of transport.

1. First, let's consider the simplest option of using two types of transport.

Let's assume that cargo is delivered from each supplier to each consumer first by one mode of transport, then by another.

It is obvious that in such a situation, the amount of cargo transported between a specific supplier and consumer by the first and second modes of transport will be the same, because the same cargo is transported, that is:

$$C_{ij}^1 = C_{ij}^2,$$

where i and j are fixed.

In this case, to reduce such a problem to the classical interpretation, it is necessary to create a two-dimensional matrix of transportation costs, each element of which is the sum of two corresponding elements from the initial three-dimensional matrix of transportation costs (1), which are located in the same line relative to the coordinate axis of the mode of transport.

The new cost matrix will look like this:

$$\begin{pmatrix} C_{11}^1 + C_{11}^2 & C_{12}^1 + C_{12}^2 & \dots & C_{1n}^1 + C_{1n}^2 \\ C_{21}^1 + C_{21}^2 & C_{22}^1 + C_{22}^2 & \dots & C_{2n}^1 + C_{2n}^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{m1}^1 + C_{m1}^2 & C_{m2}^1 + C_{m2}^2 & \dots & C_{mn}^1 + C_{mn}^2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Further, to find the optimal cargo transportation plan, you can apply known methods for solving the transport problem, for example, the most common potential method.

Consider numerical example 1.

Find the cheapest transportation plan for the transportation problem under the following conditions. Let there be 4 cargo suppliers A_1, A_2, A_3, A_4, which have cargo concentrated in quantities of 200, 250, 150, 300 units, respectively.

This cargo needs to be transported to 5 cargo consumers B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, who need it in quantities of 200, 200, 100, 250, 150 units, respectively. The cargo can be transported by two types of vehicles and the cost of transporting a unit of cargo by each type of transport is given in the form of a three-dimensional matrix:

$$\left(\begin{array}{ccccc} 5 & 6 & 4 & 7 & 8 \\ 7 & 3 & 4 & 9 & 5 \\ 5 & 8 & 7 & 6 & 4 \\ 6 & 4 & 6 & 7 & 9 \\ \hline 8 & 9 & 4 & 5 & 6 \\ 6 & 7 & 8 & 3 & 4 \\ 3 & 7 & 4 & 5 & 5 \\ 4 & 9 & 8 & 7 & 4 \end{array}\right).$$

To solve such a problem, we first construct the final cost matrix according to expression (3):

$$\begin{pmatrix} 13 & 15 & 8 & 12 & 14 \\ 13 & 10 & 12 & 12 & 9 \\ 8 & 5 & 11 & 11 & 9 \\ 10 & 13 & 14 & 14 & 13 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Next, we compile a planning table for the potential method, using the values of matrix (4) as transportation costs. The algorithm of the potential method itself is applied, the results of which are given in Table 1.

Table 1 – Planning table for the potential method of the transport problem for example 1

Planning matrix	***Consumers***					***Stocks***
Suppliers	***B_1***	***B_2***	***B_3***	***B_4***	***B_5***	
A_1	13	15	8 100	12 100	14	200
A_2	13	10 50	12	12 50	9 150	250
A_3	8	5 150	11	11	9	150
A_4	10 200	13	14	14 100	13	300
Needs	200	200	100	250	150	900

Thus, the optimal plan for the task was:

$$X = \{x_{13} = 100, x_{14} = 100, x_{21} = 50, x_{24} = 50, x_{34} = 150, x_{32} = 150, x_{41} = 200, x_{44} = 100, \}.$$

The value of the objective function is:

$$F = 100 \cdot 8 + 100 \cdot 12 + 50 \cdot 10 + 50 \cdot 12 + 150 \cdot 9 + \\ + + 150 \cdot 5 + 200 \cdot 10 + 100 \cdot 14 = 8600 .$$

2. Now let's consider another option for using two types of transport when using the transport problem.

Let's assume that the cargo can be transported by only one mode of transport. In this case, to select the mode of transport by which the cargo will be transported, the one with the cheapest transportation cost is chosen.

In this case, to reduce such a problem to the classical interpretation, it is necessary to create a two-dimensional matrix of transportation costs, each element of which is a minimum of two corresponding elements from the initial three-dimensional matrix of transportation costs (1), which are located in the same line relative to the coordinate axis of the mode of transport.

The new cost matrix will look like this:

$$\begin{pmatrix} min(C_{11}^1; C_{11}^2) & min(C_{12}^1; C_{12}^2) & \dots & min(C_{1n}^1; C_{1n}^2) \\ min(C_{21}^1; C_{21}^2) & min(C_{22}^1; C_{22}^2) & \dots & min(C_{2n}^1; C_{2n}^2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ min(C_{m1}^1; C_{m1}^2) & min(C_{m2}^1; C_{m2}^2) & \dots & min(C_{mn}^1; C_{mn}^2) \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Further, to find the optimal cargo transportation plan, the potential method of solving the transport problem can be applied.

When solving a specific numerical problem, when writing the final matrix (5) and then filling in the planning table of the potential method, in the values of transportation costs, it is necessary to indicate which type of transport each of them applies to. This can be written with a superscript indicating the number of the type of transport, for example, 6^{1} - that is, the cost of transportation is 6 units and the 1st type of transport will be used. Also, a similar notation should be indicated in the values of the transportation plan itself. This is necessary when forming a transportation plan for distributing cargo by type of transport.

It should be noted that in the case where the minimum for calculating a certain cost coincides for both modes of transport, then any of them can be chosen to draw up a transportation plan, unless the priority of a specific mode of transport is stipulated in advance.

Consider numerical example 2.

As input values for the transport problem, we will take the values from the previous example 1.

To solve this problem, we compose a final matrix of values according to expression (5):

$$\begin{pmatrix} 5^1 & 6^1 & 4^1 & 5^2 & 6^2 \\ 6^2 & 3^1 & 4^1 & 3^2 & 4^2 \\ 3^2 & 7^2 & 4^2 & 5^2 & 4^1 \\ 4^2 & 4^1 & 6^1 & 7^1 & 4^2 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Next, we compile a planning table for the potential method, using the values of matrix (6) as transportation costs. The algorithm of the potential method itself is applied, the results of which are given in Table 2.

Table 2 – Planning table for the potential method of the transport problem for example 2

Planning matrix	***Consumers***					***Stocks***
Suppliers	***B_1***	***B_2***	***B_3***	***B_4***	***B_5***	
A_1	5^1	6^1	4^1 100	5^2 100	6^2	200
A_2	6^2	3^1 100	4^1	3^2 150	4^2	250
A_3	3^2 150	7^2	4^2	5^2	4^1	150
A_4	4^2 50	4^1 100	6^1	7^1	4^2 150	300
Needs	200	200	100	250	150	900

Thus, the optimal plan for the task was:

$$X = \begin{Bmatrix} x_{13}^1 = 100, x_{14}^2 = 100, x_{22}^1 = 100, x_{24}^2 = 150, x_{31}^2 = 150, \\ x_{41}^2 = 50, x_{42}^1 = 100, x_{45}^2 = 150 \end{Bmatrix}.$$

The value of the objective function is:

$$F = 100 \cdot 4 + 100 \cdot 5 + 100 \cdot 3 + 150 \cdot 3 + 150 \cdot 3 + \\ +50 \cdot 4 + 100 \cdot 4 + 150 \cdot 4 = 3300.$$

The optimal plan record shows not only the value of the transportation itself, but also the type of transport that should be used to transport this cargo.

3. Now let's consider another option for using two types of transport. Let's assume that for each "supplier-consumer" pair, percentage ratios of the amount of cargo that can be transported by one or another mode of transport are given in advance.

These can be probabilistic indicators that can be determined, for example, by the number of transport units of a particular mode of transport that are actually available for transportation at the moment.

Such relationships can be given in the form of a probability matrix *P*, in which the values for the first type of vehicle will be indicated. The corresponding values for the second type can be obtained by subtracting from unity.

$$P = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

where $p_{ij} \in [0;1]$.

It should be noted that in the case when the coefficients p_{ij} are obtained on the basis of statistical data and can have a probabilistic interpretation, then within the framework of this model they are considered as deterministic and predetermined parameters. In the model, cargo transportation by different modes of transport is not sequential. For each “supplier–consumer” pair, the cargo is distributed between the modes of transport in fixed shares, determined by the matrix *P*.

It should be noted that there are also possible cases when $p_{ij}=0$ and $p_{ij}=1$, that is, when cargo in some individual connections is delivered by a vehicle of only the second or only the first type, respectively.

Then the calculation of transportation values will be determined by the expressions:

$$\begin{cases} x_{ij}^1 = p_{ij} \cdot x_{ij} \\ x_{ij}^2 = (1 - p_{ij}) \cdot x_{ij} \\ x_{ij} = x_{ij}^1 + x_{ij}^2 \end{cases}. \quad (8)$$

Then, taking into account (8), the objective function of the specified problem model will have the following form:

$$F = \left(C_{11}^1 \cdot p_{11} + C_{11}^2(1 - p_{ij})\right) \cdot x_{11} + \cdots + \left(C_{mn}^1 \cdot p_{mn} + C_{mn}^2(1 - p_{mn})\right) \cdot x_{mn} = \\ = \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} \left(C_{ij}^1 \cdot p_{ij} + C_{ij}^2(1 - p_{ij})\right) \cdot x_{ij} \to min .$$

In this case, to reduce such a problem to the classical interpretation, it is necessary to create a two-dimensional matrix of transportation costs, each element of which is a minimum with a linear expression of the corresponding elements from the initial three-dimensional matrix of transportation costs (1), which are located in the same line relative to the coordinate axis of the mode of transport.

The new cost matrix will look like this:

$$\begin{pmatrix} C_{11}^1 \cdot p_{11} + C_{11}^2(1 - p_{11}) & C_{12}^1 \cdot p_{12} + C_{12}^2(1 - p_{12}) & \cdots & C_{1n}^1 \cdot p_{1n} + C_{1n}^2(1 - p_{1n}) \\ C_{21}^1 \cdot p_{21} + C_{21}^2(1 - p_{21}) & C_{22}^1 \cdot p_{22} + C_{22}^2(1 - p_{22}) & \cdots & C_{2n}^1 \cdot p_{2n} + C_{2n}^2(1 - p_{12}) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ C_{m1}^1 \cdot p_{m1} + C_{m1}^2(1 - p_{m1}) & C_{m2}^1 \cdot p_{m2} + C_{m2}^2(1 - p_{m2}) & \cdots & C_{mn}^1 \cdot p_{mn} + C_{mn}^2(1 - p_{mn}) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Next, we similarly apply the potential method to solve the transport problem.

Consider numerical example 3.

As input values of the transport problem, we take the values of the previous example 1. Also, as a condition of the model of such a problem, the probability matrix of the distribution of cargo by modes of transport between each supplier and each consumer is given:

$$P = \begin{pmatrix} 0{,}52 & 0{,}4 & 0{,}64 & 0{,}88 & 0{,}19 \\ 0{,}35 & 1 & 0{,}81 & 0{,}63 & 0{,}48 \\ 0{,}2 & 0{,}65 & 0{,}34 & 0 & 0{,}78 \\ 0{,}45 & 0{,}7 & 0{,}28 & 0{,}15 & 0{,}59 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

To solve such a problem, we compose a final cost matrix according to expression (9):

$$\begin{pmatrix} 6{,}44 & 7{,}8 & 4 & 6{,}76 & 6{,}38 \\ 6{,}35 & 3 & 4{,}76 & 6{,}78 & 4{,}48 \\ 3{,}4 & 7{,}65 & 5{,}02 & 5 & 4{,}22 \\ 4{,}9 & 5{,}5 & 7{,}44 & 7 & 6{,}95 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Now we compile a planning table for the potential method, using the values of matrix (11) as transportation costs.

The algorithm of the potential method itself will be applied, the results of which are given in Table 3.

Table 3 – Planning table for the potential method of the transport problem for example 3

Planning matrix	***Consumers***					***Stocks***
Suppliers	***B₁***	***B₂***	***B₃***	***B₄***	***B₅***	
A₁	6,44	7,8	4 100	6,76 100	6,38	200
A₂	6,35	3 200	4,76	6,78	4,48	250
A₃	3,4	7,65	5,02	5 50	4,22 100	150
A₄	4,9 200	5,5	7,44	7 100	6,95	300
Needs	200	200	100	250	150	900

Thus, the optimal plan for the task was:

$$X = \begin{Bmatrix} x_{13}^1 = 100\,, x_{14}^2 = 100, x_{22}^1 = 100\,, x_{24}^2 = 150, x_{31}^2 = 150\,, \\ x_{41}^2 = 50, x_{42}^1 = 100\,, x_{45}^2 = 150 \end{Bmatrix}.$$

The value of the objective function is:

$$F = 100 \cdot 4 + 100 \cdot 6{,}76 + 200 \cdot 3 + 50 \cdot 5 + 100 \cdot 4{,}22 + \\ + 200 \cdot 4{,}9 + 100 \cdot 7 = 4252\,.$$

Conclusions. The paper considers the formulation and constructs three generalized models of the transport problem in the case of cargo delivery by two different types of vehicles. It is shown that the use of the classical transport formulation is possible only after the appropriate transformation of the three-dimensional matrix of transportation costs into a two-dimensional one. Depending on the transportation conditions, three approaches are proposed:

1. Total cost model, when cargo is sequentially transported by both modes of transport.

2. A model for choosing the optimal mode of transport that minimizes costs on each connection.

3. Model of probabilistic or partial distribution of cargo between modes of transport.

For each model, procedures for reducing to a classical transport problem are proposed and the application of the potential method to find the optimal transportation plan is demonstrated. The

numerical examples provided confirm the operability of the developed models and the versatility of the proposed approach in planning freight transportation in multi-transport schemes.

The proposed models allow taking into account various logistical conditions, such as restrictions on the share of transportation by certain transport, different modes of vehicle availability, and also provide the possibility of flexible transportation planning based on the criterion of cost minimization.

Prospects for further research.

1. Generalization of the model to the case of more than two modes of transport. Further research may be aimed at developing models in which the number of available modes of transport exceeds two. This requires the formation of multidimensional cost matrices, the expansion of approaches to their reduction to a two-dimensional form, and the creation of universal optimization algorithms. Of particular note is the construction of procedures that allow automatically selecting a combination of vehicles for each direction of transportation and ensuring cost minimization in multimodal logistics chains.

2. Taking into account the technical and operational characteristics of vehicles. A promising direction is to include in the model restrictions on carrying capacity, dimensions, fuel consumption, environmental standards, availability of transport units and other technological parameters. Such an expansion will allow adapting the mathematical model to real transportation conditions. In addition, it is advisable to investigate the mechanisms of integrating these restrictions into the classical transport formulation or to form a new modified model that will combine cost and technical criteria in a single optimization approach.

REFERENCES

1. Volynets, L. M. (2018). Kontseptualni aspekty formuvannya multymodalnykh perevezen v umovakh hlobalizatsiyi. *Ekonomika ta upravlinnya na transporti.* № 7. P. 121–132. http://nbuv.gov.ua/UJRN/eut_2018_7_16.

2. Kyrychenko, H. I., Strelko, O. H., Berdnychenko, Yu. A., Petrykovets, O. V., Pavlyuk, Ye. I. (2019). Suchasni tendentsiyi rozvytku multymodal′noyi systemy perevezennya vantsiv. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky.* № 3. P. 148–153. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.3-2/26.

3. Slavych, V. P. ta in. (2024). Teoretyko-metodychni zasady vykorystannya tsyfrovykh tekhnolohiy v Ukrayini shlyakhom vprovadzhennya dosvidu YES. Pidvyshchennya ekonomichnoyi efektyvnosti transportnykh pidpryyemstv cherez tsyfrovizatsiyu protsesu dostavky vantazhu riznymy vydamy transportu: kolektyvna monohrafiya. Zaporizhzhya: 246 p. ISBN 978-617-8064-49-5. https://doi.org/10.5281/zenodo.14258681.

4. Claudia Archetti, Lorenzo Peirano, M. Grazia Speranz. (2022). Optimization in multimodal freight transportation problems: A Survey. *European Journal of Operational Research*.Vol. 299, Issue 1. P. 1–20. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.07.031.

5. Slavych, V. P., Dobrova, K. D. (2020). Model′ ta metod znakhodzhennya opornoho ta optimal′nykh planiv модифікованої transportnoyi zadachi u vypadku hrupuvannya postachal′nykiv vantazhu. *Prykladni pytannya matematychnogo modelyuvannya*. № 1. P. 187–193. https://doi.org/10.32782/2618-0340/2020.1-3.19.

6. Slavych, V. P., Yel′nyk, V. V. (2023). Optymizatsiya protsesu dostavky vantazhu hazopostachal′noho pidpryyemstva. *Visnyk KhNTU.* № 2 (85). P. 84–89. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.11.

7. Aicha Ferjani, Amina El Yaagoubi, Jaouad Boukachour, Claude Duvallet. (2024). An optimization-simulation approach for synchromodal freight transportation. *Multimodal Transportation*. Vol. 3, Issue 3. 100151. https://doi.org/10.1016/j.multra.2024.100151.

8. Jonas Hatzenbühler, Erik Jenelius, Győző Gidófalvi, Oded Cats. (2023). Modular Vehicle Routing for Combined Passenger and Freight Transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 173, 103688. https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103688.

9. Zhang, Y., Guo, W., Negenborn, R. R., Atasoy, B. (2022). Synchromodal transport planning with flexible services: mathematical model and heuristic algorithm. *Transportation Research Part C: Emerging Technol*. Vol.140. 103711. https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103711.

10. Danchuk, V., Comi, A., Weiß, C., & Svatko, V. (2023). The optimization of cargo delivery processes with dynamic route updates in smart logistics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2, No. 3 (122). P. 64–73. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277583.

11. Zhang, T., Cheng, J., Zou, Y. (2024). Multimodal transportation routing optimization based on multi-objective Q-learning under time uncertainty. *Complex Intell. Syst*. Vol. 10. P. 3133–3152. https://doi.org/10.1007/s40747-023-01308-9.

12. Kadem, K., Ameli, M., Zargayouna, M., & Oukhellou, L. (2024). Multimodal urban transportation network equilibrium including intermodality and shared mobility services. *arXiv preprint arXiv*. 2402.00735. https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.00735.

13. Liu, S. (2023). Multimodal Transportation Route Optimization of Cold Chain Container in Time-Varying Network Considering Carbon Emissions. *Sustainability*. 15, 4435. https://doi.org/10.3390/su15054435.

14. Liu, Z., Zhou, S., Liu, S. (2025). Optimization of Multimodal Transport Paths Considering a Low-Carbon Economy Under Uncertain Demand. *Algorithms*. Vol. 18, no. 2. 92. https://doi.org/10.3390/a18020092.

15. Pérez-Lechuga, G., Martínez-Sánchez, J. F., Venegas-Martínez, F., Madrid-Fernández, K.N. (2024). A Routing Model for the Distribution of Perishable Food in a Green Cold Chain. *Mathematics*. 12, 332. https://doi.org/10.3390/math12020332.

16. Ren, X., Pan, S., Zheng, G. (2025). Robust Optimization of Multimodal Transportation Route Selection Based on Multiple Uncertainties from the Perspective of Sustainable Transportation. *Sustainability.* Vol. 17, Issue 12. 5508. https://doi.org/10.3390/su17125508.

Славич В. П., Білоущенко Д. Ю. МОДЕЛЬ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ У ВИПАДКУ ДОСТАВКИ ВАНТАЖУ ДВОМА РІЗНИМИ ВИДАМИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У статті розглянуто особливості моделювання транспортної задачі у випадку, коли вантаж може доставлятися двома різними видами транспортних засобів. Класична транспортна модель не враховує варіативність вартостей перевезень за типами транспорту, що потребує побудови спеціальних математичних моделей та методів їх зведення до стандартної форми. Метою роботи є побудова спеціальних видів моделі транспортної задачі у випадку доставки вантажу кількістю видів транспортних засобів, більше за два, та запропонування алгоритмів розв'язання таких транспортних задач шляхом зведення за допомогою відповідних процедур до класичної моделі Розроблено три підходи до формалізації багатовидових перевезень. Перший підхід грунтується на послідовному перевезенні вантажу обома видами транспорту, що передбачає формування підсумкової матриці вартостей як суми відповідних елементів тривимірної матриці. Другий підхід передбачає вибір того виду транспорту, який забезпечує найменшу вартість доставки для кожного окремого сполучення «постачальник–споживач». Третій підхід спирається на введення матриці ймовірностей або часткових часток вантажу, які визначають, яка частина вантажу повинна перевозитися кожним видом транспорту. Для кожної з моделей запропоновано процедури зведення тривимірної структури вартостей у двовимірну форму, що дозволяє застосовувати метод потенціалів для пошуку оптимального плану перевезень. Наведені числові приклади підтверджують правильність та практичну придатність запропонованих моделей. Отримані результати можуть використовуватися для оптимізації логістичних схем, управління мультимодальними перевезеннями, а також для розроблення програмних засобів підтримки прийняття рішень у транспортних системах.

Ключові слова: *транспортна задача; взаємодія видів транспорту; метод потенціалів; мультимодальні перевезення; вантажні перевезення; оптимальний план доставки.*

© Slavych V. P., Biloushchenko D. Yu.

Статтю прийнято до редакції 05.12.2025

УДК 656.13

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ШЛЯХОМ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПЕРЕХОДУ НА ЕКОЛОГІЧНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ (ЕЛЕКТРОБУСИ)

Войтович О. А., *к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: voitovych.olha@kntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-0510-4362;*
Луб'яний П. В., *к.т.н., доцент, завідувач кафедри транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: lubyany.pavlo@kntu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2668-5063;*
Мартиник В. С., *магістрантка Херсонського національного технічного університету, м. Херсон, Україна, email: s6911024@kntu.edu.ua.*

Робота належить до галузі транспортних технологій та міських пасажирських перевезень і присвячена підвищенню ефективності функціонування міського громадського транспорту шляхом обґрунтування доцільності переходу на екологічні види транспорту, зокрема електробуси. Актуальність дослідження зумовлена зростанням пасажиропотоків, високими експлуатаційними витратами, екологічними проблемами та необхідністю модернізації рухомого складу українських міст. У роботі застосовано комплекс методів: натурні спостереження, обробку даних пасажиропотоку, техніко-експлуатаційні розрахунки, порівняльний аналіз характеристик дизельних автобусів та електроавтобусів, оцінку економічної та екологічної ефективності, математичне моделювання графіків руху. Отримано такі основні результати: визначено нерівномірність пасажиропотоків на маршруті №51 у м. Львові, розраховано необхідну кількість рухомого складу та оптимізовано графік його роботи, обґрунтовано заміну автобусів БАЗ А079 на електроавтобуси SUNLONG SLK6121EV. Доведено можливість зменшення собівартості перевезень на 25–30%, повне усунення локальних викидів CO_2 та значне скорочення шумового забруднення. Значення отриманих результатів полягає у створенні науково обґрунтованої моделі переходу на екологічний транспорт, яку можуть використовувати перевізники та органи місцевого самоврядування при оновленні автопарку та плануванні сталого розвитку міської мобільності.

Ключові слова: *електробуси; пасажиропотік; міські перевезення; техніко-експлуатаційні показники; екологічний транспорт; оптимізація маршруту.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.187-198

Вступ. У сучасному світі, що характеризується стрімкою урбанізацією та зростанням щільності міського населення, питання ефективного використання обмеженого простору набуває особливої актуальності. У цьому контексті громадський транспорт є ключовою частиною забезпечення сталого та ефективного розвитку населених пунктів. Його значення виходить далеко за межі простого перевезення пасажирів, адже він відіграє вирішальну роль у вирішенні комплексу соціальних, економічних та екологічних проблем, з якими стикаються сучасні міста.

Основні переваги належної інфраструктури громадського транспорту охоплюють екологічність (зменшення забруднення довкілля), підвищення мобільності (суттєве зниження транспортних заторів), а також зростання соціальної доступності до робочих місць [1, 2], освіти, медичних та культурних закладів для всіх верств населення. Таким чином, громадський транспорт не лише сприяє мобільності мешканців, але й формує життєвий та економічний потенціал міста, активно впливаючи на його розвиток.

Хоча громадський транспорт є критично важливим, його впровадження та експлуатація пов'язані з певними викликами, зокрема високими витратами на будівництво та управління, а також потребою в забезпеченні комфорту, який має конкурувати з перевагами приватного автомобіля. Проте, правильне планування та організація системи громадського транспорту дозволяє перетворити його на життєво необхідну частину сучасного міста, сприяючи створенню більш екологічного, доступного та комфортного середовища для життя [3].

Аналіз публікацій. У другій половині 2010-х – початку 2020-х років у науковій літературі відзначається інтенсивне зростання кількості досліджень, присвячених електрифікації парків міського автобусного транспорту, оптимізації маршрутів та методикам прогнозування пасажиропотоків. Одна з ключових тем – порівняння загальної вартості володіння (Total Cost of Ownership – TCO) для батарейних електробусів і традиційних дизельних автобусів. Найновіші європейські дослідження свідчать, що шляхом зниження вартості батарей, зростання цін на паливо та економічних переваг експлуатації електробусів (нижчі експлуатаційні витрати, простіше технічне обслуговування) TCO електробусів у ряді країн вже сьогодні наближається або стає конкурентним до дизельних машин, проте остаточна оцінка залишається залежною від локальних умов (вартість електроенергії, політика субсидування, наявність зарядної інфраструктури) [4, 5]. Другим важливим напрямом є дослідження операційних задач, пов'язаних із плануванням графіків руху та заряджання електробусів. На відміну від дизельних автобусів, електричні одиниці вимагають інтегрованого підходу: розробка щоденних/нічних графіків, узгоджених із потребами зарядної інфраструктури (поточне/швидке заряджання), моделювання обмежень депо та управління енергоспоживанням. Останні публікації пропонують багатостадійні оптимізаційні підходи та математичні моделі для мінімізації сукупних витрат і забезпечення виконання маршрутів з допуском на зарядні вікна [6, 7]. Автори [8] враховують обмежену кількість зарядних пристроїв і максимальну сумарну потужність зарядної станції – тобто реальні ресурси, які часто в дослідженнях спрощують. Третій блок досліджень стосується оптимального планування складу парку (кількість і типи автобусів) та стратегій його поступової заміни. Класичні моделі (зокрема роботи DTU та ін.) розробляють алгоритми для визначення оптимального складу парку, що мінімізують сумарні витрати при дотриманні показників обслуговування пасажирів. Такі моделі є базовими інструментами при формуванні програм оновлення рухомого складу [9–11]. Четвертий напрям – аналіз і прогноз пасажиропотоків. Сучасні роботи поєднують класичні методи (натурні спостереження, епюри пасажиропотоку) з підходами машинного навчання (Bi-LSTM, SDAE та ін.) для побудови точніших прогнозів попиту, що, у свою чергу, дозволяє раціональніше розподіляти ресурси і підлаштовувати графіки під реальні потреби пасажирів [12–15]. Аналітичні матеріали з України відзначають потребу масштабної модернізації міського транспорту та показують, що успішна електрифікація вимагає значних капіталовкладень і координації на рівні міських влад і перевізників. Львів за останні роки здійснював кроки до модернізації (реформи тарифної політики, єдиний квиток, закупівлі сучасних автобусів), що створює сприятливе середовище для впровадження електробусів на прикладі окремих маршрутів. Однак бракує практичних кейсів, які поєднують натурні дослідження пасажиропотоку з економічною оцінкою повної заміни рухомого складу саме на рівні одного маршруту в українських містах [16, 17].

Постановка проблеми. Сучасна система міських пасажирських перевезень у більшості українських міст, зокрема у м. Львові, стикається з низкою проблем, пов’язаних із застарілим рухомим складом, нерівномірністю пасажиропотоків, недостатньою регулярністю руху та високим рівнем експлуатаційних витрат. Значна частина автобусів, що обслуговують міські маршрути, має підвищене енергоспоживання, високі показники шкідливих викидів у атмосферу, а також не забезпечує належного рівня комфорту для пасажирів. Зростання кількості приватного транспорту та інтенсивності дорожнього руху спричиняє затори, збільшення часу поїздок і зниження привабливості громадського транспорту. У таких умовах актуальним є пошук шляхів підвищення ефективності функціонування міських автобусних маршрутів шляхом упровадження сучасних організаційно-технологічних рішень, зокрема оптимізації графіків руху, оновлення рухомого складу та переходу на екологічні види транспорту. Для автобусного маршруту №51 м. Львова, який характеризується високим пасажиропотоком і складними умовами руху, особливо гостро постає необхідність розроблення та наукового обґрунтування комплексу заходів зі вдосконалення процесу пасажирських перевезень на цьому маршруті. Це забезпечить підвищення ефективності

транспортного обслуговування населення, зменшення витрат перевізника та покращення екологічних показників міського транспорту.

Метою роботи є наукове обґрунтування та розроблення заходів із вдосконалення процесу перевезення пасажирів на міському автобусному маршруті №51 у м. Львові шляхом аналізу наявних умов експлуатації, оцінки пасажиропотоків, техніко-економічного порівняння рухомого складу та обґрунтування доцільності переходу на екологічні види транспорту (електробуси).

Задачі роботи:

– проаналізувати сучасний стан пасажирських перевезень у м. Львові, зокрема організацію роботи маршруту №51, характеристику перевізника та діючого рухомого складу;

– визначити основні техніко-експлуатаційні показники роботи автобусів, що використовуються на маршруті, та оцінити їх відповідність сучасним вимогам до енергоефективності й екологічності;

– обґрунтувати доцільність заміни діючого рухомого складу (автобусів БАЗ А079) на сучасні електроавтобуси (наприклад, SUNLONG SLK6121EV), враховуючи технічні параметри, умови маршруту та інтенсивність перевезень;

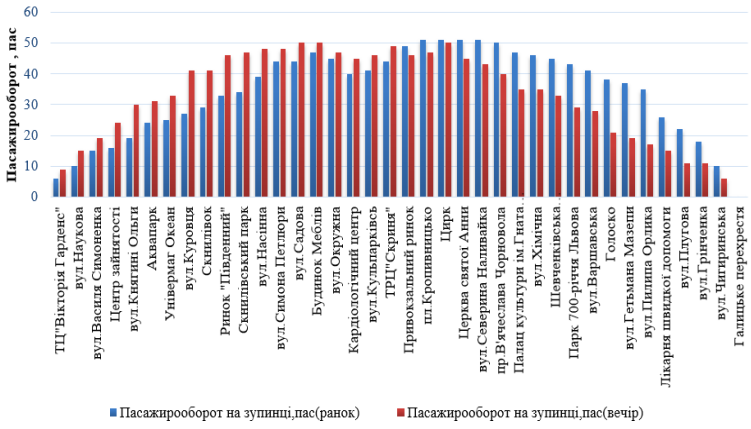
– провести техніко-економічне порівняння варіантів експлуатації традиційного та електричного транспорту, визначити показники економічної ефективності модернізації;

– оцінити екологічний ефект переходу на електроавтобуси, визначити можливе скорочення обсягів викидів шкідливих речовин у навколишнє середовище;

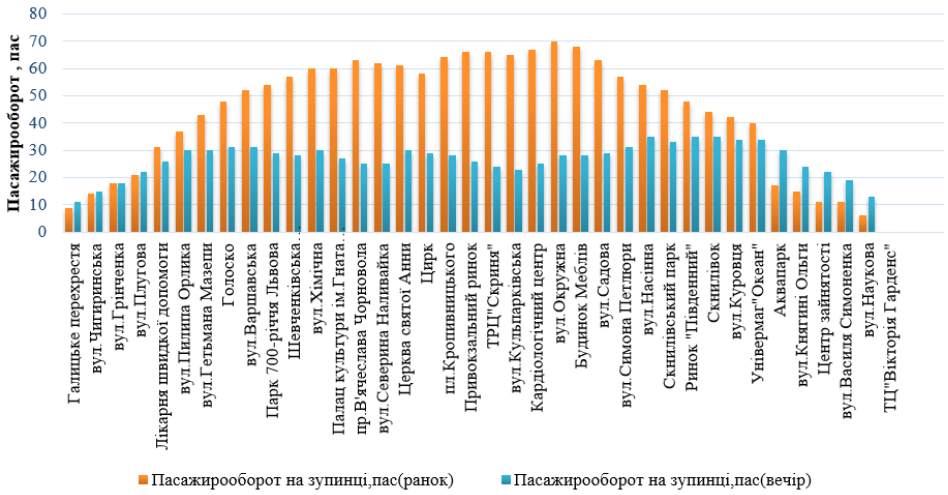
– сформулювати практичні рекомендації щодо підвищення ефективності організації перевезень пасажирів на міських автобусних маршрутах у контексті впровадження екологічного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Для досягнення поставленої мети дослідження було використано комплекс методів, що поєднують аналіз фактичних даних експлуатації міського маршруту, математичне моделювання, техніко-економічні розрахунки та порівняльну оцінку ефективності різних варіантів організації перевезень. Методологічну основу роботи становлять положення теорії транспортних процесів, організації пасажирських перевезень, транспортної логістики, енергетичної ефективності та екологічної безпеки міського транспорту. Дослідження спирається на державні стандарти, норми та методичні рекомендації [17–19].

На першому етапі дослідження проведено аналіз існуючої організації перевезень на маршруті №51 у м. Львові. Для цього використано методи натурних спостережень, анкетування пасажирів та аналізу облікових даних перевізника ТОВ «Успіх БМ». Натурні спостереження проводились протягом тижня у години пік і міжпікові періоди. Визначалися такі показники: інтервал руху, середня швидкість сполучення, заповнення салону, пасажиропотік на кожній зупинці. На основі результатів побудовано діаграму пасажирообороту (рис. 1), що дозволила визначити ділянки максимального навантаження та потенційні резерви оптимізації.



а



б

Рисунок 1 – Діаграма пасажирообороту у прямому (а)
і зворотному (б) напрямку (ранок і вечір)

Підсумовуючи проведені натурні дослідження бачимо закономірність по періодах. Для ранкового періоду характерна більша кількість пасажирів, які використовують транспорт, через те, що більшість населення використовує громадський транспорт для добирання до місць праці, навчання і саме у цьому випадку дуже важливим фактором є час, тому вибір падає на перший маршрут, який курсує у потрібному напрямку. А щодо вечірнього періоду то час стає не таким важливим, і вибір стоїть за комфортом, або розташуванням зупинкових пунктів відносно дому. Проте, все одно кількість користувачів громадського транспорту не кардинально менша ніж у ранковий період. Також аналізуючи натурі дослідження маршруту №51 можна дійти висновку, що кількість пасажирів, які пересуваються у зворотному напрямку як у ранковий, так і у вечірній період більша ніж у прямому напрямку. Коефіцієнт наповненості на маршруті завжди більший ніж 0,5. Це означає, що автобус завжди заповнено більше ніж на половину від місткості, яка вказана у технічних характеристиках. Також у деякі моменти досягає 1 і більше, тобто автобус переповнено, а саме на зупинках палац ім. Г. Хоткевича, пр. В. Чорновола, церква Св. Анни, Цирк, ТРЦ «Скриня», пл. Кропивницького.

Для оцінки ефективності роботи діючого рухомого складу застосовано стандартні методики транспортної експлуатації (коефіцієнт використання пробігу, коефіцієнт використання пасажиромісткості, середня технічна та експлуатаційна швидкість, собівартість перевезення одного пасажира). Показники обчислено на основі фактичних даних пробігу, тривалості рейсів, витрат пального та часу простоїв.

Сумарна потужність пасажиропотоку за рейс становитиме: для прямого напрямку $П_{пр}$=1293 пас.; для зворотного – $П_{зв}$=1742 пас. Виходячи з цих даних, для перевезення пасажирів на досліджуваному маршруті доцільно використовувати автобуси місткістю близько 70 пасажирів.

Результати використано для порівняння двох варіантів рухомого складу:

– наявні автобуси БАЗ А079, які є однією з найпопулярніших моделей автобусів у Львові;

– сучасні електроавтобуси SUNLONG SLK6121EV.

Для забезпечення досягнення мети проведено низку розрахункових і аналітичних процедур. Розрахунки проводилися за методиками [10, 11] для автобуса SUNLONG SLK6121EV, які показали, що при заміні на електроавтобус необхідна кількість засобів на маршруту зменшиться в порівнянні з автобусом меншої місткості.

Таблиця 1 – Результати розрахунку потрібної кількості автобусів на маршруті

Показник	***SUNLONG SLK6121EV***
Час на нульовий пробіг автобуса, год	0,19
Час роботи на маршруті, год	12,41
Час оберту, год	2,55
Кількість оборотів автобуса	4
Уточнення часу роботи автобуса на маршруті, год	12,41
Уточнення часу знаходження у наряді, год	12,6
Необхідна кількість автобусів	6
Інтервал руху автобусів, год	0,43
Інтенсивність руху автобусів од/год	2,3

Наведена нижче діаграма ілюструє фактичний графік руху однієї одиниці рухомого складу за один повний рейс (оборот), виконаний на маршруті. Графік побудовано в координатах «Час – Відстань» і дозволяє візуально оцінити технічну та експлуатаційну швидкість руху на окремих ділянках маршруту: помаранчева лінія відображає рух автобуса у прямому напрямку, чорна лінія відображає рух автобуса у зворотному напрямку (після виконання простою на кінцевому пункті).

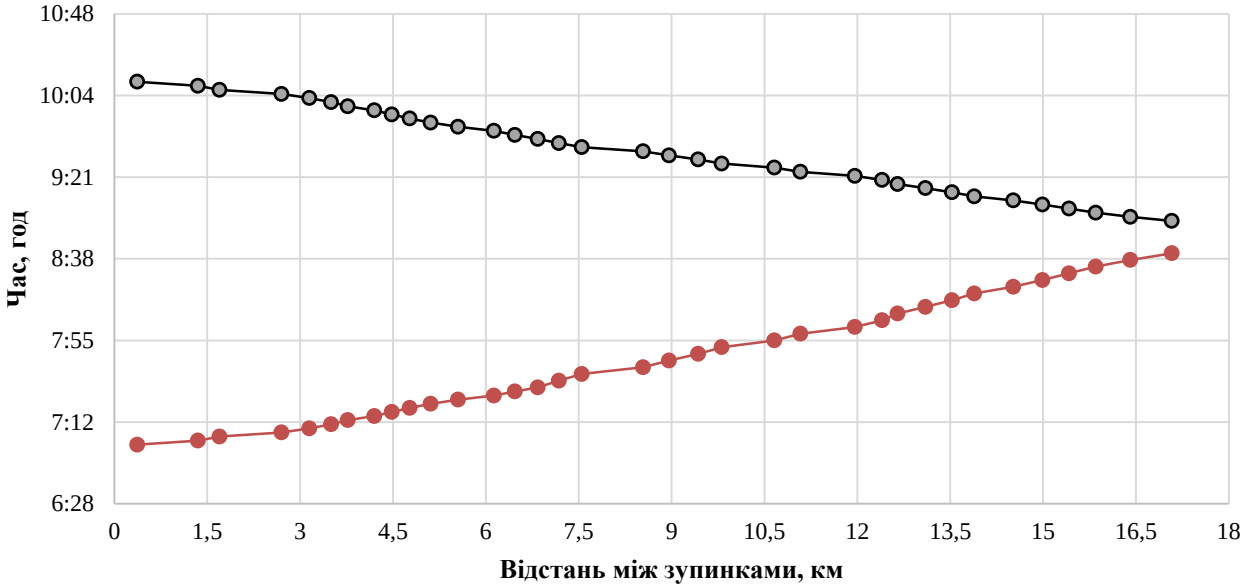


Рисунок 2 – Графік виконання одного обороту рухомого складу

Різноманітні фактори нерегулярності (рис. 3) постійно спричиняють відхилення від графіка. Ці відхилення призводять до порушення інтервалу руху, що викликає скупчення автобусів, збільшення часу очікування пасажирів на зупинках та, як наслідок, зниження рівня довіри до громадського транспорту.

Рисунок 3 – Відсотковий розподіл причин нерегулярності руху

Для того щоб скласти розклад руху автобусів на маршруті потрібно розрахувати пасажиропотік по кожній годині доби за формулою:

$$F_i = F_{max} \cdot k_{\text{нер}}, \quad (1)$$

де F_i – пасажиропотік у і-му періоді часу, пас.;

F_{max} – максимальна транспортна робота, пас.·км (F_{max} = 629,28 пас.·км);

$k_{нер}$ – коефіцієнт нерівномірності пасажиропотоку.

Пасажиропотоки на досліджуваному маршруті, по кожній годині доби, зображені на рис. 4.

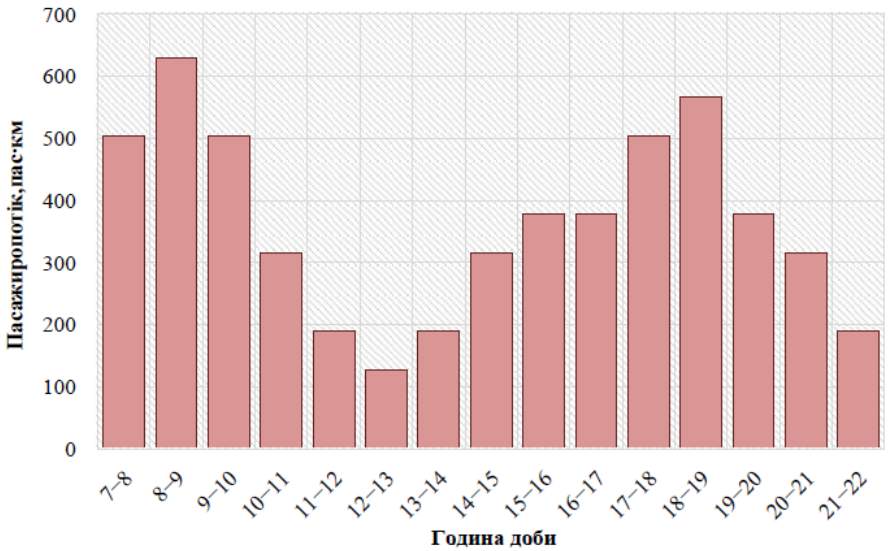


Рисунок 4 – Зміна пасажиропотоку по годинах доби

Розраховано кількість автобусів по кожній годині доби за формулою (2):

$$A_{i-j} = \frac{F_{\text{об}} \cdot t}{q_{\text{н}} \cdot \gamma_{\text{с}}}, \quad (2)$$

де A_{i-j} – кількість автобусів у і-му періоді, од.;

$t_{об}$ – час оберту, год. (2,55 год);

$q_н$ – пасажиромісткість автобуса, пас.;

$\gamma_с$ – статичний коефіцієнт використання пасажиромісткості автобуса (приймаємо $\gamma_с$=0,77).

Кількість автобусів по кожній годині доби зведено в табл. 2.
Максимальна кількість автобусів:

$$A_{max}=21\cdot0,88=18,5\approx 19\ од.$$

Мінімальну кількість автобусів на маршруті:

$$A^{min}=\ 2,55/0,55\approx 4\ од.$$

Таблиця 2 – Кількість автобусів по кожній годині доби

Година доби	***Значення***
7–8	17
8–9	21
9–10	17
10–11	11
11–12	6
12–13	4
13–14	6
14–15	11
15–16	13
16–17	13
17–18	17
18–19	19
19–20	13
20–21	11
21–22	6

На маршруті протягом кожної години його роботи не може курсувати менше ніж 4 і більше ніж 19 автобусів (рис. 5).

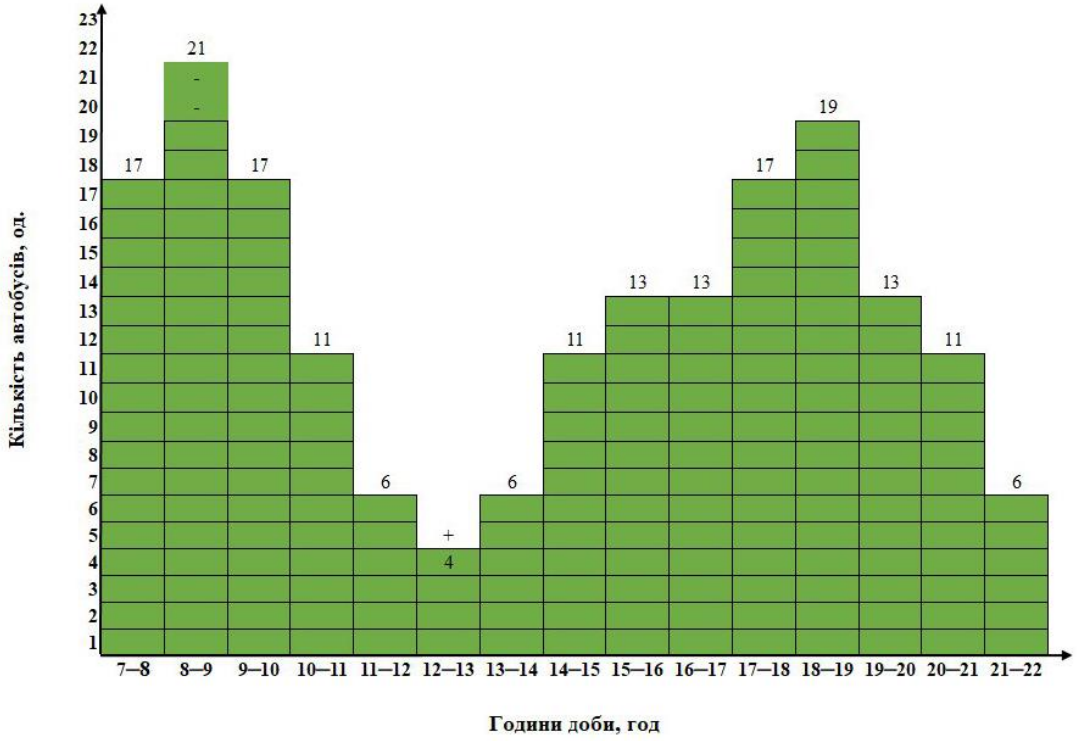


Рисунок 5 – Зміна кількості автобусів по годинах доби:
«+» – там, де потрібно збільшити кількість автобусів;
«-» – там, де потрібно зменшити кількість автобусів

Таблиця 3 – Результати розрахунків

Показник	*Значення*
Кількість годин за робочий день, авт·год	173
Кількість годин за вихідний день, авт·год	112
Кількість авто годин за рік, авт·год	59712
Кількість нульових пробігів	9340
Загальний нульовий пробіг, км	65380
Тривалість нульових пробігів, год	1873,35
Загальна к-сть авто годин за рік, авт·год	74883,35
Річний пробіг, км	123426
Загальний пробіг, км	1299647
Кількість автомобіле-днів,авт·дн	5670
Кількість автомобіле-днів на підприємстві, авт·дн	6670
Облікова кількість автобусів, од	18
Потрібний фонд робочого часу, год	63286
Фонд робочого часу одного водія, год	2000
Потрібна кількість водіїв	30

Розрахунок експлуатаційних витрат проводився за формулою (3):

$$C_{експ} = C_{ен} + C_{зарп} + C_{рем} + C_{амор} + C_{ін}, \quad (3)$$

де $C_{ен}$ – витрати на енергію (паливо/електроенергію);

$C_{зарп}$ – фонд заробітної плати водіїв;

$C_{рем}$ – технічне обслуговування;

$C_{амор}$ – амортизаційні відрахування;

$C_{ін}$ – інші витрати.

Розрахунок витрат з урахуванням вартості палива та технічного обслуговування без урахування заміни шин та заміни батареї раз на 6 років показав річну економію 27%.

Перехід міського автопарку з дизельних автобусів на електроавтобуси є не просто оновленням рухомого складу, а стратегічною трансформацією пасажирської транспортної галузі міста. Для успішного впровадження цієї зміни ключовим є технічне обґрунтування, яке має довести можливість безперебійної та ефективної інтеграції електробусів у наявну маршрутну мережу та операційну модель. Головним технічним викликом є забезпечення достатнього запасу ходу та оптимізація графіків зарядки. Обґрунтування вимагає моделювання, яке порівнює пробіг електробуса (наприклад, 250 км) з добовим пробігом за маршрутом (наприклад, 200–300 км) та визначає, чи необхідна проміжна дозарядка або достатньо лише нічної зарядки в депо.

Крім економії, є великі технічні плюси. Електричний двигун дуже простий: у ньому немає складних частин, які постійно потрібно змащувати, міняти фільтри чи ремонтувати. Немає коробки передач, немає складної системи вихлопу. Через це електроавтобуси рідше стоять у ремонті і частіше возять пасажирів. Вони також використовують "розумне" гальмування, коли енергія від уповільнення не втрачається дарма, а повертається назад у батарею. Це не тільки заощаджує електрику, але й допомагає довше служити гальмівним колодкам. Тож автобус не тільки менше ламається, але й потребує менше обслуговування.

Найбільшу користь від переходу отримують мешканці міста, адже це пряма турбота про наше здоров’я та комфорт. Дизельні автобуси викидають у повітря дим, кіптяву і багато шкідливих речовин. Електроавтобуси ж зовсім не мають вихлопу під час руху. Повітря стає чистішим, а дихати у місті – легше. Крім того, ці автобуси їдуть дуже тихо. Це означає

менше шуму на вулицях, особливо рано вранці та пізно ввечері, що робить життя біля доріг набагато комфортнішим.

Електроавтобуси є транспортом із нульовими місцевими викидами. Це означає, що під час руху вони не виділяють у повітря жодних шкідливих речовин: диму, сажі, оксидів азоту чи твердих частинок, які є основними забруднювачами, що спричиняють респіраторні та серцево-судинні захворювання у мешканців. На відміну від дизельних автобусів, які постійно забруднюють повітря в центрі міст і поблизу зупинок, електроавтобуси зберігають повітря чистим там, де живуть і працюють люди.

Іншим важливим екологічним фактором є зниження шумового забруднення. Дизельний автобус є основним джерелом шуму: його показники сягають 85–90 дБ при розгоні або русі на низькій швидкості, а також під час очікування на зупинці (близько 68 дБ), оскільки основний шум створює двигун внутрішнього згоряння, що працює. Натомість електроавтобус демонструє значно менші показники, генеруючи шум на рівні 55–60 дБ під час руху у потоці. Ця різниця, що становить 15–30 дБ, є критичною, оскільки зниження шуму на 10 дБ людським вухом сприймається як зменшення гучності вдвічі. Таким чином, перехід на електроавтобуси забезпечує значне покращення акустичного комфорту в міському середовищі, що є важливою соціальною та екологічною перевагою.

Таким чином, перехід на електроавтобуси дозволяє транспортному підприємству зробити прямий внесок у виконання екологічних цілей міста. Це не просто "зелена" ініціатива, а прагматичний крок для виведення забруднення з міських доріг. З огляду на те що на транспорт припадає помітна частка загальних викидів, модернізація автопарку електротягою стає однією з найефективніших інвестицій у стійкий розвиток та підвищення якості життя.

Економічний розрахунок показав різницю у витратах на закупівлю автобусів двох марок, яка становить 15676200 грн. Цю суму потрібно додатково інвестувати для впровадження нових ТЗ на транспортному підприємстві.

Варто зауважити, що потрібні додаткові кошти для створення власної інфраструктури, а саме власної зарядної станції для 3–4 автобусів. Вартість однієї одиниці становить 210439 грн. Зараз в Україні багато станцій у вільному доступі. Ціна на швидкі зарядки для електромобілів у Львові зазвичай становить 16…18 грн / (кВт·год).

Висновки. У результаті проведеного дослідження визначено фактичну нерівномірність пасажиропотоку на маршруті №51, розраховано техніко-експлуатаційні показники автобусів БАЗ А079 і електроавтобусів SUNLONG SLK6121EV, розроблено оптимальний графік руху електроавтобусів, який забезпечує повне перевезення пасажирів без зниження якості обслуговування, скорочено собівартість перевезення одного пасажиро-кілометра з 3,85 грн до 2,75 грн, доведено економічну доцільність переходу на електротранспорт шляхом зменшення експлуатаційних витрат приблизно на 25–30%, розраховано скорочення викидів шкідливих речовин на 100% для CO_2 і на понад 80% для оксидів азоту. Отримані результати підтверджують, що використання електроавтобусів забезпечує сталий розвиток міського транспорту й відповідає європейським тенденціям «зеленого переходу» в мобільності. Отримані результати можуть бути використані підприємством ТОВ «Успіх БМ» при плануванні оновлення рухомого складу та оптимізації маршрутної мережі. Запропоновані підходи можуть бути адаптовані для інших міських автобусних маршрутів Львова та інших міст України. Матеріали роботи можуть бути використані у навчальному процесі під час викладання дисциплін «Організація пасажирських перевезень» та «Транспортна логістика».

Напрямки подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію зарядної інфраструктури для електроавтобусів у міських умовах, розроблення моделей адаптивного розкладу руху із застосуванням систем GPS-моніторингу та штучного інтелекту, оцінку впливу впровадження електротранспорту на загальну транспортну екосистему міста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Войтович О. А., Кузьменко І. О., Луб'яний П. В. Доступність пасажирського транспорту для населення з огляду формування тарифу / *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2023. № 1–2 (26–27). С. 107–120. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.107-118.

2. Войтович О. А., Луб'яний П. В., Мосьпан В. М., Кузьменко І. О. Модель розрахунку вибору способу пересування за критерієм доступності / *Науковий вісник Херсонської державної морської академії.* 2024. № 2 (29). С. 178–186. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.178-186.

3. Проценко В. О. Перспективи удосконалення пасажирського сполучення в місті Херсоні застосуванням тролейбусів з автономним ходом / В. О. Проценко // *Вісник Херсонського національного технічного університету.* Одеса: Видавничий дім «Гельветіка». 2025. С. 191–201. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.26

4. Ghotge R., van Rooij D., van Breukelen S. Total Cost of Ownership of Electric Buses in Europe. *World Electric Vehicle Journal.* 2025. Vol. 16, No. 8. Article 464. https://doi.org/10.3390/wevj16080464.

5. Ahmadi P., Raeesi M., Changizian S., Teimouri A., Khoshnevisan A. Lifecycle assessment of diesel, diesel-electric and hydrogen fuel cell transit buses with fuel cell degradation and battery aging using machine learning techniques. *Energy.* 2022. Vol. 259. Article 125003. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125003.

6. Naeimian B., Mohseni G., Barzegari V., Nourinejad M., Park P. Y. Public transportation fleet electrification and charger schedule optimization using a decomposition heuristic. *Energy.* 2025. Vol. 333. Article 137135. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137135.

7. Dabčević Z., Deur J. Interactive Optimization of Electric Bus Scheduling and Overnight Charging. *Energies.* 2025. Vol. 18, No. 16. Article 4440. https://doi.org/10.3390/en18164440.

8. Zhang M., Yang M., Li Y., Huang S. Optimization of Electric Bus Scheduling Considering Charging Station Resource Constraints. *Transportation Research Part D: Transport and Environment.* 2024. Режим доступу: https://www.worldtransitresearch.info/research/10631/.

9. Rogge M., van der Hurk E., Larsen A., Sauer D. U. Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy.* 2018. Vol. 211. P. 282–295. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.051.

10. Tang C., Li X., Ceder A. (Avi), Wang X. Public Transport Fleet Replacement Optimization Using Multi-Type Battery-Powered Electric Buses. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board.* 2021. Vol. 2675(12). P. 1422–1431. https://doi.org/10.1177/03611981211027157.

11. Burdzik R., Chema W., Celiński I. A study on passenger flow model and simulation in aspect of COVID-19 spreading on public transport bus stops. *Journal of Public Transportation.* 2023. Vol. 25. Article 100063. https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2023.100063.

12. Xian L., Tian L. Passenger flow prediction and management method of urban public transport based on SDAE model and improved Bi-LSTM neural network. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems: Applications in Engineering and Technology.* 2023. Vol. 45(6). P. 10563–10577. https://doi.org/https://doi.org/10.3233/JIFS-232979.

13. Subbiah S. S., Paramasivan S. K., Arockiasamy K., Senthivel S., Thangavel M. Deep Learning for Wind Speed Forecasting Using Bi-LSTM with Selected Features. *Intelligent Automation & Soft Computing.* 2023. Vol. 35(3). P. 3829–3844. https://doi.org/10.32604/iasc.2023.030480.

14. Ritari A., Vepsäläinen J., Kivekäs K., Tammi K., Laitinen H. Energy Consumption and Lifecycle Cost Analysis of Electric City Buses with Multispeed Gearboxes. *Energies.* 2020. Vol. 13(8). Article 2117. https://doi.org/10.3390/en13082117.

15. Lytvyn V., Bublyk M., Vysotska V., Matseliukh Y. Visual simulation technology for passenger flows in the public transport field at smart city. *Radio Electronics, Computer Science, Control.* 2022. No. 4. P. 106–121. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10.

16. Загорянський В. Г. Застосування статистичних методів наукових досліджень при обстеженні пасажиропотоків міського автомобільного транспорту. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.* Кропивницький : ЦНТУ, 2022. Вип. 6(37). Ч. 2. С. 82–89. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.82-89.

17. Vision Zero Ukraine. Режим доступу: https://visionzero.org.ua/.

18. Закон України «Про автомобільний транспорт» // Відомості Верховної Ради України. 2001. № 22. Ст. 105.

19. Положення про робочий час і час відпочинку водіїв колісних транспортних засобів: затв. наказом Міністерства транспорту та зв'язку України від 07.06.2010 р. № 340 // Офіційний вісник України. 2010. № 48. С. 40.

REFERENCES

1. Voityovych, O. A., Kuzmenko, I. O., & Lubianyi, P. V. (2023). Dostupnist pasazhyrskoho transportu dlia naselennia z ohliadu formuvannia taryfu [Accessibility of passenger transport for the population in terms of tariff formation]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoii akademii*, (1–2/26–27), 107–120. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.107-118.

2. Voityovych, O. A., Lubianyi, P. V., Mospan, V. M., & Kuzmenko, I. O. (2024). Model rozrakhunku vyboru sposobu peresuvannia za kryteriiem dostupnosti [Model for calculating the choice of mode of movement according to the criterion of accessibility]. *Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoii akademii*, (2/29), 178–186. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.178-186.

3. Protsenko, V. O. (2025). Perspektyvy udoskonalennia pasazhyrskoho spoluchennia v misti Khersoni zastosuvanniam troleibusiv z avtonomnym khodom [Prospects for improving passenger communication in the city of Kherson by using trolleybuses with autonomous running]. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 191–201. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.26.

4. Ghotge, R., van Rooij, D., & van Breukelen, S. (2025). Total cost of ownership of electric buses in Europe. *World Electric Vehicle Journal*, 16(8), Article 464. https://doi.org/10.3390/wevj16080464.

5. Ahmadi, P., Raeesi, M., Changizian, S., Teimouri, A., & Khoshnevisan, A. (2022). Lifecycle assessment of diesel, diesel-electric and hydrogen fuel cell transit buses with fuel cell degradation and battery aging using machine learning techniques. *Energy*, 259, Article 125003. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125003.

6. Naeimian, B., Mohseni, G., Barzegari, V., Nourinejad, M., & Park, P. Y. (2025). Public transportation fleet electrification and charger schedule optimization using a decomposition heuristic. *Energy*, 333, Article 137135. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.137135.

7. Dabčević, Z., & Deur, J. (2025). Interactive optimization of electric bus scheduling and overnight charging. *Energies*, 18(16), Article 4440. https://doi.org/10.3390/en18164440.

8. Zhang, M., Yang, M., Li, Y., & Huang, S. (2024). Optimization of electric bus scheduling considering charging station resource constraints. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. https://www.worldtransitresearch.info/research/10631/.

9. Rogge, M., van der Hurk, E., Larsen, A., & Sauer, D. U. (2018). Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure. *Applied Energy*, 211, 282–295. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.051.

10. Tang, C., Li, X., Ceder, A. (Avi), & Wang, X. (2021). Public transport fleet replacement optimization using multi-type battery-powered electric buses. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2675(12), 1422–1431. https://doi.org/10.1177/03611981211027157.

11. Burdzik, R., Chema, W., & Celiński, I. (2023). A study on passenger flow model and simulation in aspect of COVID-19 spreading on public transport bus stops. *Journal of Public Transportation*, 25, Article 100063. https://doi.org/10.1016/j.jpubtr.2023.100063.

12. Xian, L., & Tian, L. (2023). Passenger flow prediction and management method of urban public transport based on SDAE model and improved Bi-LSTM neural network. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 45(6), 10563–10577. https://doi.org/10.3233/JIFS-232979.

13. Subbiah, S. S., Paramasivan, S. K., Arockiasamy, K., Senthivel, S., & Thangavel, M. (2023). Deep learning for wind speed forecasting using Bi-LSTM with selected features. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 35(3), 3829–3844. https://doi.org/10.32604/iasc.2023.030480.

14. Ritari, A., Vepsäläinen, J., Kivekäs, K., Tammi, K., & Laitinen, H. (2020). Energy consumption and lifecycle cost analysis of electric city buses with multispeed gearboxes. *Energies*, 13(8), Article 2117. https://doi.org/10.3390/en13082117.

15. Lytvyn, V., Bublyk, M., Vysotska, V., & Matseliukh, Y. (2022). Visual simulation technology for passenger flows in the public transport field at smart city. *Radio Electronics, Computer Science, Control*, (4), 106–121. https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-4-10.

16. Zahorianskyi, V. H. (2022). Zastosuvannia statystychnykh metodiv naukovykh doslidzhen pru obstezhenni pasazhyropotokiv miskoho avtomobilnoho transportu [Application of statistical methods of scientific research in the survey of passenger flows of urban road transport]. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky*, 6(37), Part 2, 82–89. https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.6(37).2.82-89.

17. Vision Zero Ukraine. (n.d.). Retrieved November 17, 2025, from https://visionzero.org.ua/.

18. Zakon Ukrainy "Pro avtomobilnyi transport" [Law of Ukraine "On Road Transport"], Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, № 22, st. 105 (2001).

19. Polozhennia pro robochyi chas i chas vidpochynku vodiyiv kolisnykh transportnykh zasobiv [Regulation on working hours and rest time of drivers of wheeled vehicles], zatverdzhene nakazom Ministerstva transportu ta zviazku Ukrainy vid 07.06.2010 № 340, Ofitsiinyi visnyk Ukrainy, № 48, st. 40 (2010).

Voitovych O. A., Lubyany P. V., Martynyk V. S. IMPROVING THE PROCESS OF URBAN PASSENGER TRANSPORTATION THROUGH JUSTIFYING THE TRANSITION TO ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MODES OF TRANSPORT (ELECTRIC BUSES)

This article examines the improvement of urban passenger transportation efficiency through the justified transition to environmentally friendly modes of transport, with a particular focus on battery-electric buses. The research addresses key challenges faced by Ukrainian cities, including outdated and energy-inefficient bus fleets, fluctuating and growing passenger flows, rising fuel and maintenance costs, and the urgent need to reduce harmful emissions and modernize public transport systems in line with European sustainability directives. The methodological framework combines field observations, detailed analysis of hourly passenger flows, technical and operational performance assessment, modelling of route schedules, and economic comparison between conventional diesel buses and modern electric buses. Using Lviv's Route No. 51 as a case study, the research identifies significant irregularities in demand throughout the day, determines the optimal number of vehicles required in each time interval, and proposes an improved schedule specifically tailored to electric bus capabilities and charging requirements. The comparative analysis demonstrates that replacing BAZ A079 buses with SUNLONG SLK6121EV electric buses can reduce operating costs by 25–30%, fully eliminate local CO_2 emissions, and substantially decrease noise pollution in densely populated urban areas. Additionally, the study highlights long-term advantages such as simplified maintenance, regenerative braking efficiency, improved passenger comfort, and increased operational reliability. The proposed transition model offers a scientifically grounded decision-making tool for transport operators and municipal authorities, supporting strategic fleet renewal, infrastructure development, and broader sustainable mobility initiatives aimed at enhancing the overall quality of urban transport services.

Key words: *electric buses; passenger flow; urban transport; operational performance; sustainable mobility; route optimization.*

© Войтович О. А., Луб'яний П. В., Мартиник В. С.

Статтю прийнято до редакції 17.11.2025

УДК 656.61

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ РІВНЯ ВТОМИ ШТУРМАНА – PREDICTIVE FATIGUE INDEX

Петровський А. В., *к.т.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: andreyanybody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3337-9577.*

У роботі розглядаються проблеми оцінки людського фактора у судноводінні з особливим акцентом на втомі та когнітивному навантаженні судноводія під час роботи з ECDIS. Проведено аналіз сучасних підходів і математичних моделей із визначенням їх переваг і недоліків щодо прогнозування помилок оператора. Запропоновано модель інтегрального показника: PFI (Psychophysical Fatigue Index) для кількісної оцінки фізіологічної втоми з урахуванням когнітивного навантаження від фізіологічних, операційних і контекстних факторів. Модель передбачає динамічне корегування вагових коефіцієнтів на основі машинного навчання та інтегрує контекстні параметри, такі як: погода, трафік і час доби. Модель працює у двох режимах: операційному та стаціонарному. Показано можливість інтеграції моделі у навігаційні системи та тренажери для раннього виявлення підвищеної втоми та перевантаження. Запропонована модель дозволяє підвищити точність прогнозування ризику помилок, оптимізувати планування вахт і сприяти підвищенню безпеки морських навігаційних операцій. Надано порівняльний аналіз можливостей існуючих моделей та запропонованої. Розглянуті перспективи подальших досліджень, що включають адаптивну індивідуалізацію моделей і інтеграцію багатовимірних даних для комплексної оцінки стану судноводія.

Ключові слова: *ECDIS; людський фактор; людська втома; Predictive Fatigue Index; Exponential Moving Average.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.199-208

Вступ. Все більш розвинуті системи автоматизації керування / навігації для судноводіїв надають не тільки безпеку судноплавства, але й вимоги до ступеня професійної освіти для їх коректного використання. Останні дослідження випадків аварій на морі з 2015–2025 роки [1] свідчать про шалений відсоток людського фактора як причину таких подій (рис. 1).

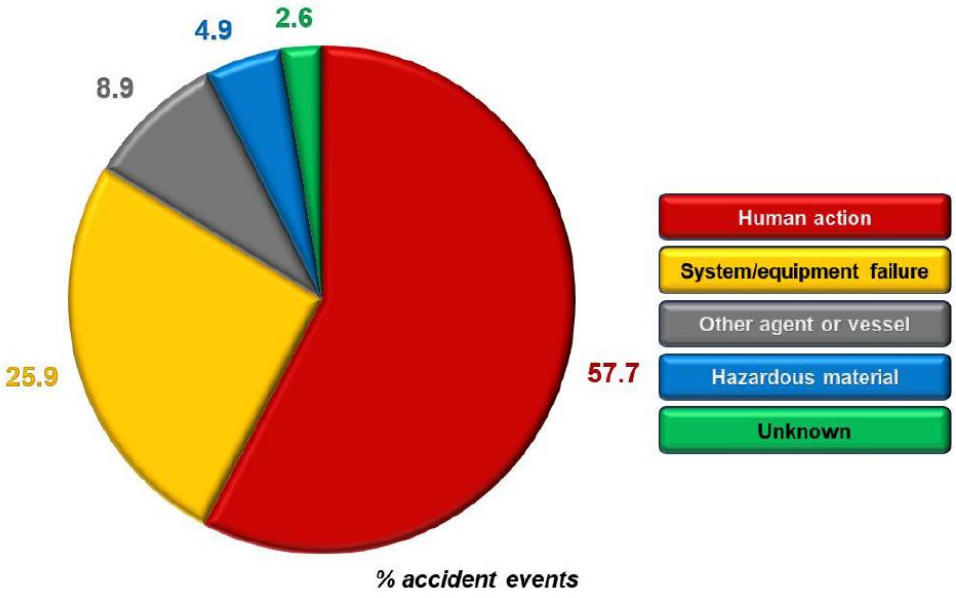


Рисунок 1 – Відсоток інцидентів, упорядкований за типами аварій суден [1, Figure 2.7-1]

Достатньо велика кількість дослідників використовує різні моделі врахування людського фактора саме при керуванні судном, але прийняття рішення судноводієм повинно базуватися ще й на оцінці навігаційної обстановки, яка повністю відображається на екрані ECDIS. ECDIS є навігаційною частиною системи управління рухом судна, оскільки це інтегрована навігаційна система, яка включає векторні карти, AIS, радар, GPS та інші

пристрої / датчики, карти прогнозу погоди у векторному форматі, інформацію про глибину та небезпеки. Судноводій постійно приймає рішення на основі інформації у тому числі з ECDIS. Вона є інтерфейсом, через який проявляються помилки штурмана, наприклад, неправильна інтерпретація інформації або несвоєчасне реагування на повідомлення ECDIS. Тому можна сказати, що моделі поведінки судноводія та людський фактор (у тому числі і втома, вплив стресу, недостатність досвіду) прямо впливають на ефективність використання ECDIS.

Постановка задачі. Етапи, на яких можливе використання моделей врахування людського фактора при роботі з ECDIS:

1. Отримання інформації з ECDIS. Штурман отримує дані про маршрут, глибини, небезпечні об'єкти, AIS / ARPA-помітки, тривоги / попередження / застереження. Можлива присутність: навантаження на увагу, когнітивні обмеження, стрес, втома. За допомогою біодатчиків є можливість зробити оцінку стану людини.

2. Обробка та інтерпретація інформації. Судноводій оцінює ситуацію і визначає ризики, обирає маневр або зміну маршруту. Суть прояву людського фактора – можуть існувати: помилки оцінки ситуації, пропуск повідомлень від ECDIS, неправильна інтерпретація повідомлень. На допомогу можуть прийти експертні системи.

3. Прийняття рішення. На основі аналізу інформації оператор обирає конкретну дію: коригування курсу, швидкості, зміна маршруту, сигналізація екіпажу, ін. Моделі «випередження / прогнозування» і машинного навчання (ML) можуть прогнозувати ймовірність правильного або ризикового рішення на основі попередніх дій.

4. Виконання дії через ECDIS або керування судном. Дія оператора реєструється: зміни маршруту, підтвердження повідомлень, налаштування автоматичних систем. Система ECDIS здійснює запис у LogBook в автоматичному режимі поточних даних інтегрованих джерел отримання інформації, які потім можна використати для аналізу.

5. Моніторинг та зворотній зв'язок. ECDIS (і додаткові системи безпеки) може генерувати тривоги, якщо присутні ризики розходження або навігаційні ризики. Моделі дозволяють оцінити людський фактор, як штурман реагує на повідомлення: швидко, повільно, неправильно.

6. Аналіз та вдосконалення. Лог-записи ECDIS та поведінкові дані штурмана можуть бути використані для навчання екіпажу на тренажерах, вдосконалення інтерфейсу ECDIS, побудови адаптивних систем попередження.

Математичні моделі / ML / ШІ підходи в принципі можуть: аналізувати лог-записи в ECDIS, виявляти типові помилки чи "зони ризику" (наприклад, часті пропуски повідомлень, непроореблені маршрути переходів), пропонувати адаптивні рекомендації чи попередження на основі поведінки конкретного оператора.

Таблиця 1 – Приклади інтеграції

Модель / Підхід	***Зв'язок з ECDIS***
Формальні *p*-адичні моделі реакцій	Аналіз реакцій оператора на виникаючі повідомлення, зміни маршруту, небезпечні об'єкти
ML / Data Mining	Прогнозування помилок при плануванні маршруту, ідентифікація повторюваних патернів поведінки
Психофізіологічні сенсори	Відстеження уваги та когнітивного навантаження під час роботи на ECDIS
HMI (human–machine interaction) / Ergonomic Research	Вдосконалення інтерфейсу ECDIS, розташування інформації та сигналів
Human Error / HFACS (Human Factors Analysis and Classification System)	Класифікація типів помилок при використанні ECDIS, що привели до аварій

Всі моделі ідентифікації поведінки оператора можна напряму застосувати до аналізу дій на ECDIS:

1. формальні + симуляційні моделі → прогноз реакцій;
2. ML → аналіз логів ECDIS, виявлення ризиків;
3. психофізіологічні → оцінка навантаження та уваги;
4. організаційні / HMI → оптимізація інтерфейсу, запобігання втоми від тривог (alarm fatigue).

Таким чином, дослідження людського фактора не повинно обмежуватися маневруванням судна, а подовжуватися й на навігацію з метою безпечної експлуатації ECDIS.

Останні дослідження даного напряму суттєво просунулися в аналізі статистики використання зв'язки штурман-ECDIS. Автори [2] аналізують, чому втома моряків залишається значущою причиною морських аварій, попри розвиток технологій, автоматизацію та нормативні вимоги. Тобто навіть з сучасними системами (такими як ECDIS) втома залишається ризиком. Серед категорій людського фактора [3] існує «персональна особливість» (що може включати втому, вживання алкоголю), яка часто призводить до летальних випадків або серйозних аварій, яка показує – втома є однією з ключових передумов у серії реальних інцидентів. Дослідження [4] аналізують ймовірності помилок при використанні ECDIS і ризики, що виникають через недостатню підготовку / звикання користувачів. Це найконкретніші дослідження, які пов'язують ECDIS-відмову / неправильне використання з людською помилкою. Стаття [5] звертає увагу на те, що ECDIS – «соціо-технічна» система, і людська помилка (включно з неправильними діями оператора) має бути врахована при оцінці ризиків.

Тобто, людський фактор + ECDIS ведуть до значущих ризиків, які вимагають врахування. Дослідження [6] показали, як фізіологічні / психологічні фактори (втома, стрес) впливають на безпеку при навігації. Тому, якщо ECDIS є частиною містка, втома штурмана підвищує ризик, що інформація буде неправильно оброблена, попередження проігноровані тощо. У роботі [7] вказані передумови такі як «loss of situation awareness» і «attention deficit», що часто є проявами втоми або перевтоми, особливо під час довгих вахт, нічних чергувань тощо. Це дає обґрунтування, що втома – не лише теоретичний ризик, а реальний фактор виникнення проблем, тобто у наявності послідовність: втома → людська помилка → ECDIS / навігаційні помилки. Публікації показують, що втома / людська помилка / «персональна особливість» – не просто теоретичні загрози: вони реально фігурують у сучасних статистиках інцидентів і аварій. Найсучасніші роботи, які досліджують ECDIS помилки (як от Bayes – моделювання у 2024 році, SLIM – аналіз у 2022 році) – показують, що експлуатація ECDIS є ризикованою, якщо не враховувати людський чинник. У висновках [8] – втома / передумови (особиста готовність, втома, організаційні умови) часто виступають як приховані фактори, які через ряд подій / помилок призводять до аварії (наприклад, посадки на мілину). Дослідження демонструють, як втома може бути «прихованим» чинником – не безпосередньою дією, але прихованою умовою, що підвищує ризики та створює передумови для помилок. Навіть при наявності звітів часто немає достатньо даних, щоб сформулювати універсальну модель «human-operator + ECDIS + fatigue», Тому моделі «human factor + fatigue» варто інтегрувати в аналіз даних ECDIS / навігаційної безпеки як «когнітивні / психофізіологічні + people in the loop (люди у циклі управління)».

Актуальність досліджень. Сучасні підходи до моделювання впливу людського фактора можна розподілити на окремі напрямки: психосоціальні та організаційні підходи, формальні або алгоритмічні моделі поведінки штурмана, Data-driven або ML-підходи, командні або ергатичні системи та взаємодія людини і техніки, емпіричні дослідження або аналіз аварій та людські помилки. У дослідженнях [9] запропоновано систему ідентифікації негативних проявів «людської помилки» навігатора через поняття «суб'єктивної ентропії». Розглядаються первинні та вторинні фактори, що можуть призводити до підвищення ентропії (тобто до підвищеної ймовірності помилки). Однак, у наявності складність точного

вимірювання «суб'єктивної ентропії», ймовірна залежність від контексту – конкретного екіпажу / судна / умов; можлива низька універсальність. У статті [10] надано формально-алгоритмічний підхід із перетворенням простору ознак дій оператора у логіко-геометричний простір *p*-адичних систем; на основі даних симулятора (дії, логи, відео) ідентифікуються реакції оператора в екстремальних навігаційних ситуаціях. Недоліками є: абстрактність *p*-адичного підходу, залежність від сценаріїв симулятора і невизначеність, наскільки такі моделі адекватні реальним умовам. Дослідження [11] показують використання біометричних / психофізіологічних сенсорів для вимірювання когнітивного навантаження вахтового офіцера під час маневрів (наприклад, уникання зіткнення) у симуляторах. Вимірюються біометричні параметри, аналізуються пікові реакції під навантаженням. Однак, результати залежать від налаштувань симулятора, типу завдання, типу сенсорів; складно перенести на реальні судна; сенсори можуть бути інвазивними або заважати роботі. Фундаментальною оглядовою роботою є [12], що систематизує психолого-соціальні та організаційні аспекти людського фактора в морській безпеці. Пропонується поділ на три рівні: (1) – індивідуальні (когнітивні) чинники, (2) – соціальні / міжособистісні, (3) – системні / організаційні (латентні помилки). У наявності опис теоретичної, концептуальної основи; допомагає розуміти, чому прості "технічні" моделі – недостатні; що є важливим для інтеграції психосоціальних аспектів у математичні / формальні моделі. Однак, це не математична модель, а оглядова і теоретична, яка потребує подальшої конкретизації, не дає алгоритмів, не гарантує формалізації. У [13] запропоновано гібридну методику, яка використовує психофізіологічні дані, наприклад, гемодинамічні зміни разом з машинним навчанням, щоб об'єктивно оцінити ефективність роботи штурмана. У методиці є розподіл моряків за кваліфікацією, але вона потребує спеціального обладнання (біосенсорів), є складності з організацією експериментів, також можлива чутливість до типу задач, навантажень і контексту. Тобто у наявності потреба у гібридних моделях, які б поєднували формальну / алгоритмічну частину + психофізіологічні дані + контекст (тип судна, команда, умови).

Метою дослідження є визначення ролі когнітивних факторів, зокрема втоми, у виникненні морських інцидентів, а також створити та оцінити ефективність моделі інтегрального показника когнітивного навантаження (PFI) для підвищення безпеки судноводіння. **Об'єктом дослідження** є процес навігаційного управління судном в умовах впливу людського фактора. **Задачею дослідження** є розробка формалізованої динамічної моделі, яка прогнозує рівень втоми судноводія на майбутній проміжок часу, враховуючи: поточний стан втоми, фізіологічні параметри (сон, час чергування), когнітивне навантаження на навігаційному містку (через ECDIS), операційні умови (погода, трафік, нічні години), історичні дані оператора та ML-корекцію. **Методи дослідження:** порівняльний аналіз, математичне моделювання, елементи машинного навчання (ML), методи теорії прийняття рішень.

Основна частина. На базі класичної моделі комбінаторної інтеграції в зважених компонентів людського фактора пропонується динамічна модель врахування втоми від ECDIS (Predictive Fatigue Index, PFI), яка базується на трьох головних компонентах:

– фізіологічний стан (F), наприклад: сон, біоритми, тривалість чергування;

– когнітивне навантаження (C), наприклад: кількість одночасних задач, складність маршруту, активність ECDIS (повідомлення, кількість дій);

– операційний ризик (O), наприклад: погодні умови, трафік, небезпечні зони, час доби (нічні години).

Відомий інтегральний індекс (дослідження втоми з урахуванням ECDIS):

$$FI(t) = w_F F(t) + w_C C(t) + w_O O(t)\,, \qquad (1)$$

де $FI(t)$ – індекс втоми в момент часу t (0 - 1 або 0 - 100%);
$F(t)$ – фізіологічний стан (0 – повна свіжість, 1 – максимальна втома);
$C(t)$ – когнітивне навантаження (0 - 1);

$O(t)$ – операційний ризик (0 - 1).

$$F(t) = 1 - \frac{S(t)}{S_{opt}} e^{\alpha T_{awake}(t)}, \quad (2)$$

де $S(t)$ – час сну за останні 24 години (години);
S_{opt} – оптимальний час сну (наприклад, 8 годин);
$T_{awake}(t)$ – час безперервної активності (години);
α – коефіцієнт накопичення втоми [0.01;0.1], підбирається експериментально. Тобто, втома зростає при недосипанні та тривалому безперервному чергуванні.

$$C(t) = \beta_1(t)N_{tasks}(t)+\beta_2(t)N_{messages}(t) + \beta_3(t)N_{route_{handling}}(t), \quad (3)$$

де $N_{tasks}(t)$ – кількість одночасних задач (керування, зв'язок, моніторинг);
$N_{messages}(t)$ – кількість повідомлень ECDIS / RADAR / AIS & ARPA за одиницю часу;
$N_{route_handling}(t)$ – складність маршруту / маневрування (0 - 1);
$\beta_1(t) + \beta_2(t) + \beta_3(t) = 1$ – це функції вагових динамічних коефіцієнтів (залежні від контексту / втоми).

$$O(t) = \gamma_1 W(t)+\gamma_2 V_{traffic}(t) + \gamma_3 T_{night}(t), \quad (4)$$

де $W(t)$ – коефіцієнт складності погоди (0 - 1);
$V_{traffic}(t)$ – щільність руху суден (0 - 1);
$T_{night}(t)$ – часовий фактор (0 – день, 1 – ніч);
$\gamma_1+\gamma_2 + \gamma_3 = 1$ – це вагові коефіцієнти.

Модель дозволяє визначати порогові значення FI, наприклад:
$FI < 0.3 \rightarrow$ нормальна працездатність;
$0.3 \leq FI < 0.6 \rightarrow$ попередження (підвищена увага);
$0.6 \leq FI < 0.8 \rightarrow$ обмеження дій, автоматизація частини процесів;
$FI > 0.8 \rightarrow$ критичний рівень, рекомендується заміна вахтового офіцера / перерва (якщо два офіцери на вахті, можливий обмін функціями на деякий час).

Для інтеграції з ECDIS система може адаптувати кількість підказок, підсвічування, зменшувати активність екранів (декілька, якщо безпаперова технологія), щоб знизити когнітивне навантаження.

Для оцінки фізичного стану можна використовувати фізіологічні сенсори: інтеграція HRV, EEG, очні датчики для уточнення *F(t)*. Надалі використовується *ML*-підхід: збір історичних даних *FI(t)* і подій / інцидентів для навчання моделі та оптимізації вагових коефіцієнтів.

Для динамічного прогнозування рівня втоми на 1–3 години (Δt) модель PFI з урахуванням (1)–(4):

$$PFI(t_0 + \Delta t) = FI(t_0) + \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} (w_F F(t)+w_C C(t) + w_O O(t))\, dt + \varepsilon_{ML}(t), \quad (5)$$

де $\varepsilon_{ML}(t)$ – корекція на основі історичних даних оператора (*ML*-модель), що враховує індивідуальні патерни втоми, реакцій та помилок.

$$\varepsilon_{ML}(t) = \varphi(Navigator's_History; ECDIS_LogBook; Fatigue\ Outcomes) \quad (6)$$

Тобто $\varepsilon_{ML}(t) = \varphi(e_1, e_2, \dots, e_j,$ історія даних, контекст), де e_j – базова j-та складова похибки (фактор фізіологічних параметрів штурмана, навантаження на штурмана від ECDIS, погода тощо).

Функція φ може бути реалізована через регресійну модель, нейромережу або градієнтний бустинг, навчена на записах LogBook періодів вахти конкретного OOW: як швидко він втомлюється при певних навантаженнях ECDIS; як реагує на повідомлення

ECDIS; які помилки траплялися при різних рівнях *FI*. Тобто навіть два оператори з однаковим графіком чергувань матимуть індивідуальні *PFI*, що робить підхід адаптивним. Модель *PFI* дозволяє прогнозувати рівень втоми на горизонті Δt і видавати рекомендації до зміни вахт, ротації, автоматизації. Якщо значення *PFI* перевищує поріг PFI_{crit}, система може подати звуковий сигнал мастеру або запропонувати заміну / додаткового OOW навігаційного містка.

Для розрахування динамічних коефіцієнтів когнітивного навантаження $\beta_1(t), \beta_2(t), \beta_3(t)$ пропонується модель, яка поєднує доменні правила й об'єктивну оцінку важливості з даних і вміє динамічно підлаштовуватись під конкретне судно / штурмана. Для цього до (3) додається *I(t)* – ручне керування. Динамічні коефіцієнти $\beta_1(t), \beta_2(t), \beta_3(t)$ розраховуються як комбінація апріорних (експертних) ваг і data-driven важливостей, які у свою чергу, є нормалізованими. Адаптивні ваги залежать від контексту (ніч/день, погода, персона штурман-OOW) і відразу дають інтерпретовану розбивку внеску кожного показника у загальне навантаження.

У момент часу *t* маємо *m* показників $x_j(t)$, $j=1..m$. Для простоти в прикладі m=3, тоді $x_1 = N_{tasks},\ x_2 = N_{messages}, x_3 = N_{route_handling}$.

Навчимо коротку модель *M* (LightGBM / RandomForest / Logistic regression) на наборі навчальних даних, де ціль – індикатор «suboptimal performance / near-miss / operator error» або безпосередньо «перепад у показниках уваги».

Нехай I_j – відносна важливість *j*-ої ознаки у моделі *M*. Нормалізація: $\sum_{j=1}^{m} I_j = 1$.

Введемо контекстні множники $c_j(t)$ (наприклад: ніч/день, погода, трафік). Для кожної ознаки маємо функцію підлаштування $g_j(c_j(t)) \in (0; +\infty)$, яка збільшує вагу цієї ознаки у даному контексті. Наприклад, при ночі $g_{messages}(night) > 1$, бо сигнали частіше провокують стрес; при простому маршруті $g_{route_handling}(low_complex) > 1$.

Коефіцієнти, як комбінація експерта, даних і контексту, можна отримати через розрахунок початкової ваги для кожної ознаки *j:*

$$u_j^0(t) = \left(\mu e_j + (1-\mu) I_j\right) g_j\left(c_j(t)\right), \tag{7}$$

де $\mu \in [0; 1]$ – параметр, що контролює вагу експертної складової проти data-driven (на практиці μ можна ставити близько до 0.2–0.5 на старті, потім підлаштувати).

Нормалізація в підсумкові коефіцієнти:

$$\beta_j = \frac{u_j^0(t)}{\sum_{k=1}^{m} u_k^0(t)}. \tag{8}$$

Модель повинна працювати в двох режимах: операційному (протягом переходу) та стаціонарному (дослідження записів LogBook по вахтах). В операційному режимі: кожні τ хвилин збираються $x_j(t), c_j(t)$ і обчислюється $\beta_j(t)$; у стаціонарному (після завершення переходу) оновлюються I_j. Якщо накопичена достатня кількість сеансів, є можливість створити «тренування» і оновити параметри μ. Для стабільності можна застосувати Exponential Moving Average (EMA) для ваг:

$$\beta_j^{EMA}(t) = \rho \beta_j^{EMA}(t-\tau) + (1-\rho)\beta_j(t), \tag{9}$$

де при $\rho \approx 0.9$ буде збережено плавність змін.

Загальний алгоритм операційного використання:

1. Зібрати реальні дані фізіології, когнітивного навантаження та операційні фактори.
2. Нормалізувати та обчислити компонентні функції *FI*.
3. Використати *ML*-функцію $\varepsilon_{ML}(t)$ для індивідуальної корекції.
4. Обчислити *PFI(t+Δt)* для прогнозного горизонту.
5. Порівняти *PFI* з порогами і визначити заходи: попередження, часткова або повна автоматизація, ротація, виклик додаткового OOW на місток.

6. Повторювати цикл кожну годину / 30 хвилин, оновлюючи дані і прогноз.

Результати й аналіз використання. Індивідуалізація під конкретного судноводія забезпечується наявністю функції ε_{ML}, що дозволяє враховувати індивідуальні патерни втоми та реакцій на навантаження. Прогноз втоми можна робити динамічним на 1–3 години, інтегруючи фізіологію, когнітивні параметри, операційні фактори та індивідуальність штурмана, що дозволяє приймати превентивні рішення: адаптація до ECDIS, ротація вахтових / виклик додаткового OOW, часткова автоматизація. Якщо розглядати можливість використання не закритих систем ECDIS (програмно), то *PFI* не лише вимірює рівень втоми, а й дозволяє системі адаптувати систему ECDIS (налаштування яскравості екрана, видимість попереджень, підсвічування) відповідно до стану оператора.

Найбільші відмінності з існуючими моделями досягаються використанням саме динамічних коефіцієнтів (для прикладу у моделі показані для когнітивних параметрів) і поєднання: інтерфейс + навігація + фізіологія.

Таблиця 2 – Порівняння спроможностей моделей

Модель / Підхід	***Опис***	***Типові вхідні дані***	***Обмеження існуючих підходів***	***Можливості запропонованої моделі PFI***
HFACS	Класифікація помилок оператора по рівнях ієрархії	Аварійні звіти, людські помилки	Пост-фактум аналіз, не дає числової оцінки, не використовується у реальному часі	Модель надає математичний fatigue-rating у реальному часі, а не після аварії
SART / NASA-TLX	Суб'єктивна оцінка навантаження	Анкети, самооцінка	Не працюють під час вахти, неможливо автоматизувати без оператора	Збір даних навантаження автоматично через ECDIS logBook + біосенсори
SAFTE, Three-Process Model	Моделі накопичення втоми на основі сну та ритмів	Сон, циркадіанні цикли	Не враховують ситуаційне навантаження, стрес, когнітивні задачі	Додається фактор когнітивної ваги ECDIS-рішень
Markov / Bayesian Operator Error Models	Ймовірність помилки	Стани системи, помилки	Математичні, але не враховують психофізику людини	Вводиться фізіологія і адаптивне перенавчання
Machine-Learning Fatigue Detection (EEG/HRV)	Аналіз стану мозку / нервової системи	EEG, HRV, камери	Не інтегрується із профілем завдання оператора	Напряму пов'язується когнітивне навантаження із операціями в ECDIS

Теоретично можна порівняти загалом моделі за критеріями: реальний час, особистісна (персоніфікована) адаптація, врахування впливу ECDIS, застосування у навігації, прогноз аварійності.

Таблиця 3 – Загальне порівняння моделей

Критерій	***Існуючі моделі***	***Запропонована модель***
Реальний час	Здебільше offline та аналітика аварій	Безперервний обчислювальний показник + live-оцінка когнітивного навантаження
Особистісна адаптація	Відсутня або ручна	*ML*-адаптивний коефіцієнт + персоналізація + аналіз історичних даних LogBook
Врахування ECDIS-поведінки	Майже відсутнє	Частково (через навички і реакції) + повна інтеграція дій + повідомлення ECDIS
Застосування у навігації	Обмежене	Цільова модель під судноводія
Прогноз аварійності	Низький	Високий через 3-осьову оцінку

Висновки. Запропонована модель динамічного визначення рівня втоми *PFI* працює як єдиний комплекс, який в цілому є інтегрованою моделлю оцінки ризику людської помилки у навігації на рівні оператора ECDIS у реальному часі. Динаміка визначення коефіцієнтів когнітивного навантаження дозволяє попереджати / запобігати перевтомі OOW навігаційного містка, оптимальним чином, з точки зору безпеки, планувати розклад вахт, орієнтуючись саме на особистісні дані офіцерів навігаційного містка.

Перспективи подальших досліджень. З метою підвищення точності моделювання є сенс у подальших дослідженнях систем самонавчання, які коригують ваги факторів у реальному часі залежно від поведінки судноводія та змінних умов навігації. Також перспективними напрямками можуть стати: розробка точніших моделей контекстних коефіцієнтів для різних сценаріїв: ніч/день, погода, трафік, складність маршруту і дослідження взаємодії між контекстними та фізіологічними факторами для підвищення достовірності результатів моделювання. Надалі, можна розробити програмний модуль Crew-Assist, який може функціонувати як система контролю за рівнем втоми штурмана-OOW і надавати поради задля запобігання перевтоми.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Annual overview of marine casualties and incidents 2025 15th of July 2025 European Maritime Safety Agency, 2025. URL: https://www.emsa.europa.eu/publications/download/8329/5562/23.html.

2. Asanka Rajapakse, Gholam Reza Emad, Fatigue, an unsolved puzzle that continues contributing to accidents at sea, Marine Policy, Volume 155, 2023, 105745, ISSN 0308-597X, https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105745.

3. Maternová A., Materna M., Dávid A., Török A., Švábová L. Human Error Analysis and Fatality Prediction in Maritime Accidents. J. Mar. Sci. Eng. 2023,11, 2287. https://doi.org/10.3390/jmse11122287.

4. Vojkovi´c L., Bakota M., Kuzmani´c Skelin A. Using the Bayes Probability Model to Evaluate the Risk of Accidents Caused by the Electronic Chart Display and Information System *J. Mar. Sci. Eng.* 2024, *12*(8), 391; https://doi.org/10.3390/jmse12081391.

5. Gizem Kayisoglu, Pelin Bolat and Kimberly Tam. Evaluating SLIM-based human error probability for ECDIS cybersecurity in maritime. The Journal of Navigation (2022), 75:6 1364–1388, https://doi.org/10.1017/S0373463322000534.

6. Liu Yang, Luyao Li, Qing Liu, Yue Ma, Junsong Liao, Influence of physiological, psychological and environmental factors on passenger ship seafarer fatigue in real navigation environment, Safety Science, Volume 168, 2023, 106293, ISSN 0925–7535, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106293.

7. Christine Chauvin, Salim Lardjane, Gaël Morel, Jean-Pierre Clostermann, Benoît Langard, Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS, Accident Analysis & Prevention, Volume 59, 2013, Pages 26–37, ISSN 0001–4575, https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.006.

8. Laihao Ma, Xiaoxue Ma, Ting Wang, Liguang Chen, He Lan, On the development and measurement of human factors complex network for maritime accidents: A case of ship groundings, Ocean & Coastal Management, Volume 248, 2024, 106954, ISSN 0964–5691, https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106954.

9. Nosov P. S., Ben A. P., Matejchuk V. N., Safonov M. S. «IDENTIFICATION OF "HUMAN ERROR" NEGATIVE MANIFESTATION IN MARITIME TRANSPORT». Radio Electronics, Computer Science, Control, 2018 (№ 4). P. 204–213, https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-4-20.

10. Nosov P. S., Cherniavskyi V. V., Zinchenko S. M., Popovych I. S., Nahrybelnyi Ya. A., Nosova H. V. «IDENTIFICATION OF MARINE EMERGENCY RESPONSE OF ELECTRONIC

NAVIGATION OPERATOR». Radio Electronics, Computer Science, Control, 2021 (№ 1), P. 208–223, https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-1-20.

11. Žagar D., Svetina M., Košir A., Dimc F. «Human Factor in Navigation: Overview of Cognitive Load Measurement during Simulated Navigational Tasks». Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(10), 775, P. 1–11. https://doi.org/10.3390/jmse8100775.

12. Article «Human Factors and Maritime Safety» – Christine Chauvin. The Journal of Navigation, 2011, 64(4), 625–632 https://doi.org/10.1017/S0373463311000142.

13. Shiqi Fan, Zaili Yang, Towards objective human performance measurement for maritime safety: A new psychophysiological data-driven machine learning method, Reliability Engineering & System Safety, Volume 233, 2023, 109103, ISSN 0951–8320, https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109103.

14. Manuel Vázquez Neira, Genaro Cao Feijóo, Blanca Sánchez Fernández and José A. Orosa, Deep Learning for Visual Leading of Ships: AI for Human Factor Accident Prevention Appl. Sci. 2025, 15(15), 8261; https://doi.org/10.3390/app15158261.

15. Brit-Eli Danielsen, Margareta Lützhöft, Torgeir Kolstø Haavik, Stig Ole Johnsen, Thomas Porathe, "Seafarers should be navigating by the stars": barriers to usability in ship bridge design, Cognition Technology and Work, 2022, 24(4):1–17, P. 675–691, https://doi.org/10.1007/s10111-022-00700-8.

REFERENCES

1. Annual overview of marine casualties and incidents 2025 15th of July 2025 European Maritime Safety Agency.
URL: https://www.emsa.europa.eu/publications/download/8329/5562/23.html.

2. Asanka Rajapakse, Gholam Reza Emad (2023). Fatigue, an unsolved puzzle that continues contributing to accidents at sea, Marine Policy, Volume 155, 105745, ISSN 0308-597X, https://doi.org/10.1016/j.marpol.2023.105745.

3. Maternová, A., Materna, M., Dávid, A., Török, A., Švábová, L. (2023). Human Error Analysis and Fatality Prediction in Maritime Accidents. J. Mar. Sci. Eng., 11, 2287. https://doi.org/10.3390/jmse11122287.

4. Vojkovi´c, L., Bakota, M., Kuzmani´c Skelin, A. (2024). Using the Bayes Probability Model to Evaluate the Risk of Accidents Caused by the Electronic Chart Display and Information System *J. Mar. Sci. Eng.*, *12*(8), 391; https://doi.org/10.3390/jmse12081391.

5. Gizem Kayisoglu, Pelin Bolat and Kimberly Tam (2022). Evaluating SLIM-based human error probability for ECDIS cybersecurity in maritime. The Journal of Navigation, 75:6 1364–1388, doi:10.1017/S0373463322000534.

6. Liu Yang, Luyao Li, Qing Liu, Yue Ma, Junsong Liao (2023). Influence of physiological, psychological and environmental factors on passenger ship seafarer fatigue in real navigation environment, Safety Science, Volume 168, 106293, ISSN 0925–7535, https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106293.

7. Christine Chauvin, Salim Lardjane, Gaël Morel, Jean-Pierre Clostermann, Benoît Langard (2013). Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS, Accident Analysis & Prevention, Volume 59, Pages 26–37, ISSN 0001-4575, https://doi.org/10.1016/j.aap.2013.05.006.

8. Laihao Ma, Xiaoxue Ma, Ting Wang, Liguang Chen, He Lan (2024). On the development and measurement of human factors complex network for maritime accidents: A case of ship groundings, Ocean & Coastal Management, Volume 248, 106954, ISSN 0964-5691, https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106954.

9. Nosov, P. S., Ben, A. P., Matejchuk, V. N., Safonov, M. S. (2018). «IDENTIFICATION OF "HUMAN ERROR" NEGATIVE MANIFESTATION IN MARITIME TRANSPORT». Radio Electronics, Computer Science, Control, 2018 (№ 4). P. 204–213, https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-4-20.

10. Nosov, P. S., Cherniavskyi, V. V., Zinchenko, S. M., Popovych, I. S., Nahrybelnyi, Ya. A., Nosova, H. V. (2021). «IDENTIFICATION OF MARINE EMERGENCY RESPONSE OF ELECTRONIC NAVIGATION OPERATOR». Radio Electronics, Computer Science, Control, (№ 1), P. 208–223, https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-1-20.

11. Žagar, D., Svetina, M., Košir, A., Dimc, F. (2020). «Human Factor in Navigation: Overview of Cognitive Load Measurement during Simulated Navigational Tasks». Journal of Marine Science and Engineering, 8(10), 775, P. 1–11. https://doi.org/10.3390/jmse8100775.

12. Article «Human Factors and Maritime Safety» – Christine Chauvin. The Journal of Navigation, (2011), 64(4), 625–632 https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0373463311000142.

13. Shiqi Fan, Zaili Yang (2023). Towards objective human performance measurement for maritime safety: A new psychophysiological data-driven machine learning method, Reliability Engineering & System Safety, Volume 233, 109103, ISSN 0951-8320, https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109103.

14. Manuel Vázquez Neira, Genaro Cao Feijóo, Blanca Sánchez Fernández and José A. Orosa (2025). Deep Learning for Visual Leading of Ships: AI for Human Factor Accident Prevention Appl. Sci., 15(15), 8261; https://doi.org/10.3390/app15158261.

15. Brit-Eli Danielsen, Margareta Lützhöft, Torgeir Kolstø Haavik, Stig Ole Johnsen, Thomas Porathe (2022). "Seafarers should be navigating by the stars": barriers to usability in ship bridge design, Cognition Technology and Work, 24(4):1–17, P. 675–691, https://doi.org/10.1007/s10111-022-00700-8.

Petrovskyi A. DYNAMIC MODEL FOR CALCULATING NAVIGATOR FATIGUE LEVEL – PREDICTIVE FATIGUE INDEX

The research addresses the challenges of assessing the human factor in maritime navigation, with a particular focus on the fatigue and cognitive workload of ship navigators during the operation of Electronic Chart Display and Information Systems (ECDIS). The study provides a comprehensive review and critical analysis of current approaches and mathematical models, including NASA-TLX, SWAT, HFACS, and SAFTE, highlighting their strengths and limitations in predicting operator errors and identifying high-risk situations. A new integrative indicator is proposed: the Psychophysical Fatigue Index (PFI)**,** *which quantitatively assesses physiological fatigue while taking into account cognitive load arising from physiological, operational, and contextual factors. The model introduces dynamic adjustment of weighting coefficients using machine learning techniques, allowing for adaptive, individual-specific calibration. Contextual parameters such as weather conditions, traffic density, time of day, and complexity of the navigation route are integrated into the model to enhance predictive accuracy. PFI operates in two modes—operational and stationary—providing both real-time monitoring and baseline assessments of the navigator's state. In addition, the research presents a multidimensional metric that evaluates cognitive workload by integrating physiological signals, operational tasks, and contextual influences to provide a holistic assessment of navigator performance. The proposed models can be implemented in navigation bridge systems and training simulators for the early detection of elevated fatigue levels and cognitive overload, thereby contributing to risk reduction and improved maritime safety. A comparative analysis of existing models and the proposed integrative approach demonstrates improved accuracy in error risk prediction, optimized watch scheduling, and enhanced decision support. Prospects for future research include further development of adaptive machine learning algorithms for individualized assessments, integration of multidimensional real-time data, and validation through operational and simulator-based studies, aiming for a comprehensive evaluation of the navigator's physical and cognitive state under varying operational conditions.*

Key words: *ECDIS; human factor; human fatigue; Predictive Fatigue Index;* Exponential Moving Average.

© Петровський А. В.

Статтю прийнято до редакції 30.11.2025

УДК 004.942:656.61.052

ЗМІСТОВНА МОДЕЛЬ ЦИРКУЛЯЦІЇ ВЕЛИКОГО ВІТРИЛЬНОГО СУДНА, ЯКА ВКЛЮЧАЄ В СЕБЕ ПОВОРОТИ «ЧЕРЕЗ ФОРДЕВІНД» ТА «ОВЕРШТАГ»

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

Об'єктом дослідження є процес циркуляції великого вітрильного судна з прямим вітрильним оснащенням. Полюс повороту відіграє велику роль у процесі повороту судна. Поворот великого вітрильного судна відрізняється від повороту судна з механічним двигуном. Для судна з механічним двигуном поворот виконується простою перекладкою керма, а для вітрильного судна, особливо великого і з прямим вітрильним оснащенням, для виконання повороту часто приходиться виконувати маневр з еволюцією вітрилами, а можливо, і два маневри.

При повороті вітрильного судна діють дві бокові сили: керма та вітрил. У разі двох або більше сил розраховуються сумарні моменти бокових сил, що діють за годинниковою стрілкою і проти відносно центру обертання. Який сумарний момент буде більшим, у тому напрямку і буде обертатися судно. Для того щоб судно поверталось у потрібному напрямку, треба, щоб момент бокової сили керма перебільшував момент бокової сили вітрил.

У результаті як теоретичних досліджень, так і практичних експериментів винайдена схема повороту великого вітрильного судна з прямим вітрильним оснащенням з урахуванням останніх досліджень, яка й представлена в цій статті.

Ці результати можуть бути використані при маневруванні вітрильних суден з прямим вітрильним оснащенням у різних умовах плавання.

Ключові слова: *велике вітрильне судно з прямим вітрильним оснащенням; поворот вітрильного судна; центр обертання; полюс повороту; центр вітрильності.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.209-225

Вступ. Останнім часом у зв'язку з вичерпуванням викопних копалин відновлюється цікавість до використання енергії поновлюваних джерел, у тому числі й енергії вітру. На морському транспорті це проявляється в використанні енергії вітру як основного, так і допоміжного джерела енергії для руху суден. Це стосується як суден для відпочинку, як-то приватні яхти, так і комерційного флоту, у тому числі навчальних, пасажирських суден, а також і вантажних з використанням вітрил як допоміжного джерела енергії.

Рух вітрильного судна відрізняється від руху судна з механічним двигуном. Особливо в процесі руху по криволінійним траєкторіям, тобто, під час поворотів. Там, де судну з механічним двигуном достатньо просто повернути кермо і виконати поворот під впливом перекладеного керма, вітрильник повинен виконати маневр зі зміною положень вітрил, повороту реїв (брасопки), а то й декілька маневрів. При цьому важливою стає роль використання полюса повороту для полегшення маневрів.

Постановка проблеми. Раніше існувала двохточкова схема повороту судна. Розраховується центр ваги судна. При відсутності руху полюс повороту знаходиться в центрі вага. При русі судна полюс повороту зміщується назустріч руху. При дії бокової сили полюс повороту знаходиться з протилежного боку від точки прикладання бокової сили відносно центра ваги. Інколи це призводить до незрозумілого результату. Наприклад, коли судно йде вперед, а бокова сила прикладена в носовій частині судна. То незрозуміло, де є полюс повороту. Автором була запропонована трьохточкова схема повороту [1]. Вираховується центр ваги судна. Від центра ваги розраховується положення центру обертання, яке зміщується від центра ваги назустріч потоку води, що набігає. І величина цього зміщення залежить від швидкості судна. Від центра обертання розраховуються плечі бокових сил, які впливають на судно. Якщо сила одна, то положення полюса повороту знаходиться з протилежного боку від положення точки прикладання бокової сили відносно центра обертання. Це було запропоновано для конвенційного одногвинтового судна, де при

повороті утворюється одна бокова сила – бокова сила керма. На вітрильному судні в процесі повороту задіяні дві бокові сили: крім бокової сили керма бере участь і бокова сила вітрил. Також потрібно брати до уваги, як розташовані базові точки повороту, від чого залежить їхнє положення і як вони переміщуються. Все це потрібно дослідить на прикладі повороту великого вітрильного судна з прямим вітрильним оснащенням. Для руху вітрильника в завданому напрямку потрібно, щоб момент сили керма завжди перевищував момент сили вітру, якщо вони діють у різні боки і щоб сумарний момент цих сил був спрямований у потрібному напрямку. Якщо моменти діють в одному напрямку. У статті надаються рекомендації, як це виконати.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Про поворот під вітрилами взагалі небагато публікацій. А про поведінку полюса повороту при цьому – взагалі одиниці.

Автори в роботі [1] показують нову схему повороту судна. Пропонується використовувати трьохточкову схему повороту судна. Про яку йшлося вище.

Ч. Мархай у своїй книзі [2] показує, як користуватися вітрилом і як зробити ще найефективніше. Він вважає, що сила тяги вітрила утворюється внаслідок різниці тисків, які виникають на різних боках вітрила при обтіканні його вітром. На підвітряному боці вітрила за рахунок підвищеної швидкості вітрового потоку згідно із законом Бернуллі утворюється понижений тиск, а на навітряному – підвищений. Залежно від кута атаки вітру сила тяги вітрила буде утворюватися або підіймальною силою крила, або силою лобового опору (рис. 1).

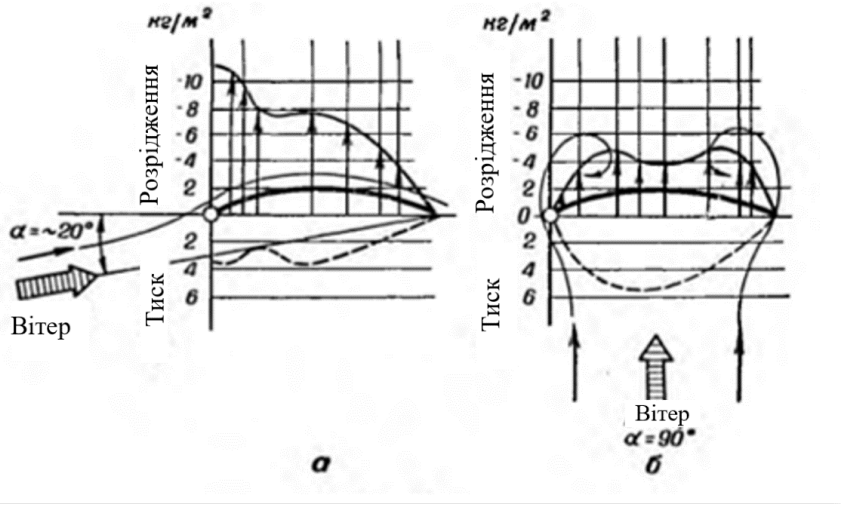


Рисунок 1 – Розподіл тисків на вітрилі: **а** – при куті атаки 20°, коли рушійною силою виступає піднімальна сила; **б –** при куті атаки 90°, коли рушійною силою є сила лобового опору [2]

Він показує, яким чином використати вітрило найефективніше. Але він не пов’язує ефективність роботи вітрила з поворотами судна.

John Harland у [3] розповідає, що при плаванні суден під прямим вітрильним оснащенням, яких було більшість, основним питанням було визначення кута установки реїв відносно діаметральної площини при різних кутах атаки вітру. У давнину були створені різні системи вирахування кута розвороту реїв, але пізніше було знайдене просте правило, що працює цілком пристойно. Так, реї розвертаються відносно вертикальної висі якомога крутіше при слідуванні в крутий бейдевінд і прямо при слідуванні на фордевінд. При проміжних курсах реї мають ділити навпіл кут між вітром та курсом. Він показує, як виконувались повороти «оверштаг» та» через «фордевінд» в епоху вітрил.

Підсумувавши попередній досвід маневрування вітрильників і беручи до уваги сучасні технології автор статті [4] показує, як сучасні вітрильники можуть плавати, використовуючи сучасні схеми постановки/прибирання вітрил, а також брасопки. Маневри й еволюції з вітрилами при використанні сучасних технологій виконуються значно швидше.

Chase G. A. в [5] показує, як використовувати для маневрів на судні з прямим вітрилом рухомий полюс повороту судна. Він брав до уваги 3-щогловий барк «Elissa», і він використовував концепцію рухомої точки повороту при слідуванні під вітрилами і машиною і змінюючи склад поставлених вітрил, обертався навколо точки в носовій частині судна при русі вперед і, у кормовій частині судна при русі назад.

У роботі [6] автор, капітан Хью Кавіє, пропонує 3-точкову схему повороту судна, виділяючи проміжну точку між центром ваги і полюсом повороту, яку називає центром бокового опору і вважає, що від цієї точки відраховуються всі плечі бокових сил, що діють на судно і, відповідно всі моменти цих сил. На прикладі відходу судна від причалу заднім ходом, автор показав, що використання чинних, на той час, рекомендацій з керування судном призводить до навалу судна на причал. Вважалося, що судно обертається навколо центру обертання, який при русі заднім ходом зміщується назад. Насправді ж, судно оберталося навколо полюса повороту, який навпаки був зміщений вперед, що й призводило до навалювання судна на причал. Також автором наведені міркування щодо центру обертання, який повинен знаходитися між центром тяжіння і центром бокового гідродинамічного опору (COLR), який зміщується у напрямку руху судна. Максимальне зміщення COLR, на думку автора, становить до 10% довжини судна. Автор також підкреслив, що центр обертання і полюс повороту – це два різні центри.

У роботах [7–9] автор виділяє три особливі центри обертання: центр циркуляції (зафіксований на Земній поверхні центр планетарного обертання E), центр обертання судна S і полюс повороту (умовний центр обертання P). Автор також фіксує увагу на новому погляді на полюс повороту (за висловом автора на новій концепції полюса повороту), яка відрізняється від традиційної тим, що полюс повороту є умовним центром обертання, його положення не залежить від поздовжньої швидкості руху судна і він не є центром обертання судна. У роботі наводяться також приклади використання нової концепції полюса повороту для практичного маневрування. Крім того, у статті [7] автор закликає вчити майбутніх судноводіїв та перевчити всіх судноводіїв правильним методам управління судном згідно з концепцією полюса повороту.

У роботі [10] автор розмірковує над процесом повороту судна і в цілому підтримує положення, запропоновані Dr. Seong-Gi Seo в його роботах. У роботі [11] він підсумовує погляди авторів, які вивчають проблеми повороту судна і приходить до висновку, що навчання судноводіїв потрібно проводити, спираючись на нову теорію.

Фундаментальні дослідження з керування судном наведені у книзі [12], зокрема, у розділі 7.2.4. Pivot Point показано сучасний стан уявлень про полюс повороту та його використання для керування судном.

Автори в [13] показують, як розрахувати положення ПП при швидкості, меншій ніж швидкість повного ходу.

Автор у [14] пропонує нову змістовну схему повороту судна з врахуванням останніх досягнень теорії та практики та «Пам'ятку судноводію». Нова змістовна модель та «Пам'ятки…» дозволять зменшити похибки керування та підвищити безпеку маневрування, особливо у стиснених водах. Отримані результати пояснюються тим що, на відміну від відомих підходів: нова змістовна модель побудована на основі 3-х точкової схеми повороту, яка враховує додаткову точку – центр обертання; положення полюса повороту визначається відносно центру обертання, а не відносно центру ваги; положення полюса повороту визначається на площині, через абсцису і ординату полюса повороту.

У роботі [15] автор показує практичні шляхи розрахування положення базових точок.

Протягом довгого часу в усіх морських навчальних закладах положення про поворот судна викладали, спираючись на двохточкову схему [16]. А також по такій самій схемі навчали капітанів на міжнародних курсах підвищення кваліфікації [17].

У 2014 році International Training Center for Maneuvering on manned models Port-Rebel видав новий Port Revel Shiphandling 2014 Course Manual [18], де якості базового принципу повороту судна обрана трьохточкова схема повороту судна. Між точками центра ваги і

полюсу повороту розміщена додаткова точка, яка названа «нейтральною точкою» («the neutral point»), в якій при прикладанні бокової сили не утворюється обертального руху, а утворюється тільки поступальний рух судна лагом у напрямку дії бокової сили. Це майже збігається з визначенням центру бокового опору капітана Кавіє [6]. Автор також у роботі [14] пропонує точку між центром ваги й полюсом повороту точку, в якій судно буде мати найменший момент інерції і в якому кутове прискорення, викликане будь-якою боковою силою, буде найбільшим. Цю точку автор називає Центром Обертання. Вона є компромісом між центром ваги і центром бокового опору. Відносно центра обертання розраховуються всі плечі і моменти бокових сил, що діють на судно.

Підсумовуючи проведений аналіз останніх досліджень та публікацій, слід зазначити, що авторами усіх публікацій була виконана велика робота з удосконалення системи повороту судна. Основна частина досліджень процесів маневрування суден з використанням полюса повороту стосується маневрування суден з механічним приводом. Тому, дослідження процесів маневрування з використанням полюса повороту для вітрильних суден залишається актуальною науково-технічною задачею.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка шляху керування великим вітрильним судном на циркуляції із використанням концепції полюса повороту.

Задачі дослідження. Задачами дослідження є:

1 – аналіз літературних джерел та пошук аналогів і прототипів;

2 – розробка схеми повороту великого вітрильного судна, з урахуванням переміщення базових точок під час маневру;

3 – розробка шляху повороту великого вітрильного судна з використанням концепції полюса повороту;

4 – перевірка працездатності та ефективності розробленого шляху.

Виклад основного матеріалу. На відміну від суден з механічним двигуном, циркуляція вітрильного судна не може бути виконана у вигляді кола, бо ефективність вітрової установки сильно залежить від напрямку вітру. Для здійснення повороту на 360°, вітрильник має виконати 2 маневри: поворот «оверштаг» (перетин лінії вітру носом) і поворот «через фордевінд» (перетин лінії вітру кормою) у будь-якій послідовності. Рух великого вітрильного судна на прямому курсі являє собою урівноважену взаємодію обертальних моментів бокових сил, які намагаються розвернути судно за годинниковою стрілкою (наприклад, сил вітрил), і обертальних моментів бокових сил, які намагаються розвернути судно проти годинникової стрілки (наприклад, сил керма). Бокових сил може бути декілька, але, якщо сума моментів, що діють за годинниковою стрілкою, урівноважується сумою моментів, що діють проти годинникової стрілки, вітрильне судно йде прямим курсом. Для подолання дрейфу під вітер змінюють курс на декілька градусів на вітер. При повороті великого вітрильного судна вищевказана схема змінюється. Якщо бокові сили вітрил і керма створюють моменти, спрямовані в різні боки, для продовження повороту потрібно, щоб момент бокової сили керма був більше моменту бокової сили вітрил. У разі, коли ці сили створюють моменти одного знаку, треба це використовувати і намагатися в такі моменти розганяти судно, щоб збільшити швидкість, від якої залежить бокова сила керма.

Маневрування на вітрильному судні дещо відрізняється від маневрування на судні з механічним двигуном. Воно складніше. Для суден з косим вітрильним оснащенням легше виконувати поворот «оверштаг», а складніше – «через фордевінд», а для суден з прямим вітрильним оснащенням – легше виконувати поворот «через фордевінд», а складніше – «оверштаг». PSV ROYAL CLIPPER є найбільшим і на сьогодні єдиним наявним п’ятищогловим судном з прямим вітрильним оснащенням і тому є найскладнішим для виконання повороту «оверштаг».

Розглянемо маневр на прикладі пасажирського вітрильного судна (ПВС) ROYAL CLIPPER, рис. 2. ROYAL CLIPPER являє собою п’ятищогловий корабель з площиною вітрильного оснащення 5209 м^2, повна водотоннажність – 5000 т, довжина максимальна 132,74 м, довжина між перпендикулярами 98,55 м, ширина 16,00 м, осадка максимальна

6,0 м. Має 42 вітрила (26 прямих і 16 косих) на 5 щоглах – фок (fore), грот (main), мідл (middle), бізань (mizzen), джигер (jigger).

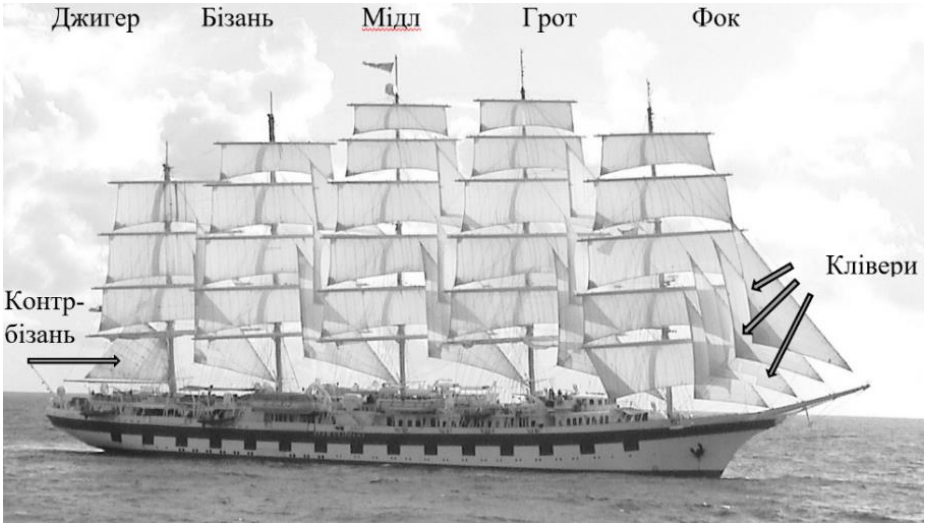


Рисунок 2 – Пасажирське вітрильне судно (ПВС) ROYAL CLIPPER

На ПВС ROYAL CLIPPER реї брасопляться на мінімальний кут до ДП у 43°, мінімальний кут атаки, при якому судно має сталий хід вперед, дорівнює 17°, отже сектор противного вітру в носовій частині дорівнює 60° з кожного борту, загалом 120°. При знаходженні вітру в цьому секторі судно не може рухатись під вітрилами вперед і при зміні галса потрібно цей сектор проходити або за інерцією, або на ходові назад [4].

На рис. 3 наведена діаграма залежності швидкості ВВС «Royal Cliper» від напрямку удаваного вітру.

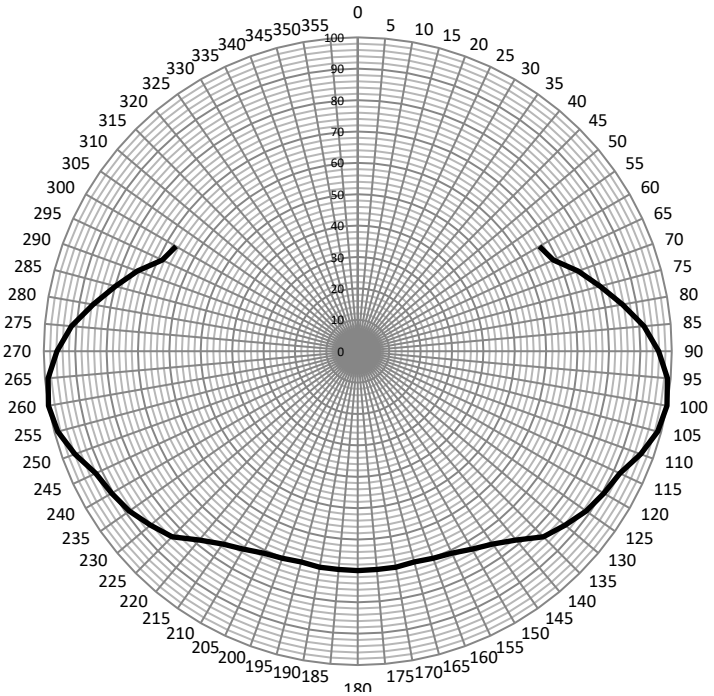
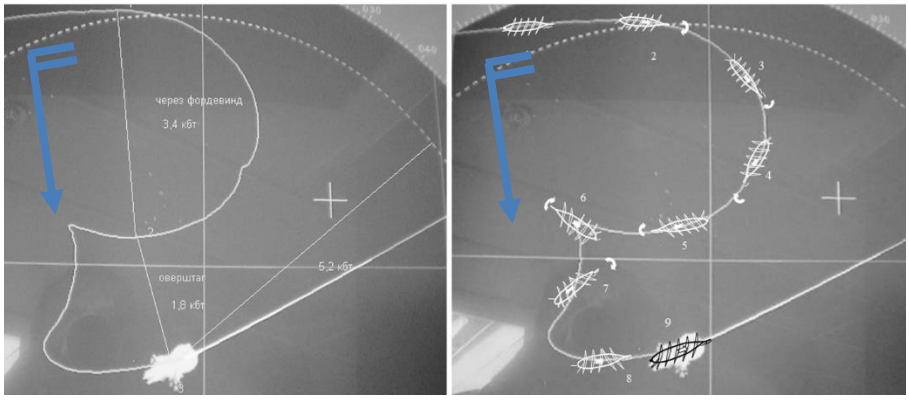


Рисунок 3 – Діаграма залежності швидкості ВВС «Royal Cliper» від напрямку удаваного вітру, яка була визначена експериментально

На рис. 4а зображено екран радара ПВС ROYAL CLIPPER з траєкторією руху судна під час розвороту в умовах дії бокового вітру. Маневр виконувався автором у Тірренському морі. Силуети судна на траєкторії руху накладені автором вручну (рис. 4b).



а б

Рисунок 4 – Циркуляція великого вітрильного судна ROYAL CLIPPER:
а – фотографія з екрана радара, b – траєкторія з накладеними силуетами судна

На наступних скриншотах, рис. 5–13, наведені фрагменти даної траєкторії для різних етапів маневрування. На фрагментах додатково зображені символи наступних базових точок, ЦВ – ◎ – центр ваги – розраховується як центр статей навантаження на судно. Для кращого зрозуміння процесу повороту будемо вважати, що судно завантажено таким чином, що ЦВ знаходиться на міделі. І всі сили, про які буде йти мова нижче, будуть розраховуватись за умовою, що ЦВ – на міделі. У разі знаходження ЦВ в іншій точці, буде розраховуватися відстань ЦВ від міделю і всі інші точки, про які буде згадуватися нижче, будуть зміщені на таку ж відстань. Положення ЦВ під час маневру залишається незмінним.

$Ц_{вітр}$ – ⧖ – центр вітрильності геометричний центр надводної частини судна, включаючи вітрила. Положення $Ц_{вітр}$ може змінюватись завдяки додаванню або прибиранню вітрил.

А – ⛒ – точка прикладання сили вітру (аеродинамічної) – знаходиться з боку напрямку вітру. Чим менше кут атаки вітру, тим вона далі від центру вітрильності. Положення точки А може змінюватись при зміні курсового кута вітру [9].

ЦО – ✦ – центр обертання, що є точкою, відносно якої момент інерції судна буде найменшим і відносно якої розраховуються всі плечі та моменти бокових сил, що діють на судно. [7] ЦО розраховується по різницях положення абсциси ПП при нульовій і максимальній швидкостях, а потім по формулі залежно від частки фактичної швидкості відносно максимальної. Положення ЦО може змінюватись внаслідок напрямку руху і швидкості судна [8].

ПП – ⟠ – полюс повороту, що є видимою точкою, навколо якої фактично розвертається судно. ПП знаходиться з протилежного боку від точки прикладання бокової сили відносно ЦО [7] ПП розраховується по тангенційним швидкостям носа та корми і не залежить ні від типу судна, ні від виду і кількості рушіїв і може бути розрахованим для будь-якого судна. Положення ПП може змінюватись шляхом зміни положення точки прикладання бокової сили [8].

Поворот судна має виконуватися на одному темпі, без затримок. Будь-яка зупинка може затримати судно, воно втратить хід і поворот може не вдатися.

При виконанні циркуляції, для проходження всього спектру курсів у 360°, вітрильне судно має виконати 2 повороти «через фордевінд», коли перетинає лінію вітру кормою і «оверштаг», коли перетинає лінію вітру носом у будь-якій послідовності.

Отже, розглянемо циркуляцію ПВС ROYAL CLIPPER за етапами. Маневр виконувався 21.07.2004 у Тірренському морі під командою автора. По закінченню маневру автором зроблена фотографія маневру з екрана радара (рис. 4a). Рисунок 4b побудований автором на цій фотографії шляхом накладання схематичних малюнків судна в різних стадіях циркуляції, а потім кожна стадія була перефотографована, до неї додані положення базових точок і зроблені рисунки 5–13.

Етап 1

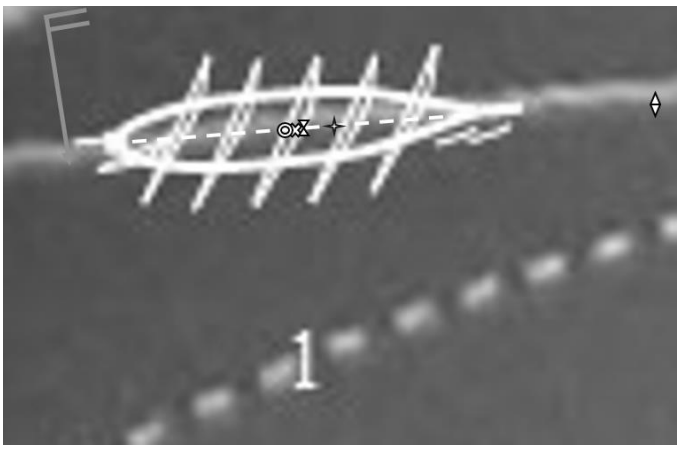


Рисунок 5 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 1

Судно прямує курсом 85° зі швидкістю 6–7 вузлів, вітер 350° 10 м/с, реї обрасоплені галфвінд лівого галса і прямі вітрила працюють у якості крила. ЦВ близько міделю. V_{max}=14 вузлів. За такої швидкості ЦО ≈ (0,12–0,14)L від ЦВ. $Ц_{вітр}$ трохи попереду міделю. Внаслідок того, що вітер близько траверзу, точка прикладення сили вітру приблизно в центрі вітрильності. Вітрила створюють як поздовжню, так і бокову аеродинамічну силу. Подовжня є рушійною силою, а бокова утворює дрейф. Для компенсації цього дрейфу курс прокладають на кут, що дорівнює куту дрейфу, ближче до вітру. Для цього кермо перекладають на певний кут і утримують новий курс. Момент аеродинамічної сили, точка прикладення якої розташована недалеко позаду ЦО, намагається розвернути судно проти годинникової стрілки. Бокова сила керма протидіє цьому. Кут перекладки керма встановлюється таким, щоб момент бокової сили керма дорівнював моментові аеродинамічної сили і судно йшло прямим курсом. Завдяки тому що точка прикладення аеродинамічної сили недалеко позаду ЦО, ПП далеко попереду, за габаритами судна. Для слідування прямим курсом таке розташування базових точок є оптимальним.

Етап 2

Для виконання повороту потрібно наблизити ПП, щоб він розташовувався всередині корпусу судна. Судно починає перекладати кермо праворуч на борт. Ця операція виконується поступово, щоб різко не зменшилась швидкість. Швидкість поступово знижується до 4–5 вузлів. Контр-бізань прибирається для того, щоб перенести $Ц_{вітр}$ вперед і полегшити поворот від вітру. Курсовий кут вітру збільшується і переходить траверз у бік корми. Точка прикладання сил вітру поступово починає зміщуватися в корму. Положення ЦВ не змінюється протягом всього маневру. Внаслідок зменшення швидкості ЦО наближається до ЦВ приблизно до (0,08–0,1) L. (При V_{max}=14 вузлів Δx = 0,2 L, і при V= 4 вузла Δx = 0.08 L, при V= 5 вузлів Δx = 0,1, згідно з формулою $\Delta x = \frac{L}{2}\left(1 - \frac{V_{\max}}{\eta V_x + V_{\max}}\right)$, $\eta = \frac{2\xi}{1-2\xi}$;

ξ – є коефіцієнтом, який визначається відношенням максимального переміщення центру обертання до довжини судна [8]).

На судно починають діяти два моменти: від бокової сили керма, який намагається розвернути судно за годинниковою стрілкою, і бокової сили вітру з лівого борту, який намагається розвернути судно проти годинникової стрілки (бо точка прикладення аеродинамічної сили лежить у корму від $Ц_{вітр}$ через те, що вітер з кормових курсових кутів. Плече моменту сили вітру збільшується з 0 при вітрові в борт до максимального значення при вітрові в корму). Бокова сила керма залежить від швидкості судна. Саме тому потрібно вживати всіх заходів, щоб швидкість судна значно не зменшувалась. Також великий вплив має той фактор, що плече бокової сили керма завжди постійне і приблизно дорівнює 0,5 L, а

плече сили вітру збільшується в міру зростання курсового кута вітру. Водночас величина бокової сили керма зменшується постійно весь час внаслідок зниження швидкості судна, а величина бокової сили вітру буде дорівнювати силі вітру помноженої на косинус кута між напрямком вітру і діаметральною площиною). Момент керма шляхом зменшення швидкості зменшується, і момент сили вітру в загальному випадку зменшується. Таким чином, різниця моментів також зменшується. Тому щоб результуюча бокова сила була спрямована ліворуч, коли точка її прикладення віддаляється в бік корми, потрібно перекладку керма виконувати плавно, щоб швидкість не зменшилась різко. Інколи для продовження повороту потрібно зачекати якийсь час для збільшення швидкості судна.

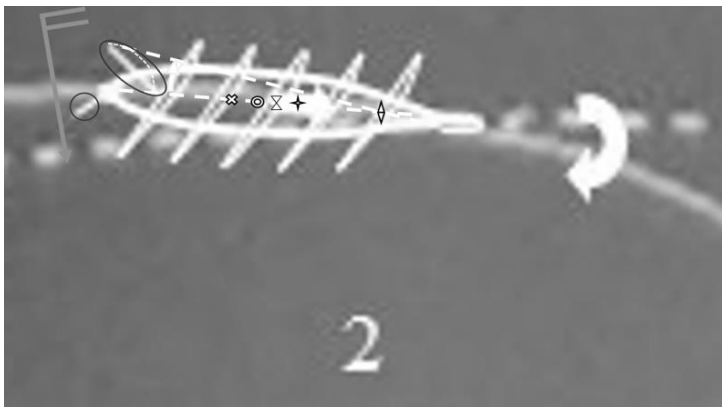


Рисунок 6 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 2

Етап 3

Судно продовжує поворот. Реї починають брасопити таким чином, щоб вони займали положення відносно вітру приблизно в 90º . Вітрила починають працювати таким чином, що швидкість набувається шляхом сили їхнього лобового опору вітру. Швидкість продовжує бути на попередньому рівні. Причини цього описані на етапі 2. ЦВ і ЦО знаходяться на попередніх місцях. $Ц_{вітр}$ внаслідок того, що задні вітрила закривають передні, зміщується в корму. Курсовий кут вітру збільшується до 180º. Завдяки цьому плече сили вітру збільшується максимально до 0,25 L [1].

При наявності достатньої швидкості момент бокової сили керма все одно пересилює момент бокової сили вітру, але в якийсь момент, на курсовому куті в 130–150º судно погано слухається керма (це відбувається саме тому, що на цих курсових кутах величини моментів, які утворені боковою силою керма і вітром наближаються одна до одної). Точка прикладання аеродинамічної сили вітру зміщується в корму і тому полюс повороту наближається до ЦО. Це дає можливість прискорити поворот, коли курсовий кут вітру стає більшим 150º.

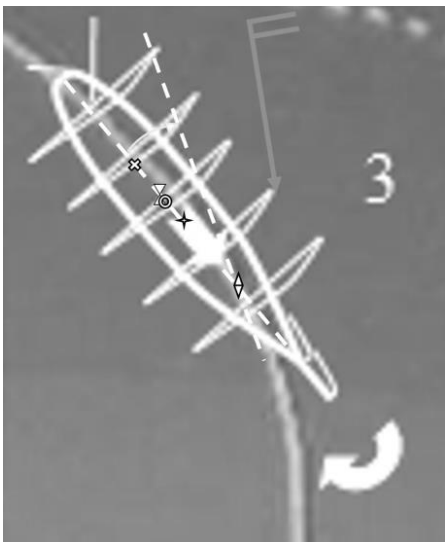


Рисунок 7 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 3

Етап 4

Судно перетинає лінію вітру кормою, таким чином виконуючи поворот «через фордевінд». Реї продовжують брасопити, утримуючи постійний кут між ними і напрямком вітру. Для підвищення кутової швидкості повороту після перетину лінії вітру контр-бізань ставлять, розвернувши на правий галс. ЦВ, і ЦО знаходяться на попередніх місцях. $Ц_{вітр}$ повертається на попереднє місце, де він був до прибирання контр-бізані. Шляхом подальшого зменшення курсового кута вітру, точка прикладення сили вітру наближається до $Ц_{вітр.}$ Завдяки цьому ПП мав би зміщуватися вперед у міру зменшення відстані між $Ц_{вітр}$ та точкою прикладення аеродинамічної сили. Але бокова сила керма і сила вітру починають діяти в одному напрямку, утворюючи момент одного знаку, який розвертає судно за годинниковою стрілкою. Судно рухається із таким кутом дрейфу, щоб проєкція поздовжньої сили на бокову вісь дорівнювала сумі бокових сил від керма і вітрил. Завдяки цьому плече сумарної бокової сили керма і вітрил може зміщуватися трохи вперед або назад, або залишатися на місці залежно від сили вітру, ПП залишається в межах корпусу. Це надає можливість на цьому етапі продовжувати поворот, зберігаючи інерцію обертального руху.

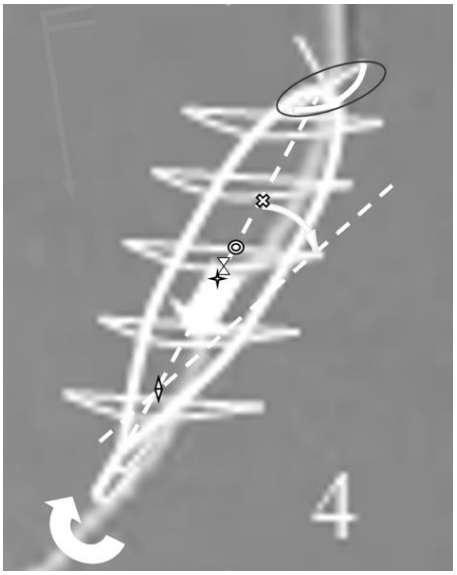


Рисунок 8 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 4

Етап 5

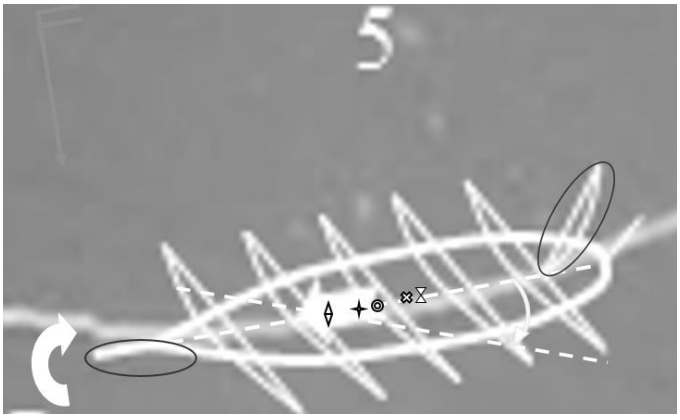


Рисунок 9 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 5

Судно продовжує повертати і йде на поворот «оверштаг». Судну потрібна достатня інерція, щоб перетнути носом лінію вітру. Для збільшення кутової швидкості $Ц_{вітр}$ потрібно змістити назад. Для цього контр-бізань брасоплять на лівий галс і прибирають клівери. Курсовий кут вітру зменшується до 90^{o} продовжує зменшуватися далі і точка прикладання сили вітру наближається до $Ц_{вітр.}$ і потім перетинає її. ЦВ знаходиться на попередньому місці. Кут атаки прямих вітрил зменшується і реї наближаються до напрямку, коли вони перетнуть

лінію вітру. Швидкість судна знижується і ЦО наближається до ЦВ. Внаслідок дії бокової сили керма ПП знаходиться на відстані (0,17–0,18) L попереду міделю.

Етап 6

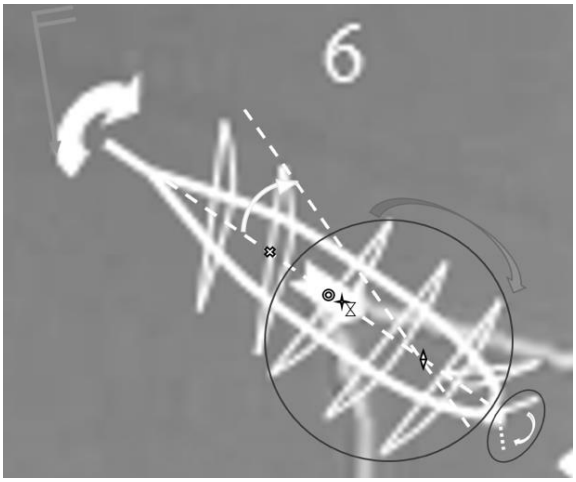


Рисунок 10 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 6

Судно за інерцією продовжує рухатись вперед і розвертатися за годинниковою стрілкою. При перетині реями лінію вітру прямі вітрила обстінюються. Судно втрачає швидкість. Як тільки прямі вітрила обстіняться, починають брасопити три задні щогли на протилежний галс. Під тиском прямих вітрил на цих щоглах і контр-бізані, яка обрасоплена на лівий галс, судно продовжує розворот за годинниковою стрілкою і набуває швидкість назад. Після того як судно зупиниться, кермо перекладаємо ліворуч на борт. Хоч на задньому ходові кермо менш ефективно, ніж на передньому, але воно все одно працює і при збільшенні швидкості заднього ходу до 1,0–1,5 вузлів відхиляє корму ліворуч. ЦВ і $Ц_{вітр}$ знаходяться на попередніх місцях. ЦО через відсутність швидкості зміщується до ЦВ, а потім, по набутті швидкості заднього ходу, трохи в корму від ЦВ, приблизно на 0,03–0,04 L. Точка прикладання аеродинамічної сили в зв'язку зі зменшенням курсового кута вітру менш ніж 90^{o} переміщується вперед від міделю і, відповідно, від ЦВ. Завдяки цьому ПП зміщується назад, за ЦО тому, що бокова сила керма при відсутності швидкості вже майже не працює, а аеродинамічна сила вітру намагається розвернути судно проти годинникової стрілки. У цей момент ПП може бути за межами судна. Отже, єдиною силою, яка працює на розворот судна за годинниковою стрілкою, залишається сила (момент) інерції обертального руху. Тому для успішного його виконання потрібно набрати заздалегідь достатню кутову швидкість.

Етап 7

На цьому етапові, перетнувши носом лінію вітру, судно набуває швидкість заднього ходу і під впливом перекладеного ліворуч керма і вітрил на фок- і грот-щоглах продовжує розворот за годинниковою стрілкою. Вітрила на трьох задніх щоглах працюють гірше тому, що їхній кут атаки зменшується і в якийсь момент вітрила опиняються в положенні «левентік», тобто, коли вітер дме вздовж вітрил і вітрила не працюють. Також, як тільки вітер перетне лінію носа, ставлять клівери, причому, на правий галс. Контр-бізань прибирають. Все це разом з прямими вітрилам фок- і грот-щогл надає судну бокову силу, яка розвертає судно за годинниковою стрілкою на задньому ходові. ЦВ знаходиться на попередньому місці. $Ц_{вітр}$ зміщується вперед. Через набуття швидкості заднього ходу ЦО зміщується назад. Точка прикладання аеродинамічної сили знаходиться попереду міделю через те, що вітер дме під гострим кутом. Все це збільшує момент, що розвертає судно за годинниковою стрілкою, а відповідно і кутову швидкість. ПП знаходиться в кормовій частині корпусу завдяки тому, що точка прикладання аеродинамічної сили знаходиться попереду від ЦО.

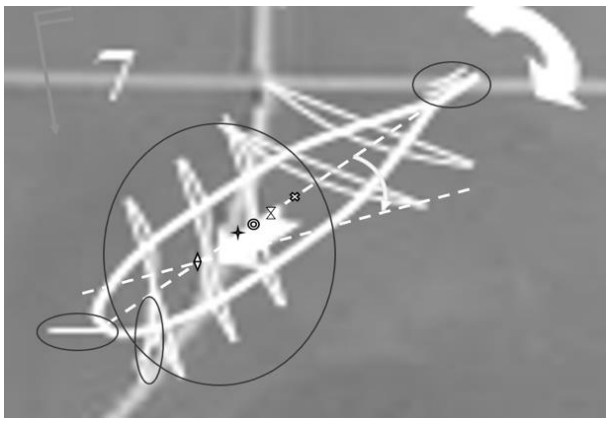


Рисунок 11 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 7

Етап 8

На цьому етапові судно на задньому ходу достатньо розвернулося за годинниковою стрілкою і прямі вітрила на 3 задніх щоглах почали працювати вперед. Прямі вітрила на передніх щоглах ще працюють назад, тому їх брасоплять на лівий галс. Шкоти кліверів також перекидають на лівий галс. Судно зупиняється і починає набувати передній хід. ЦВ і $Ц_{вітр}$ знаходяться на попередніх місцях. Поки судно не набуло швидкості ЦО знаходиться в одному місці з ЦВ. Оскільки курсовий кут вітру збільшився, точка прикладення аеродинамічної сили також наблизилась до міделю і, відповідно, до ЦВ. ПП знаходиться в кормі, можливо, навіть, за межами корпусу.

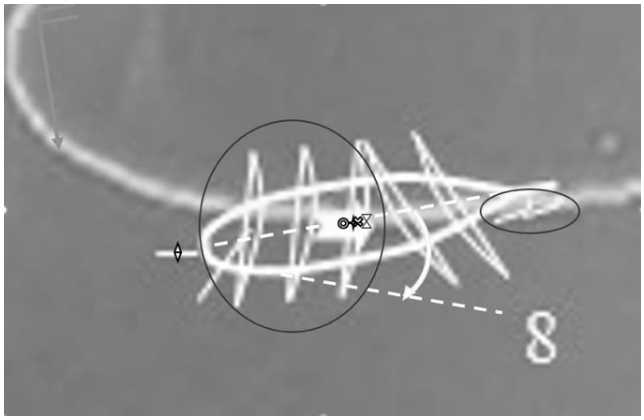


Рисунок 12 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 8

Етап 9

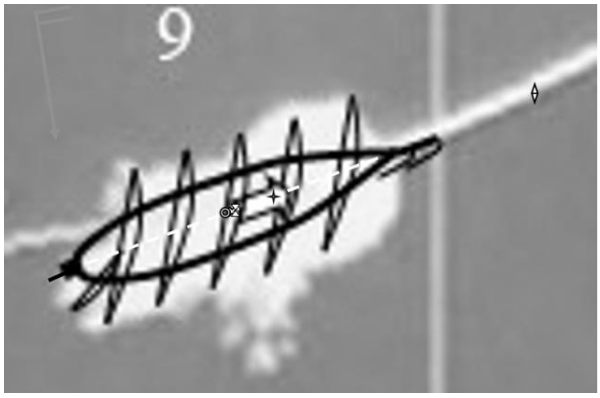


Рисунок 13 – Поворот великого вітрильного судна. Етап 9

На цій стадії брасоплять реї на фок- і грот-щоглах на лівий галс, ставлять контр-бізань, поправляють всі вітрила і лягають на попередній курс. Всі опорні точки займають початкові положення.

Таким чином, виконання маневрів на великому вітрильному судні вимагає від судноводія знання теоретичних підвалин як аеродинаміки, так і гідродинаміки, а саме, як використовувати переміщення полюса повороту під час зміни напрямків як вітру, так і курсу судна. Повороти на великому вітрильному судні з прямими вітрилами, особливо повороту «оверштаг», вимагають від екіпажу знань, вмінь і злагодженості в роботі. Судна меншого розміру можуть перетнути лінію вітру носом за інерцією без втрати відстані під вітер, хоч і це вимагає гарного володіння навичками виконання цього маневру. А на судні такої водотоннажності і такої довжини, поворот «оверштаг» може виконуватися тільки з заднім ходом. Тому знання положення ЦО та ПП як на передньому, так і на задньому ходах допомагає виконати цей поворот, так і поворот «через фордевінд». У повороті «через фордевінд» потрібно також знати деякі нюанси, наприклад, те, що на курсових кутах вітру 130–150° одного борту при повороті на протилежний борт судно погано слухається керма, якщо не має достатньої швидкості. У такому разі потрібно приймати додаткові заходи, наприклад зменшувати площу кормових вітрил.

Основні результати та їх обговорення.

– При виконанні повороту «через фордевінд» сила і плече бокової сили керма залишаються в попередніх межах, навіть сила може зменшуватися внаслідок падіння швидкості судна через перекривання передніх вітрил задніми. Момент сили вітру, навпаки, збільшується через наближення курсового куту вітру до 180° і збільшення плеча сили вітру завдяки переміщенню точки прикладання сили вітру в корму. На курсових кутах у 130–150° судно погано слухається керма. (Етап 3) Це відбувається саме тому, що на цих курсових кутах величини моментів, які утворені боковою силою керма і вітром наближаються одна до одної. Точка прикладання аеродинамічної сили вітру зміщується в корму і тому полюс повороту наближається до ЦО. Для подолання цієї проблеми потрібно весь час брасопити реї перпендикулярно до вітру і, якщо це потрібно, зменшити кут перекладки керма на якийсь час для набору швидкості і тим самим збільшення моменту бокової сили керма після набору швидкості і перекладки керма на борт. Це дає можливість прискорити поворот, коли курсовий кут вітру стає більшим 150° і надалі переходить на протилежний борт, де моменти сил керма та вітру допомагають один одному. Таким чином завдяки експерименту підтверджено те, що на курсових кутах у 130–150° судно погано слухається керма і пояснено, чому це відбувається спираючись на нову змістовну теорію повороту судна.

– Критичною точкою для судна з прямим вітрильним оснащенням є перетин судном лінії вітру носом. Для цього судно розганяють, збільшуючи кут атаки шляхом відвороту від вітру, а потім приводять до вітру перекладкою керма. Щоб збільшити крутний момент від бокової сили керма, виносять контр-бізань на вітер і прибирають клівери (Етап 5). Перетнувши лінію вітру реями, прямі вітрила на щоглах обстінюються (вітер дме в них з носового напрямку) і починають працювати назад, зупиняючи судно (Етап 6). У цей момент починають брасопити реї на 3 задніх щоглах, виводячи їх з вітру. $Ц_{вітр}$ при цьому переміщується вперед завдяки виведенню кормових вітрил з вітру і точка прикладання сили вітру також переміщується вперед, бо вітер дме з носових курсових кутів. Оскільки точка прикладення сили вітру знаходиться в носовій частині судна, ПП пересувається в кормову частину судна. Коли судно зупиняється, а потім починає рух назад, ЦО знаходиться в районі ЦВ, бо швидкості в цей момент близько 0. Кермо перекладають на протилежний борт (у такому випадку з правого борту на лівий) для того, щоб продовжити розворот за годинниковою стрілкою на задньому ходу. ЦО при цьому починає зміщуватися назад при наборі швидкості до 1,0–1,5 вузла, а плече бокової сили вітрил збільшується. Для цього ж переносять центр вітрильності вперед ставлячи клівера і прибираючи контр-бізань (Етап 7). У підсумку ЦО зміщуються назад за ЦВ, $Ц_{вітр}$ зміщується вперед, точка прикладання сили вітру також зміщується вперед. ПП зміщується назад і сприяє повороту за годинниковою стрілкою. Увалившись під вітер на достатній кут, коли почнуть працювати вперед кормові вітрила, судно перекладає кермо праворуч і отримує хід вперед. Носові щогли брасоплять на

новий галс (Етап 8). Це також підтверджено і пояснено на базі використання нової схеми повороту судна і переміщення базових точок повороту.

– Судно розвертається навколо ПП. Для цього сила керма, яка протидіє силі впливу вітрил, має утворювати момент відносно ЦО, який перевершує момент сили вітру також відносно ЦО, або використовувати силу вітру для продовження повороту в разі, коли сила вітру утворює момент у напрямку повороту. Це досягається тим, що, знаючи положення ЦО при маневрах (попереду ЦВ при русі вперед і позаду від ЦВ при русі назад) і положення точки прикладення сили вітру, момент від бокової сили керма, який є майже постійним і залежить в основному від сили вітру, має завжди перевершувати момент сили вітру. А це вже досягається тим, що момент сили вітру можна регулювати шляхом збільшення або зменшення площі вітрильності (прибираючи або ставлячи вітрила) або брасоплячи реї і таким чином виводячи з вітру носові або кормові вітрила. Тобто, основним завданням судноводія для успішного повороту вітрильного судна є перевершення моменту від бокової сили керма над моментом сили вітру або використовування сили вітру для продовження повороту в кожний конкретний момент повороту.

– На циркуляції судно виконує два повороти. Для того щоб вони були вдалими, базові точки повороту потрібно розташувати в потрібних місцях. Маневр вийшов вдалим, тому можна запропонувати розташовувати базові точки в тих місцях, де вони були розташовані при виконанні цього маневру і використовувати еволюції, як написано вище.

– На великому вітрильному судні ROYAL CLIPPER протягом 2004–2006 років було проведено 19 експериментів з циркуляції судна, які підтвердили дієвість методу.

Висновки.

– Проведений аналіз літературних джерел та пошук аналогів і прототипів. Джерела [2–5] стосуються маневрування під вітрилами, джерела [1, 5–18] стосуються виконання суднами повороту і врахування базових точок повороту і тільки джерело [5] стосується використання рухомого полюса повороту вітрильником.

– Розроблена схема повороту великого вітрильного судна, з урахуванням переміщення базових точок під час маневру.

– Розроблений шлях повороту великого вітрильного судна з використанням концепції полюса повороту.

– Виконана перевірка працездатності та ефективності розробленого шляху через проведення 19 експериментів з циркуляції великого вітрильного судна.

– На рис. 4а видно, що зміщення під вітер при повороті «через фордевінд» складає 3,4 кбт, а при повороті «оверштаг» – 1,8 кбт. При плаванні під вітрилами для зміни галсу кращим буде поворот «оверштаг», але, якщо він не вдається через якісь обставини на передньому ходу, потрібно робити на задньому, або використовують поворот «через фордевінд».

– Для маневрів на великому вітрильному судні потрібно чітко уявлять положення базових точок, а саме: точки прикладання сили вітру (аеродинамічної), центру вітрильності, центру ваги, центру обертання, полюсу повороту.

– Для полегшення повороту бажано робити так, щоб при зміні напрямку руху судна (вперед – назад) і виконання при цьому повороту точка прикладення сили була з протилежного боку від напрямку руху (при русі вперед – у кормі, при русі назад – у носові). Це надасть можливість переносити ПП у напрямку руху і полегшувати поворот.

– Науковою новизною є те, що при повороті «оверштаг» під час перетину вітру носом дві носові щогли залишаються на попередньому галсі, а 3 задніх – брасопляться на відміну від того, що раніше на інших суднах тільки фок-щогла залишалася на попередньому галсі, а решта брасопились. Це відбувається завдяки тому, що на 5-щогловому кораблі фок- і грот-щогли знаходяться попереду міделя і тому можуть вважатися носовими щоглами.

– Науковою новизною є те, що розглядається випадок з врахуванням двох поперечних сил: керма та вітрил. Визначаються плечі цих сил і порівнюються їхні моменти відносно центру обертання. При цьому для успішного виконання повороту при різних

напрямках моментів сил керма та вітру проводяться заходи для утримування переваги моменту від сили керма над моментом від сили вітру (прибираються та додаються вітрила, брасопляться певні реї в потрібному напрямку).

– Науковою новизною також є розклад процесу повороту великого вітрильного судна з прямим вітрильним оснащенням на етапи і визначення положення базових точок повороту на кожному із етапів відповідно до запропонованої змістовної моделі повороту судна [17], а також визначення основного завдання судноводія для успішного виконання повороту.

– Пропонується графічна оперативна карта маневру (рис. 14).

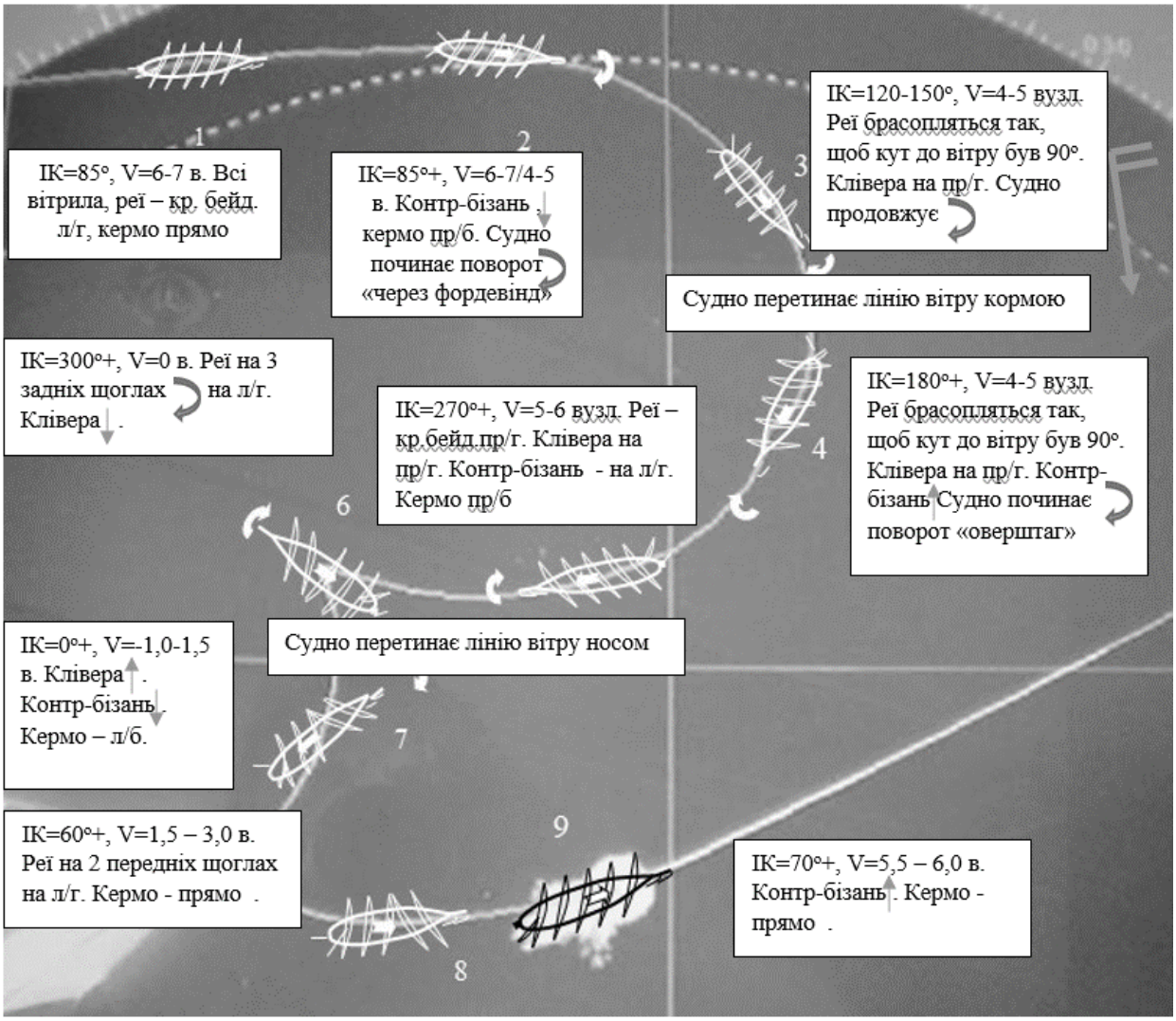


Рисунок 14 – Графічна оперативна карта маневру циркуляції ВВС ROYAL CLIPPER

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження будуть проводитися стосовно процесу повороту різних типів суден з різними рушіями в різних умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРА

1. Zinchenko Serhii, Tovstokoryi Oleh, Nosov Pavlo, Popovych Ihor, Kyrychenko Kostiantyn. Pivot Point position determination and its use for maneuvering the vessel. Ship and offshore structure. https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480, https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17445302.2022.2052480. SCOPUS.

2. Мархай Ч. Теорія плавання під вітрилами. Ч. Мархай. М. : Фізкультура і спорт, 1970. 408 с.

3. John Harland. Seamanship in the Age of Sail. An Account of the Shiphandling of the Sailing Man-Of-War 1600‑1860, Based on Contemporary Sources / John Harland. (London : Conway Maritime Press, 1984; reprinted 1992 by the Naval Institute Press, Annapolis).

4. Товстокорий О. М. Маневрування під вітрилами : навчальний посібник. О. М. Товстокорий. Херсон : ХДМА, 2019. 160 с.

5. Chase G. A. Sailing Vessel Handling and Seamanship – The Moving Pivot Point, The Northern Mariner/Le Marin Du Nord, Vol. 9. Issue 3, 53–59. 1999. https://doi.org/10.25071/2561-5467.629.

6. Cauvier H. The Pivot Point, «The PILOT». The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association, Vol. 295. 2008. http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads /2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf. SCOPUS.

7. Seo S. G. The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring, Proceedings of IMLA, Vol. 1, Issue 29, 271–280. 2011. https://www.academia. edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_ Manoeuvring. SCOPUS.

8. Seo S. G. Earl K. A Paradigm Shift in Shiphandling (The Pivot Point), Warsash Maritime Academy, Southampton Solent University. 2015.

9. Seo S. G. Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.10, Issue 4, 2016. 605–612. https://doi.org/12.12716/1001.10.04.09. SCOPUS.

10. Cummins T. Scientific Fact: The 'traditional' understanding of the ship's pivot point is wrong!, A review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. 2020. https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong. SCOPUS.

11. Cummins T. Where is the centre of a ship's rotation?, A review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. 2020. https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation.

12. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control: second edition, Norwegian university of science and technology, Wiley. 2021.

13. Vitaliy Kobets, Ihor Popovych, Serhii Zinchenko, Pavlo Nosov, Oleh Tovstokoryi, Kostiantyn Kyrychenko. Control of the Pivot Point Position of a Conventional SingleScrew Vessel. ICST 2023. Information Control Systems & Technologies 2023. Proceedings of the 11th International Conference "Information Control Systems & Technologies" Odesa, Ukraine.

14. Tovstokoryi O. M. Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163 Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 2(29) 2024. С 152–163.

15. Товстокорий О. М. Практичні методи розрахунку положення базових точок змістовної моделі повороту судна. Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 1(30) (2025). С. 247–257. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.247-257 Категория Б.

16. Дьомін С. І. та ін. під редакцією В. І. Снопкова. Керування судном. М. : Транспорт, 1991. 359 с.

17. Port Revel Shiphandling. Course manual 2006.pdf https://pdfcoffee.com/qdownload/ manual- 2006- ship-handling-pdf-free.html.

18. Port Revel Shiphandling 2014 Course Manual.pdf. Доступ до джерела: https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=29727.

REFERENCES

1. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., Kyrychenko, K. Pivot Point position determination and its use for maneuvering the vessel // Ship and offshore structure. https://doi.org/10.1080/17445302.2022.2052480, https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17445302.2022.2052480.

2. Czesław Marchaj. Sailing Theory and Prfctice. Dodd, Med 1964–451 p.

3. John Harland (1984). Seamanship in the Age of Sail. An Account of the Shiphandling of the Sailing Man-Of-War 1600–1860, Based on Contemporary Sources / John Harland. (London : Conway Maritime Press; reprinted 1992 by the Naval Institute Press, Annapolis).

4. Tovstokoryi, O. (2019). Manevruvannja pid vitrylamy : tutorial. Kherson : KSMA, 160 p.

5. Chase, G. A. (1999). Sailing Vessel Handling and Seamanship – The Moving Pivot Point, The Northern Mariner/Le Marin Du Nord, Vol. 9. Issue 3, 53–59. https://doi.org/10.25071/2561-5467.629.

6. Cauvier, H. (2008). The Pivot Point, «The PILOT». The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association, Vol. 295. http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf.

7. Seo, S. G. (2011). The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring, Proceedings of IMLA, Vol. 1, Issue 29, 271–280. https://www.academia.edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_Manoeuvring. SCOPUS.

8. Seo, S. G., Earl, K. (2015). A Paradigm Shift in Shiphandling (The Pivot Point), Warsash Maritime Academy, Southampton Solent University.

9. Seo, S. G. (2016). Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept, The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.10, Issue 4, 605–612. https://doi.org/12.12716/1001.10.04.09. SCOPUS.

10. Cummins, T. (2020). Scientific Fact: The 'traditional' understanding of the ship's pivot point is wrong!, A review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong. SCOPUS.

11. Cummins, T. (2020). Where is the centre of a ship's rotation?, A review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation, Harbour Pilot, Portsmouth International Port. https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation.

12. Fossen, T. I. (2021). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control: second edition, Norwegian university of science and technology, Wiley.

13. Kobets, V., Popovych, I., Zinchenko S., Nosov P., Tovstokoryi O., Kyrychenko K. (2023). Control of the Pivot Point Position of a Conventional SingleScrew Vessel. ICST 2023. Information Control Systems & Technologies 2023. Proceedings of the 11th International Conference "Information Control Systems & Technologies" Odesa, Ukraine.

14. Tovstokoryi, O. M. (2024). Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163 Naukovyj visnyk of Kherson state maritime academy: naukovyj journal № 2(29). C 152–163.

15. Tovstokoryi, O. M. (2025). Practychni metody pozrahunku polozhennja bazovyh tochok zmistovnoi modeli povorotu sudna, Naukovyj visnyk of Kherson state maritime academy: naukovyj journal№ 1(30) C. 247–257. https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.247-257 Categorija B.

16. Domin, S. I. et al. (1991). Keruvannia sudnom, M.: Transport, 359 c.

17. Port Revel Shiphandling. Course manual 2006.pdf https://pdfcoffee.com/qdownload/manual-2006-ship-handling-pdf-free.html.

18. Port Revel Shiphandling 2014 Course Manual.pdf. Доступ до джерела: https://seatracker.ru/viewtopic.php?t=29727.

Tovstokoryi O. M. A SUBSTANTIVE MODEL OF THE TURNING CIRCLE OF A LARGE SAILING VESSEL, WHICH INCLUDES “WEARING” AND “TACKING” TURNS

The object of the study is the process of turning a large sailing vessel with square-rigged sail arrangement. The pivot point plays a significant role in the process of turning a vessel. Turning a large sailing vessel differs from turning a vessel with a mechanical engine. For a vessel with a mechanical engine, turning is performed by simply shifting the rudder, and for a sailing vessel, especially large and square-rigged, performing a turn often requires a maneuver involving the adjustment of the sails, and sometimes two separate maneuvers.

According to the new concept, the turn is performed using a three-point scheme, namely: the center of gravity of the vessel is calculated. From the center of gravity, the position of the center of rotation is calculated, which is displaced from the center of gravity towards the oncoming water flow. From the center of rotation, the lever arms of the lateral forces that affect the vessel are calculated. If the force is one, the position of the pivot point of rotation is on the opposite side from the point of application of the lateral force relative to the center of rotation. In the case of two or more forces, the total moments of the lateral forces acting clockwise and counterclockwise relative to the center of rotation are calculated. Whichever total moment is greater determines the direction of the vessel's turn. In order for the vessel to turn in the desired direction, it is necessary that the moment of the lateral force of the rudder exceeds the moment of the lateral force of the sails. When turning a sailing vessel, two lateral forces act: the rudder and the sails. In the case of two or more forces, the total moments of the lateral forces acting clockwise and counterclockwise relative to the center of rotation are calculated. The vessel turns in the direction of the greater total moment. Therefore, for the vessel to turn in the desired direction, the moment of the rudder's lateral force must exceed the moment of the sails' lateral force.

As a result of both theoretical research and practical experiments, a new scheme for turning a large square-rigged sailing vessel was invented, taking into account the latest research, which is presented in this article.

These results can be used when maneuvering square-rigged sailing vessels in various sailing conditions.

Key words: *large square-rigged sailing vessel; turning of sailing vessel; center of rotation; pivot point; center of sailing area.*

© Товстокорий О. М.

Статтю прийнято до редакції 24.07.2025

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ

До друку приймаються статті українською чи англійською мовами, що містять результати власних оригінальних досліджень, які мають наукову і практичну цінність і не публікувалися досі. До друку **не приймаються суто оглядові статті**. Відповідальність за зміст статті несе автор.

Згідно з вимогами п. 3 Постанови Президії Вищої Атестаційної Комісії України № 7-05/1 від 15.01.2003 р., наукові статті, що надаються до друку, повинні містити наступні елементи: постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, у яких започатковано розв'язання даної проблеми, на які посилається автор; виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, яким присвячується стаття; формулювання цілей статті (постановка завдання); викладення основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки щодо даного дослідження та перспективи подальших наукових досліджень у даному напрямку.

Обсяг статей – 10…15 сторінок, включаючи всі матеріали, у т. ч. таблиці, рисунки, графіки та список літературних джерел. Сумарний обсяг рисунків і таблиць повинен бути не більше 30% обсягу основної частини.

Оформлення статті. На першій сторінці рукопису зазначається код УДК, назва роботи, прізвище, ініціали та науковий ступінь (звання) автора(ів).

Код УДК – по лівому краю, розмір шрифту – 10.

Назва – по центру друкованими літерами (шрифт жирний, розмір шрифту – 14).

***Інформація про автора(ів)*:** прізвище, ініціали, науковий ступінь, вчене звання, посада, повна назва установи або громадської організації, держава, e-mail, ORCID автора – курсивом, по лівому краю, розміром шрифту 12.

Текст надається у форматі редактора MS Word шрифтом Times New Roman, розмір шрифту – 12, інтервал – 1.

Параметри сторінки (опція меню ФАЙЛ, Параметри сторінки):

розмір паперу – А4: 210*297 мм;

орієнтація аркуша – книжна (альбомна не допускається);

поля – 2,00 см;

палітурка – 0,00 см;

колонтитули – 1,30 см;

абзацний відступ – 1,25 см, вирівнювання за шириною, сторінки не нумерувати.

У статті наводяться тільки ті формули, рисунки, таблиці, що забезпечують розкриття змісту представленого дослідження, всі вони повинні мати посилання в тексті статті.

Формули повинні бути набрані за допомогою вбудованого редактора формул Equation Editor. Всі формули вставляються в таблицю з неокресленим контуром, що складається з двох колонок: у першій знаходиться формула без абзацу і вирівняна по центру, у другій – номер формули теж без абзацу і з вирівнюванням по центру. Межа між колонками таблиці встановлюється на позначці 14 см.

Це стосується також формул і символів формул, які стоять по тексту. Параметри в редакторі формул повинні в точності відповідати наведеним нижче. Розміри (опція меню редактора Equation Editor: РОЗМІР, Визначити ...):

- Звичайний 12 пт.
- Крупний індекс 7 пт.
- Дрібний індекс 5 пт.
- Крупний символ 18 пт.
- Дрібний символ 12 пт.

Таблиці набираються у Microsoft Word.

Рисунки повинні бути чорно-білими, бажано прозорими, і вставлені у файл статті. Формат рисунків (tif, pcx, 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 journalnvksma@gmail.com) електронний варіант наступних документів:

- комп'ютерний варіант статті – файл, набраний у редакторі Microsoft Word;
- файл кожного рисунка, включеного в статтю, окремо.

Крім тексту статті автором(ами) надаються:

- структурована анотація та ключові слова українською і англійською мовами, включаючи назву статті та прізвища авторів двома мовами – на окремій сторінці;
- ліцензійний договір підписаний усіма авторами;
- відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, вчений ступінь, вчене звання, місце роботи, посада, домашня або службова адреса, контактний телефон, e-mail, наукові інтереси авторів, ORCID автора(ів)) – на окремій сторінці.

Статті, подані на розгляд, проходять перевірку на плагіат та подвійне сліпе рецензування. Для рецензування редакційна колегія може залучати сторонніх фахівців за відповідним напрямом.

Редакційна колегія залишає за собою право приймати рішення щодо відповідності представлених робіт 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=[selectstandard: 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

Masonkova M. **6**
DIGITAL MODEL OF NAVIGATOR'S COMPETENCIES BASED ON THE ANALYSIS OF STCW QUALIFICATION REQUIREMENTS

Robotko S., Zivenko O. **19**
EFFECTIVENESS OF VISION–LANGUAGE MODELS (VLMs) FOR GROUND-OBJECT RECOGNITION IN A MULTI-LEVEL EDGE–CLOUD UAV ARCHITECTURE

Zinchenko S. M., Tovstokoryy K. O. **30**
CONDITIONAL OPTIMIZATION OF VESSEL CONTROLS WITH WIND ADDITIONAL PROPULSION SYSTEM

Жученко О. А., Гутовський Д. В. **41**
СИНТЕЗ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОГО КАСКАДНОГО РЕГУЛЯТОРА З ВИПЕРЕДЖУВАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ ДЛЯ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ЦЕМЕНТНОЇ ПЕЧІ

Пашенко О. Л. **52**
ВИКОРИСТАННЯ АУГМЕНТАЦІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ НАВЧАННЯ МОДЕЛІ ШТУЧНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ РАКУРСУ СУДНА

Передерій В. І., Борчик Є. Ю. **64**
ОЦІНКА ТА ПІДТРИМКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ЗАСОБІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Ушкаренко О., Дьяконов О., Обрубов А., Сірівчук А., Білюк І. **77**
ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ТА НАВІГАЦІЇ БПЛА З КОРЕКЦІЄЮ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

ІНЖЕНЕРІЯ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

Slavych V. P., Voloshanskyi V. O. **91**
MODEL OF THE TRAFFIC FLOW MANAGEMENT SYSTEM OF TWO INTERCONNECTED INTERSECTIONS

Проценко В. О., Русанов С. А., Шикарєв Г. Г. **100**
ПЕРЕДУМОВИ МОДИФІКАЦІЇ СТРУКТУРИ АВТОМОБІЛЬНИХ ГАЛЬМОВИХ МЕХАНІЗМІВ ДИСКОВОГО ТИПУ

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Стухляк П. Д., Яцюк В. М., Золотий Р. З., Тотосько О. В., Стухляк Д. П., Дідуник О. А. **111**
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МОДИФІКАТОРА ТРИМЕТИЛХЛОРСІЛАНУ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ

СУДНОВОДІННЯ ТА ЕНЕРГЕТИКА СУДЕН

Nosov P. **124**
PROJECT-ORIENTED APPROACH TO MARITIME TRANSPORT SAFETY MANAGEMENT BASED ON A GRAVITATIONAL-INERTIAL MODEL

Зінченко С. М., Носов П. С. **143**
КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ СПРОЩЕНИХ УЯВЛЕНЬ НА ПРОЦЕСИ ПОВОРОТУ СУДНА

Петровський А. В. **156**
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОН ПЕРЕКРИТТЯ ПОЛІГОНІВ З РІЗНОЮ ПРІОРИТЕТНІСТЮ ІНФОРМАЦІЇ У ECDIS

Піпченко О. Д., Конон Н. М., Конон В. В., Богаченко Є. А. **166**
ПІДГОТОВКА МОРЯКІВ У КОНТЕКСТІ ГЛОБАЛІЗАЦІЇ: АНАЛІЗ ВИКЛИКІВ І ІННОВАЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Slavych V. P., Biloushchenko D. Yu. **178**
MODEL OF THE TRANSPORT PROBLEM IN THE CASE OF CARGO DELIVERY BY TWO DIFFERENT TYPES OF VEHICLES

Войтович О. А., Луб'яний П. В., Мартиник В. С. **187**
ВДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ШЛЯХОМ ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ПЕРЕХОДУ НА ЕКОЛОГІЧНІ ВИДИ ТРАНСПОРТУ (ЕЛЕКТРОБУСИ)

Петровський А. В. **199**
ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ РІВНЯ ВТОМИ ШТУРМАНА – PREDICTIVE FATIGUE INDEX

Товстокорий О. М. **209**
ЗМІСТОВНА МОДЕЛЬ ЦИРКУЛЯЦІЇ ВЕЛИКОГО ВІТРИЛЬНОГО СУДНА, ЯКА ВКЛЮЧАЄ В СЕБЕ ПОВОРОТИ «ЧЕРЕЗ ФОРДЕВІНД» ТА «ОВЕРШТАГ»

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ МАТЕРІАЛІВ **226**

CONTENTS

AUTOMATION AND COMPUTER INTEGRATED TECHNOLOGIES

Masonkova M. **6**
DIGITAL MODEL OF NAVIGATOR'S COMPETENCIES BASED ON THE ANALYSIS OF STCW QUALIFICATION REQUIREMENTS

Robotko S., Zivenko O. **19**
EFFECTIVENESS OF VISION–LANGUAGE MODELS (VLMs) FOR GROUND-OBJECT RECOGNITION IN A MULTI-LEVEL EDGE–CLOUD UAV ARCHITECTURE

Zinchenko S. M., Tovstokoryy K. O. **30**
CONDITIONAL OPTIMIZATION OF VESSEL CONTROLS WITH WIND ADDITIONAL PROPULSION SYSTEM

Zhuchenko O. A., Gutovsky D. V. **41**
SYNTHESIS AND RESEARCH OF A COMBINED CASCADE REGULATOR WITH ADVANCED COMPENSATION FOR CONTROLLING THE THERMAL MODE OF A CEMENT FURNACE

Pashenko O. L. **52**
IMPACT OF DATA AUGMENTATION ON TRAINING COMPUTER VISION MODEL FOR SHIPS' ASPECT ANGLE DETECTION

Perederyi V., Borchik Eu. **64**
INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE ASSESSMENT AND SUPPORT OF FUNCTIONAL STABILITY OF WATER TRANSPORT VEHICLES

Ushkarenko O., Diakonov O., Obrubov A., Sirivchuk A., Bilyuk I. **77**
DESIGN OF AN AUTOMATIC CONTROL AND NAVIGATION SYSTEM FOR UAVs WITH COMPUTER-VISION-BASED CORRECTION

ENGINEERING IN TRANSPORT INDUSTRY

Slavych V. P., Voloshanskyi V. O. **91**
MODEL OF THE TRAFFIC FLOW MANAGEMENT SYSTEM OF TWO INTERCONNECTED INTERSECTIONS

Protsenko V. O., Rusanov S. A., Shikarev G. G. **100**
PREREQUISITES FOR MODIFICATION OF THE STRUCTURE OF AUTOMOBILE DISC TYPE BRAKE MECHANISMS

MATERIALS SCIENCE

Stukhliak P. D., Yatsyuk V. M., Zolotyi R. Z., Totosko O. V., Stukhliak D. P., Didunyk O. A. **111**
RESEARCH ON THE INFLUENCE OF A TRIMETHYLCHLOROSILANE MODIFIER ON THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF AN EPOXY COMPOSITE

NAVIGATION AND SHIP POWER ENGINEERING

Nosov P. **124**
PROJECT-ORIENTED APPROACH TO MARITIME TRANSPORT SAFETY MANAGEMENT BASED ON A GRAVITATIONAL-INERTIAL MODEL

Zinchenko S. M., Nosov P. S. **143**
CRITICAL ANALYSIS OF SIMPLIFIED VIEWS OF SHIP TURNING PROCESSES

Petrovskyi A. **156**
MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING OVERLAPPING ZONES OF POLYGONS WITH DIFFERENT INFORMATION PRIORITIES IN ECDIS

Pipchenko O. D., Konon N. M., Konon V. V., Bogachenko Ye. A. **166**
SEAFARER TRAINING IN THE CONTEXT OF GLOBALIZATION: ANALYSIS OF CHALLENGES AND INNOVATIVE OPPORTUNITIES

TRANSPORT TECHNOLOGIES

Slavych V. P., Biloushchenko D. Yu. **178**
MODEL OF THE TRANSPORT PROBLEM IN THE CASE OF CARGO DELIVERY BY TWO DIFFERENT TYPES OF VEHICLES

Voitovych O. A., Lubyany P. V., Martynyk V. S. **187**
IMPROVING THE PROCESS OF URBAN PASSENGER TRANSPORTATION THROUGH JUSTIFYING THE TRANSITION TO ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MODES OF TRANSPORT (ELECTRIC BUSES)

Petrovskyi A. **199**
DYNAMIC MODEL FOR CALCULATING NAVIGATOR FATIGUE LEVEL – PREDICTIVE FATIGUE INDEX

Tovstokoryi O. M. **209**
SUBSTANTIVE MODEL OF THE TURNING CIRCLE OF A LARGE SAILING VESSEL, WHICH INCLUDES “WEARING” AND “TACKING” TURNS

DESIGN REQUIREMENTS FOR SCIENTIFIC WORKS **229**

Наукове видання

НАУКОВИЙ ВІСНИК
ХЕРСОНСЬКОЇ ДЕРЖАВНОЇ МОРСЬКОЇ АКАДЕМІЇ

Науковий журнал

Виходить двічі на рік

№ 2 (31)

Видається з 2009 року

Відповідальний за випуск *Р. Є. Врублевський*
Технічний редактор *Г. А. Врублевська*
Корректура англійської мови *А. С. Волкова*

Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Ум. др. арк. 14,75.
Підписано до друку 23.01.2026.
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