

Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції

Materials of the 1st International Scientific and Practical Conference

***ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ОПЕРАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В
СУДНОПЛАВСТВІ***

**INFORMATION AND OPERATIONAL TECHNOLOGIES
IN SHIPPING**

IOTS – 2026

Збірник матеріалів конференції



**23–24 квітня 2026 р.
Одеса, Україна**

**April 23–24 2026
Odesa, Ukraine**

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.19830666>

Організатори конференції

Conference organizers:

- МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
- *MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE*
- ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ (УКРАЇНА)
- *ODESA NATIONAL MARITIME UNIVERSITY (Ukraine)*
- НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ» (УКРАЇНА)
- *NATIONAL UNIVERSITY "ODESA MARITIME ACADEMY" (Ukraine)*
- ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ (УКРАЇНА)
- *KHERSON STATE MARITIME ACADEMY (Ukraine)*
- НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА
- МАКАРОВА (УКРАЇНА)
- *ADMIRAL MAKAROV NATIONAL UNIVERSITY OF SHIPBUILDING (Ukraine)*
- НАЦІОНАЛЬНИЙ ТРАНСПОРТНИЙ УНІВЕРСИТЕТ (УКРАЇНА)
- *NATIONAL TRANSPORT UNIVERSITY (Ukraine)*
- ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І.І. МЕЧНИКОВА (УКРАЇНА)
- *ODESA I. I. MECHNIKOV NATIONAL UNIVERSITY (Ukraine)*
- BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING (ЧЕСЬКА РЕСПУБЛІКА)
- *BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING CZECH REPUBLIC (CZECH REPUBLIC)*
- CONSTANTA MARITIME UNIVERSITY (РУМУНІЯ)
- *CONSTANTA MARITIME UNIVERSITY (ROMANIA)*
- STANISLAW STASZIC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, DEPARTMENT OF TRANSPORT (ПОЛЬЩА)
- *STANISLAW STASZIC UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES, DEPARTMENT OF TRANSPORT (POLAND)*
- UNIVERSITY OF ŽILINA, FACULTY OF OPERATION AND ECONOMICS OF TRANSPORT AND COMMUNICATIONS (СЛОВАКІЯ)
- *UNIVERSITY OF ŽILINA, FACULTY OF OPERATION AND ECONOMICS OF TRANSPORT AND COMMUNICATIONS (SLOVAKIA)*
- UNIVERSITY OF SPLIT, FACULTY OF MARITIME STUDY SPLIT (ХОРВАТІЯ)
- *UNIVERSITY OF SPLIT, FACULTY OF MARITIME STUDY SPLIT (CROATIA)*
- UNIVERSITAS SEBELAS MARET (ІНДОНЕЗІЯ)
- *UNIVERSITAS SEBELAS MARET (INDONESIA)*
- UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN (ІНДОНЕЗІЯ)
- *UNIVERSITAS AHMAD DAHLAN (INDONESIA)*
- TRANSPORT AND TELECOMMUNICATION INSTITUTE (ЛІТВІЯ)
- *TRANSPORT AND TELECOMMUNICATION INSTITUTE (LATVIA)*
- DEPARTMENT OF MARITIME STUDIES, UNIVERSITY OF PIRAEUS (ГРЕЦІЯ)
- *DEPARTMENT OF MARITIME STUDIES, UNIVERSITY OF PIRAEUS (GREECE)*
- OUTLAW EAGLE MANUFACTURING, DESIGNER AND DRAFTSPERSON (КАНАДА)
- *OUTLAW EAGLE MANUFACTURING, DESIGNER AND DRAFTSPERSON (CANADA)*

Програмний комітет:

Programme Committee:

Aditya Rio Prabowo – Dr.Eng., PhD (Індонезія) / *Aditya Rio Prabowo – Dr.Eng., PhD (Indonesia)*;
Андрій Бень – к.т.н., проф. (Україна) / *Andrii Ben – Prof., PhD (Ukraine)*;
Andri Pranolo – As. Prof., PhD (Індонезія) / *Andri Pranolo – As. Prof., PhD (Indonesia)*;
Євген Малахов – д.т.н., проф. (Україна) / *Eugene Malakhov – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;
Ігор Бурмака – д.т.н., проф. (Україна) / *Igor Burmaka – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;
Ігор Ворохобін – д.т.н., проф. (Україна) / *Igor Vorokhobin – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;
Ivana Golub Medvešek – As. Prof., PhD (Хорватія) / *Ivana Golub Medvešek – As. Prof., PhD (Croatia)*;

Martin Jurkovič – Prof., PhD (Словаччина) / *Martin Jurkovič – Prof., PhD (Slovakia)*;
Микола Малаксіано – д.т.н., проф. (Україна) / *Mykola Malaksiano – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;
Микола Полетаєв – д.т.н., проф. (Україна) / *Mykola Poletaev – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;
Олександр Шибаєв – д.т.н., проф. (Україна) / *Oleksandr Shibaev – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;
Олександр Шумило – д.т.н., проф. (Україна) / *Oleksandr Shumylo – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;
Олексій Фомін – д.т.н., проф. (Україна) / *Oleksii Fomin – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;
Олексій Полікаровських – д.т.н., проф. (Україна) / *Oleksiy Polikarovskyykh – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;
Олег Онищенко – д.т.н., проф. (Україна) / *Oleg Onishchenko – Prof., Dr.Sc. (Ukraine)*;

Olegs Cernisevs – PhD (Італія) / *Olegs Cernisevs* – PhD (Italy);
Peter Stavroulakis – As. Prof., PhD (Греція) / *Peter Stavroulakis* – As. Prof., PhD (Greece);
Piotr Gorzelanczyk – As. Prof., PhD (Польща); / *Piotr Gorzelanczyk* – As. Prof., PhD (Poland);
Pavel Kučera – As. Prof., PhD (Чеська Республіка) / *Pavel Kučera* – As. Prof., PhD (Czech Republic);
Remus Zagan – Prof., Dr. Sc. (Румунія) / *Remus Zagan* – Prof., Dr. Sc. (Romania);
Роман Варбанец – д.т.н., проф. (Україна) / *Roman Varbanets* – Prof., Dr.Sc. (Ukraine);
Онищенко Світлана – д.е.н., проф. (Україна) /

Svitlana Onyshchenko – Prof., Dr.Sc. (Ukraine);
Václav Píštěk – Prof., Dr. Sc. (Eng) (Чеська Республіка) / *Václav Píštěk* – Prof., Dr. Sc. (Eng). (Czech Republic);
Володимир Яровенко – д.т.н., проф. (Україна) / *Vladimir Yarovenko* – Prof., Dr.Sc. (Ukraine);
Yelena Popova – Prof., Dr. Sc. (Econ.) (Латвія) / *Yelena Popova* – Prof., Dr. Sc. (Econ.) (Latvia);
Юрій Гунченко – д.т.н., проф. (Україна) / *Yurii Gunchenko* – Prof., Dr.Sc. (Ukraine).

Організаційний комітет: **Organizing Committee:**

Голова/Head:	Савельєва Ірина Владиславівна – в.о. ректора університету. <i>Iryna V. Savelieva</i> – Acting Rector of Odesa National Maritime University.
Заступники голови/Deputy Heads:	Мельник Олексій Миколайович – завідувач кафедри судноводіння і морської безпеки. <i>Oleksiy Melnyk</i> – Head of the Department of Navigation and Maritime Safety. Носов Павло Сергійович – завідувач кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій ім. проф. Р.В. Меркта. <i>Pavlo Nosov</i> – Head of the Department of Technical Cybernetics and Information Technologies named after Prof. R. V. Merkt.
Члени комітету/Members:	Кирица Владислав Іванович – директор навчально-наукового інституту морського флоту ОНМУ. <i>Vladyslav Kyrnats</i> – Director of the Educational and Scientific Institute of the Merchant Fleet, ONMU. Іванов Андрій Миколайович – директор навчально-наукового інституту інформаційних технологій та інноваційного підприємництва ОНМУ. <i>Andrii Ivanov</i> – Director of the Educational and Scientific Institute of Information Technologies and Innovative Entrepreneurship, ONMU. Терновський Валентин Борисович – професор кафедри судноводіння і морської безпеки. <i>Valentyn Ternovskyi</i> – Prof. of Department of Navigation and Maritime Safety. Романов Андрій Юрійович – доцент кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій ім. проф. Р.В. Меркта. <i>Andrii Romanov</i> – Associate Professor of Department of Technical Cybernetics and Information Technologies named after Prof. R. V. Merkt. Булгаков Микола Петрович – доцент кафедри судноводіння і морської безпеки. <i>Mykola Bulhakov</i> – Associate Professor of Department of Navigation and Maritime Safety. Коновалов Сергій Миколайович – ст. викладач кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій ім. проф. Р.В. Меркта. <i>Serhii Konovalov</i> – Senior Lecturer of Department of Technical Cybernetics and Information Technologies named after Prof. R. V. Merkt. Розум Марина Валеріївна – науковий секретар конференції, к.ф.-м.н., доц., заступник директора навчально-наукового інституту інформаційних технологій та інноваційного підприємництва ОНМУ з наукової роботи. <i>Maryna Rozum</i> – Conference Scientific Secretary, PhD (Phys.-Math.), Associate Professor – Deputy Director for Research, Educational and Scientific Institute of Information Technologies and Innovative Entrepreneurship, Odesa National Maritime University.

У збірнику подано матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні та операційні технології в судноплаванні» (Одеса, 23–24 квітня 2026 р.), присвяченої розвитку сучасного судноплавання, де судноводіння, управління енергосистемами й операціями поєднуються для забезпечення морської безпеки, а інформаційні технології та автоматизація підвищують ефективність перевезень.

Матеріали збірника розраховані на викладачів та студентів вищих навчальних закладів, фахівців науково-дослідних установ та підприємств.

Інформаційні та операційні технології в судноплаванні (IOTS-2026) [Збірник матеріалів I Міжнародної науково-практичної конференції (23–24 квітня 2026 р., м. Одеса)]. – Одеса: Одеський національний морський університет, 2026. – 284 с.

ПЕРЕДМОВА

Шановні колеги!

Перед вами – збірка матеріалів *Першої Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні та операційні технології в судноплаванні» (IOTS–2026)*. Цей форум став точкою перетину для науковців, практиків морської індустрії та молодих дослідників, яких об'єднала спільна мета: трансформація сучасного судноплавства через інтелектуальні та операційні технології. Проведення IOTS–2026 – це не просто формальність, а реальний крок до створення міждисциплінарного середовища. Тут класичне судноводіння, енергетичний менеджмент та комп'ютерна автоматизація розглядаються не окремо, а як єдиний, нерозривний контур морської безпеки. Ми переконані, що саме такий комплексний підхід є фундаментом для ефективної транспортної системи майбутнього.

Метою конференції є консолідація наукової та практичної спільноти для висвітлення нових теоретичних і прикладних результатів у сфері судноплавства, де безпека руху суден, надійність морських перевезень, ефективність енергетичних комплексів і якість виконання операцій дедалі більше залежать від рівня розвитку інформаційних, автоматизованих та інтелектуальних рішень.

За нинішніх умов морська індустрія потребує не точкового вдосконалення окремих технічних засобів, а цілісного поєднання високотехнологічного судноводіння, автоматизації операційних процедур, інтеграції даних у контурі управління рухом судна, аналітичних інструментів та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Саме такий підхід створює основу для зміцнення надійності транспортних систем, мінімізації операційних ризиків і підвищення якості управління в морському транспорті.

Цінність IOTS–2026 виходить далеко за межі презентації окремих доповідей. Головна місія заходу – системне осмислення векторів, за якими розвиватиметься морська галузь України та світу в найближче десятиліття. Ми сфокусувалися на критичному аналізі того, як класичне судноводіння та управління енергосистемами трансформуються під впливом цифровізації.

Особливий акцент зроблено на «інтелектуалізації» містка: від методів формалізації даних у контурі керування до реальних кейсів впровадження систем підтримки рішень у реальному часі. Конференція фактично закладає фундамент для нових пріоритетів у дослідженнях, де безпека навігації та енергоефективність розглядаються як єдиний технологічний вузол. Це майданчик для тих, хто не просто спостерігає за автоматизацією флоту, а безпосередньо створює інструменти для інтелектуального судноплавства майбутнього.

Програмою конференції передбачено наукову дискусію за чотирма ключовими напрямками: судноводіння, енергетичні системи та управління операціями суден; технології морських перевезень та безпека транспортних систем; інформаційні технології та автоматизація в галузі морського транспорту; інтелектуальні технології та системи підтримки прийняття рішень в судноплаванні. Така структура відображає реальні потреби галузі, в якій результативність транспортних процесів визначається узгодженим використанням навігаційних, енергетичних, інформаційних та аналітичних засобів, а також здатністю впроваджувати наукові результати у практику організації й управління морськими перевезеннями.

Ми щиро віримо, що ідеї та рішення, зібрані на сторінках цього видання, стануть не просто предметом аналізу, а реальним поштовхом до інтелектуалізації сучасного флоту. Сьогодні автоматизація судових операцій та цифрова підтримка рішень — це вже не футурологія, а базовий контур морської безпеки, який ми разом формуємо на IOTS–2026. Головний успіх нашої конференції – у її міждисциплінарному характері та енергії

молодих дослідників. Саме синергія досвідчених професіоналів і сміливих ідей молоді дозволяє нам сьогодні давати відповіді на найскладніші інженерні виклики. Сподіваємося, що представлені тези стануть надійним підґрунтям для нових міжнародних проєктів та наукових відкриттів, які визначатимуть обличчя морського транспорту майбутнього

Організатори конференції щиро дякують усім учасникам, авторам доповідей, членам програмного та організаційного комітетів, а також закладам вищої освіти, науковим установам, представникам галузі і міжнародним партнерам, які долучилися до підготовки та проведення IOTS–2026. Сподіваємося, що конференція стане авторитетним майданчиком для професійного діалогу, змістовного обміну науковими результатами, розвитку нових форм співпраці та започаткування перспективних дослідницьких і прикладних ініціатив у сфері суднопластва.

Бажаємо всім учасникам плідної роботи, змістовних дискусій, нових наукових здобутків, професійного натхнення та успішного впровадження інноваційних рішень у практику морських перевезень.

*З повагою,
Організаційний та Програмний комітети.*

FOREWORD

Dear colleagues!

Before you is the collection of materials of the *First International Scientific and Practical Conference «Information and operational technologies in shipping» (IOTS–2026)*. This forum has become a point of intersection for scientists, maritime industry practitioners, and young researchers united by a common goal: the transformation of modern shipping through intelligent and operational technologies. Holding IOTS-2026 is not merely a formality, but a real step toward creating an interdisciplinary environment. Here, classical navigation, energy management, and computer automation are considered not separately, but as a single, inseparable contour of maritime safety. We are convinced that precisely such an integrated approach is the foundation for an effective transport system of the future.

The purpose of the conference is to consolidate the scientific and practical community in order to highlight new theoretical and applied results in the field of shipping, where the safety of vessel traffic, the reliability of maritime transportation, the efficiency of energy complexes, and the quality of operation execution increasingly depend on the level of development of informational, automated, and intelligent solutions.

Under current conditions, the maritime industry requires not pointwise improvement of individual technical means, but an integral combination of high-tech navigation, automation of operational procedures, integration of data into the vessel motion control loop, analytical tools, and intelligent decision support systems. It is precisely such an approach that creates the basis for strengthening the reliability of transport systems, minimizing operational risks, and improving the quality of management in maritime transport.

The value of IOTS–2026 goes far beyond the presentation of individual reports. The main mission of the event is the systematic comprehension of the vectors along which the maritime industry of Ukraine and the world will develop over the coming decade. We have focused on a critical analysis of how classical navigation and energy system management are being transformed under the influence of digitalization.

Special emphasis is placed on the «intellectualization» of the bridge: from methods of data formalization in the control loop to real cases of implementing real-time decision support systems. The conference, in fact, lays the foundation for new research priorities, where navigational safety and energy efficiency are considered as a single technological node. This is a platform for those who do not simply observe the automation of the fleet, but directly create tools for the intelligent shipping of the future.

The conference program provides for scientific discussion in four key areas: navigation, energy systems, and ship operation management; maritime transportation technologies and transport system safety; information technologies and automation in the field of maritime transport; intelligent technologies and decision support systems in shipping. Such a structure reflects the real needs of the industry, in which the effectiveness of transport processes is determined by the coordinated use of navigational, energy, informational, and analytical means, as well as by the ability to implement scientific results in the practice of organizing and managing maritime transportation.

We sincerely believe that the ideas and solutions collected on the pages of this publication will become not merely a subject of analysis, but a real impetus for the intellectualization of the modern fleet. Today, the automation of ship operations and digital decision support are no longer futurology, but the basic contour of maritime safety that we are shaping together at IOTS–2026. The main success of our conference lies in its interdisciplinary character and the energy of young researchers. It is precisely the synergy of experienced professionals and the bold ideas of youth that allows us today to provide answers to the most complex engineering challenges. We hope that the presented theses will become a reliable

foundation for new international projects and scientific discoveries that will shape the face of maritime transport of the future.

The conference organizers sincerely thank all participants, authors of reports, members of the Program and Organizing Committees, as well as higher education institutions, scientific institutions, industry representatives, and international partners who joined the preparation and holding of IOTS-2026. We hope that the conference will become an authoritative platform for professional dialogue, meaningful exchange of scientific results, development of new forms of cooperation, and initiation of promising research and applied initiatives in the field of shipping.

We wish all participants fruitful work, meaningful discussions, new scientific achievements, professional inspiration, and successful implementation of innovative solutions in the practice of maritime transportation.

*Respectfully,
Organising and Programme Committees.*

СЕКЦІЯ:
СУДНОВОДІННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА УПРАВЛІННЯ
ОПЕРАЦІЯМИ СУДЕН
SECTION
NAVIGATION, SHIP ENERGY SYSTEMS, AND SHIP OPERATIONS
MANAGEMENT

GENETIC ALGORITHM DEEP PARAMETRIZATION AND FINE-TUNING FOR THE MULTIPLE TRAVELING SALESMAN PROBLEM IN MARITIME CARGO DELIVERY

¹V.Romanuke, ²A. Romanov, ²M. Malaksiano

¹Vinnitsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics
(Ukraine)

²Odesa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. The multiple traveling salesman problem (mTSP) arises naturally in maritime operative logistics when several feeder vessels must deliver cargo to a set of ports while minimizing the overall route cost, typically measured by travel distance, time, or fuel consumption [1, 2]. The problem is a generalization of the classical traveling salesman problem (TSP) and is known to be NP-hard, which makes exact optimization methods computationally infeasible for large instances [3]. Consequently, metaheuristic approaches, and particularly genetic algorithms (GAs), have become widely used for solving large mTSP instances [4, 5].

Genetic algorithms imitate biological evolution by maintaining a population of candidate solutions and iteratively applying selection, crossover, and mutation operators [6, 7]. Their flexibility allows them to accommodate the complex constraints characteristic of maritime logistics systems [1, 3, 8]. Several studies have demonstrated the effectiveness of GA in maritime routing optimization, including works by Vadim Romanuke and co-authors, who investigated improvements in constraint handling [3], crossover operators [8], and the impact of pseudorandom number generators [1] on GA performance in cargo delivery route optimization.

Motivation and objective. The GA performance strongly depends on the choice of algorithmic parameters and operators [6, 9]. Improper parametrization can lead to premature convergence, slow exploration of the search space, or unstable solution quality. In maritime cargo delivery optimization, where each salesman represents a feeder vessel serving a subset of ports [1, 3, 5, 8], the quality of GA parametrization directly influences operational efficiency, including sailing distance, schedule reliability, and fuel consumption.

Previous research has explored several aspects of GA performance in this context. For example, Vadim Romanuke, Andrii Romanov, and Mykola Malaksiano analyzed the role of constraint-violation penalties and introduced a penalty discounting mechanism to improve solution quality in maritime cargo delivery problems [3]. Their work also investigated the impact of different crossover operators [8] and pseudorandom number generators [1] on the convergence behavior of GA. The objective of this study is therefore to systematize the main GA parameters relevant to solving the mTSP in maritime logistics and provide practical recommendations for their tuning. Special attention is to be given to population configuration, evolutionary operators, and stochastic mechanisms influencing the exploration-and-exploitation balance.

GA deep parametrization and fine-tuning. Generally, a GA depends on a vector of N parameters

$$\Theta = [\theta_i]_{1 \times N}, \quad (1)$$

where each element of (1) corresponds to a specific GA configuration component. Typical components include: population size, crossover probability, mutation probability, elitism level, selection operator type, crossover operator type, mutation operator type, reproduction strategy, number of generations, migration parameters (for island GA [2, 9]). Some parameters are continuous, others are discrete or categorical.

1.Population size and initialization. Population size determines the diversity of candidate solutions explored in each generation [3, 4, 6, 9]. A small population leads to faster computation but risks premature convergence, whereas a large population improves exploration

at the expense of computational cost. For maritime routing problems, practical experiments indicate that population sizes between 100 and 500 individuals typically provide a good balance. Initialization strategies may include: random permutations of port sequences for each vessel; greedy initialization, where ports are assigned based on nearest-neighbor rules; hybrid initialization, combining random and heuristic solutions. Hybrid initialization often improves convergence because it introduces both high-quality and diverse initial routes.

2. Chromosome representation. For the mTSP, chromosomes usually encode port sequences assigned to each vessel. Common representations include: permutation representation with route separators distinguishing vessels; two-vector representation, where one vector encodes port order and the other assigns ports to vessels [5, 6, 8, 10]. The first representation is simpler and widely used in maritime routing applications. However, the second representation may offer greater flexibility for balancing vessel workloads.

3. Selection mechanisms. Selection determines which individuals participate in reproduction. Common selection strategies include tournament selection, roulette-wheel selection, rank-based selection [9]. Tournament selection is often preferred for routing problems because it maintains diversity while favoring high-quality solutions. Tournament sizes between 2 and 5 are typically effective.

4. Crossover operators. Crossover is the main operator responsible for generating new route structures. Several specialized crossover operators are suitable for routing problems: order crossover (OX), partially matched crossover (PMX), edge recombination crossover (ERX) [11]. Research by Vadim Romanuke and co-authors compared several crossover operators for maritime cargo delivery optimization and showed that operators preserving adjacency relationships between ports often lead to better route structures [8]. In particular, edge-preserving crossovers help maintain promising subroutes discovered during evolution. Typical crossover probabilities range between 0.7 and 0.9.

5. Mutation operators. Mutation introduces random modifications to maintain genetic diversity. In route optimization problems, common mutation operations include swap mutation (two ports exchange positions), insertion mutation, inversion mutation [3, 4, 9, 11]. Mutation probabilities are usually kept relatively low, typically 0.01–0.1, depending on the population size and crossover intensity [3, 5, 6].

6. Constraint handling and penalty mechanisms. Realistic maritime routing problems involve constraints such as vessel capacity, port service schedules, or maximum route length. One approach is to incorporate constraint violations into the fitness function via penalties [9]. Vadim Romanuke, Andrii Romanov, and Mykola Malaksiano introduced a penalty discount mechanism in which the penalty applied to constraint violations gradually decreases during the search process [3]. This approach helps the algorithm explore infeasible but promising regions of the solution space during early generations while gradually steering the population toward feasible solutions.

7. Elitism and reproduction. Elitism ensures that the best individuals survive to the next generation. Typically 1–5 % of the population is preserved unchanged [9]. This mechanism stabilizes convergence by preventing the loss of high-quality solutions. Reproduction strategies may combine crossover and mutation probabilities with elitism to control the exploration-and-exploitation trade-off.

8. Migration and island models. For large-scale mTSP instances, island GA models may be used. In such models, several subpopulations evolve independently, or individuals migrate between islands periodically [9]. Migration intervals and migration sizes determine how information spreads between subpopulations. Moderate migration rates generally improve global exploration.

9. Influence of random number generators. An often overlooked aspect of GA performance is the choice of pseudorandom number generator (PRNG). Experimental studies by Vadim Romanuke, Andrii Romanov, and Mykola Malaksiano demonstrated that the PRNG can

significantly affect convergence speed and solution quality because stochastic operators rely heavily on random sampling [1]. Consequently, using high-quality generators is recommended for reliable GA performance in maritime optimization tasks.

10. Fine-tuning. The quality of a parameter configuration (1) is evaluated by both the route length (cost) $L(\mathbf{X}(\Theta))$ and runtime $T(\Theta)$, where $\mathbf{X}(\Theta)$ is a feasible route produced by GA configured with parameters (1). Because GA is stochastic, $L(\mathbf{X}(\Theta))$ and $T(\Theta)$ are estimated by multiple runs, whose number is denoted by R . Formally, the expected combined quality indicator is

$$Q(\Theta, \tau) = \frac{\mathbb{E}[L(\mathbf{X}(\Theta))]}{L(\mathbf{X}_{\max})} + \tau \cdot \frac{\mathbb{E}[T(\Theta)]}{T_{\max}}, \quad (2)$$

where $\mathbf{X}_{\max}$ is (nearly) the worst (longest) route, $T_{\max}$ is (nearly) the worst (longest) runtime, and τ is a runtime weighting coefficient, by $\tau(0; 0.5)$ or close to that. In real practice, however, the expected combined quality indicator (2) is substituted (or rather approximated) by the average combined quality indicator

$$\begin{aligned} Q(\Theta, \tau, R) &= \frac{1}{R \cdot L(\mathbf{X}_{\max})} \sum_{r=1}^R L(\mathbf{X}(\Theta, r)) + \tau \cdot \frac{1}{R \cdot T_{\max}} \sum_{r=1}^R T(\Theta, r) = \\ &= \frac{1}{R} \cdot \left(\frac{1}{L(\mathbf{X}_{\max})} \sum_{r=1}^R L(\mathbf{X}(\Theta, r)) + \frac{\tau}{T_{\max}} \sum_{r=1}^R T(\Theta, r) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

for R GA runs, where $L(\mathbf{X}(\Theta, r))$ and $T(\Theta, r)$ are the route length (cost) and runtime in GA run r . Formally, the GA deep parametrization problem becomes

$$\Theta^*(\tau) \in \arg \min_{\Theta \in \Theta} Q(\Theta, \tau) = \arg \min_{\Theta \in \Theta} \left(\frac{\mathbb{E}[L(\mathbf{X}(\Theta))]}{L(\mathbf{X}_{\max})} + \tau \cdot \frac{\mathbb{E}[T(\Theta)]}{T_{\max}} \right), \quad (4)$$

where Θ is the feasible set of all possible GA parameter configurations. So, optimization problem (4), according to the above-listed parameter configurations, is to be solved in at least 10-dimensional subspace of heterogeneous dimensions (to be stricter, it is rather 20-dimensional subspace or close to that, but some of those N parameters still can be almost optimally set due to their impact on both the route length and runtime is very weak). Grid search would be too expensive here, so the depth implies involving a metaheuristic that would be a higher-level optimizer over those N parameters. It can be, for example, another (“external”) GA used for fine-tuning the (“internal”) GA, which is applied for approximately solving the given mTSP. This formulation shows that GA deep parametrization is itself an optimization problem over algorithm configurations. Moreover, formal presentation (4) is practically a harder problem:

$$\Theta^*(R, \tau) \in \arg \min_{\Theta \in \Theta} Q(\Theta, \tau, R) = \arg \min_{\Theta \in \Theta} \left(\frac{1}{L(\mathbf{X}_{\max})} \sum_{r=1}^R L(\mathbf{X}(\Theta, r)) + \frac{\tau}{T_{\max}} \sum_{r=1}^R T(\Theta, r) \right). \quad (5)$$

Just like the solution of (4), the solution of (5) depends on the runtime weighting coefficient, but it can be accepted at a reasonable level beforehand. A more annoying aspect is the number of GA runs: if it is fewer than what the statistically stable solution requires, the solution of (5) will be not even suboptimal with respect to the mTSP route length minimization.

Metagame. Different GA parameter configurations can lead to different approximate solutions of the same optimization problem, and their performance may vary depending on the structure of the mTSP instance being solved. Consequently, selecting the best configuration becomes a decision problem at a higher level than the optimization task formulated by (5). This higher-level decision problem can be interpreted as a metagame, where competing strategies correspond to different algorithm configurations. The players of the metagame may be defined in two main ways. The first variant is considering configurations as competing strategies, where

each configuration competes against others in terms of performance on problem instances. The second variant is a decision maker versus problem environment, where the algorithm designer chooses configuration and the environment chooses mTSP instance. The second variant leads to a robust optimization interpretation, where for a set of problem instances $\{\text{mTSP}_t\}_{t=1}^I$ representing different maritime cargo routing tasks a metagame $K \times I$ payoff matrix

$$[\bar{q}(\Theta_k, \text{mTSP}_t)]_{K \times I} \quad (6)$$

is constructed, where

$$\bar{q}(\Theta_k, \text{mTSP}_t) = \mathbb{E}[q(\Theta_k, \text{mTSP}_t)] \quad (7)$$

is the expectedly best objective value found by GA with N -element configuration (1) Θ_k on instance t , $k = \overline{1, K}$. This structure resembles a decision matrix under uncertainty, where rows of matrix (6) correspond to GA configurations and columns correspond to mTSP instances.

The interaction between algorithm configurations and mTSP instances can be interpreted as a two-player zero-sum game, in which the GA designer tries to minimize the payoff, while the environment “selects” mTSP instances that maximize difficulty [12]. The equilibrium of this game yields a mixed strategy over configurations, meaning that several GA parametrizations may be used probabilistically [13].

Timing trade-off. The GA parametrization metagame can be transformed into a «silent duel» type timing game, where acting later (e. g., waiting for greater number of GA runs or postponing the early stop [1, 3, 5, 8]) increases success probability and acting too late risks losing the opportunity [14, 15]. Thus, the GA designer faces a trade-off between exploration and risk. A similar trade-off appears in GA evolution, though in a different form. Indeed, a GA designer must choose parameters controlling when exploration turns into exploitation, for example: mutation probability, crossover probability, elitism, selection pressure, stopping generation. These parameters determine how long the algorithm keeps exploring before committing to refinement. Therefore, GA evolution has a temporal structure, where exploration phase is followed by exploitation phase. Choosing the point where exploitation starts dominating is analogous to choosing when to «fire» in a silent duel [15]. The mapping of the silent duel into GA evolution is presented in Table 1.

Table 1 – Silent duel and GA evolution correspondence

Silent duel	GA evolution
Firing time moment	Switch from exploration to exploitation
Hit probability	Probability of discovering a good solution
Opponent uncertainty	Stochastic search space
Duel strategy distribution	Distribution of algorithm behaviors

So, the GA configuration indirectly determines a distribution of «search commitment times», where, for example, high mutation rate leads to longer exploration phase, and high elitism and selection pressure leads to earlier exploitation. The timing variable can be taken as the generation index (discrete silent duels are studied in [14, 15] and particularly in [16]).

Discussion and conclusion. GAs provide a flexible and powerful framework for solving the mTSP in maritime cargo delivery systems, but their performance strongly depends on appropriate parametrization and careful design of evolutionary operators. Population size, chromosome representation, selection methods, crossover operators, mutation strategies, and constraint handling mechanisms all influence the balance between exploration and exploitation in the search process. They can be balanced in three ways: using an external GA for fine-tuning the internal GA, solving a metagame between GA parametrizations and mTSP instances, solving a silent duel between exploration-versus-exploitation parameters and mTSP instances. So, the GA parametrization problem is modeled as a multi-level (deep) antagonistic game between the

algorithm designer and the problem generator, wherein a GA configuration implicitly defines a timing strategy for committing to promising solutions, and the silent-duel analogy simply highlights the temporal risk-versus-reward structure of exploration versus exploitation. Future research may focus on hybridizing metaheuristic and game-model frameworks to fine-tune the external GA. Such approaches have the potential to further simplify the process of approximately solving large (intractable) maritime mTSPs and similar vessel operation management problems at high quality and efficiency.

REFERENCES

1. Romanuke Vadim, Romanov Andrii & Malaksiano Mykola (2022). Pseudorandom number generator influence on the genetic algorithm performance to minimize maritime cargo delivery route length. *Pomorstvo*, 36:2, 249–262. <https://doi.org/10.31217/p.36.2.9>.
2. Romanuke Vadim (2025). Parallelization of multiple traveling salesman problem without returning to the starting node. *International Journal of Operational Research*, 53:1, 1–34. <https://doi.org/10.1504/IJOR.2025.146110>.
3. Romanuke Vadim, Romanov Andrii & Malaksiano Mykola (2023). A genetic algorithm improvement by tour constraint violation penalty discount for maritime cargo delivery. *System Research and Information Technologies*, 2, 104–126, <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2023.2.08>.
4. Király A. & Abonyi J. (2015). Redesign of the supply of mobile mechanics based on a novel genetic optimization algorithm using Google Maps API. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 38, 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2014.10.015>.
5. Bushuyeva N., Ivko A., Romanov A., Malaksiano M. & Romanuke V. (2024). Genetic algorithm for maritime route planning projects with improved constraints. *Proceedings of the 5th International Workshop IT Project Management*, 22 May 2024, Bratislava, Slovak Republic. *CEUR Workshop Proceedings*, 3709, 126–140. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3709/paper11.pdf>.
6. Chambers L. D. (2000). *The Practical Handbook of Genetic Algorithms*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781420035568>.
7. Katoch S., Chauhan S. S. & Kumar V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 80, 8091–8126. <https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6>.
8. Romanuke Vadim, Romanov Andrii & Malaksiano Mykola (2022). Crossover operators in a genetic algorithm for maritime cargo delivery optimization. *Journal of ETA Maritime Science*, 10:4, 223–236. <https://doi.org/10.4274/jems.2022.80958>.
9. El-Ghazali Talbi (2009). *Metaheuristics : From Design to Implementation*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. <https://doi.org/10.1002/9780470496916>.
10. Toth Paolo & Vigo Daniele (2014). *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications*. SIAM. <https://doi.org/10.1137/1.9781611973594>.
11. Curkovic Petar (2025). Optimization for sustainability: A comparative analysis of evolutionary crossover operators for the Traveling Salesman Problem (TSP) with a case study on Croatia. *Mathematical and Computational Applications*, 30:6, 129. <https://doi.org/10.3390/mca30060129>.
12. Romanuke Vadim (2021). Finite approximation of zero-sum games played in staircase-function continuous spaces. *KPI Science News*, 4, 19–38. <https://doi.org/10.20535/kpissn.2021.4.242769>.
13. Romanuke Vadim (2015). Discretization of continuum antagonistic game on unit hypercube and transformation of multidimensional matrix for solving of the corresponding matrix game. *Journal of Automation and Information Sciences*, 47:2, 77–86. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v47.i2.80>.
14. Romanuke Vadim (2024). Pure strategy saddle points in the generalized progressive discrete silent duel with identical linear accuracy functions. *Journal of Information and*

Organizational Sciences, 48:1, 81–98. <https://doi.org/10.31341/jios.48.1.4>.

15. Romanuke Vadim (2024). Pure strategy solutions of the progressive discrete silent duel with generalized identical quadratic accuracy functions. *Discrete Applied Mathematics*, 349, 215–232. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2024.02.015>.

16. Gkekas Angelos, Apostolidou Athina, Vernadou Artemis & Kehagias Athanasios (2025). Learning optimal strategies in a duel game. *Games*, 16:1, 8. <https://doi.org/10.3390/g16010008>.

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА

Щедролосєв О.В., Соценко В.В., Коновалова Г.В.

Херсонський навчально-науковий інститут

Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова
(Україна)

Вступ. Сучасна морська індустрія перебуває на етапі глобальної трансформації, зумовленої необхідністю радикального скорочення викидів парникових газів. Згідно з оновленою Стратегією Міжнародної морської організації (ІМО) від 2023 року, галузь має досягти нульового рівня викидів (Net-Zero) до 2050 року. Враховуючи, що понад 90% світової торгівлі забезпечується морським транспортом, питання енергоефективності суднових енергетичних установок (СЕУ) стає критичним не лише з екологічної, а й з економічної точки зору. Оптимізація споживання енергії на борту судна безпосередньо впливає на його конкурентоспроможність на фрахтовому ринку.

Актуальність досліджень. З 1 січня 2023 року набули чинності нові вимоги MARPOL (Додаток VI) щодо індексу енергоефективності існуючих суден (ЕЕХІ) та індикатора вуглецевої інтенсивності (СІІ). Кожне судно отримує рейтинг від А до Е. Судна з низьким рейтингом (D або E) змушені будуть впроваджувати плани коригувальних дій або виводитися з експлуатації. Це створює нагальну потребу в розробці та впровадженні технічних рішень, які дозволяють модернізувати існуючий флот з мінімальними капітальними витратами (CAPEX) при забезпеченні максимальної операційної ефективності (OPEX). Гібридизація СЕУ та перехід на "зелені" види палива розглядаються як найбільш дієві інструменти досягнення цих цілей.

Постановка задачі. Метою даної роботи є комплексне дослідження методів підвищення енергоефективності СЕУ, що базуються на інтеграції систем накопичення енергії (Energy Storage Systems – ESS) та аналізі переходу на альтернативні енергоносії. Основними задачами є:

1. Аналіз впливу гібридизації на питому витрату палива в різних режимах експлуатації.
2. Розрахунок потенціалу зниження викидів CO_2 при заміні традиційного важкого мазуту на метанол та аміак.
3. Оцінка ефективності систем утилізації тепла вихлопних газів (WHR) у комбінації з електрохімічними накопичувачами

Основний матеріал. Традиційна архітектура СЕУ, заснована на дизельних двигунах, досягла своєї технологічної межі ККД. Подальше вдосконалення потребує перегляду концепції розподілу енергії на борту.

Системи утилізації тепла та гібридизація

Енергія, що втрачається з вихлопними газами та системою охолодження двигуна, складає до 50 % від енергії палива. Впровадження систем утилізації тепла (Waste Heat Recovery System – WHRS) з використанням органічного циклу Ренкіна (ORC) дозволяє перетворювати це тепло в електроенергію. В інтегрованих системах ця енергія може накопичуватися в акумуляторних батареях (BSS).

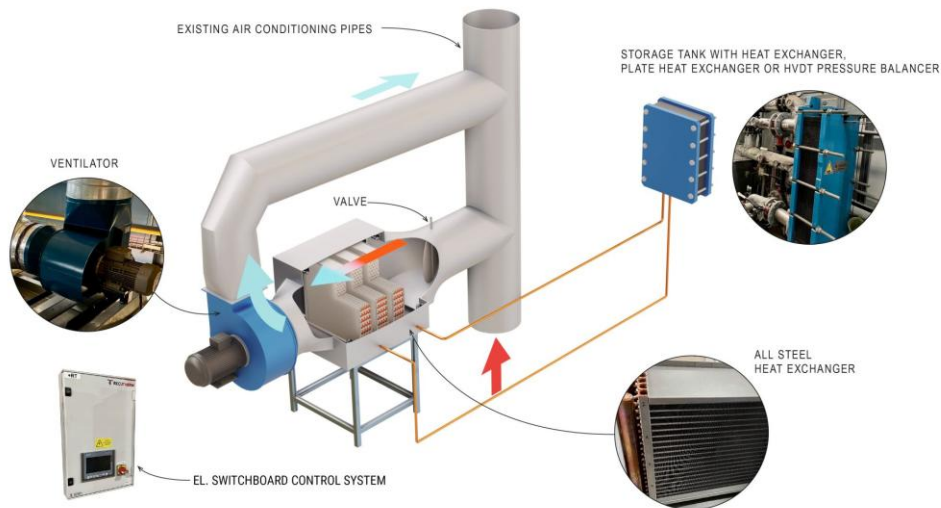


Рисунок 1 – WHRS-RECUTHERM

Використання валогенераторів з технологією відбору/подачі потужності (PTO/PTI) у поєднанні з накопичувачами енергії дозволяє реалізувати режим «Peak Shaving» (зрізання піків). Це означає, що головний двигун може працювати зі сталим оптимальним навантаженням, а всі різкі зміни потреби в потужності покриваються за рахунок акумуляторів.

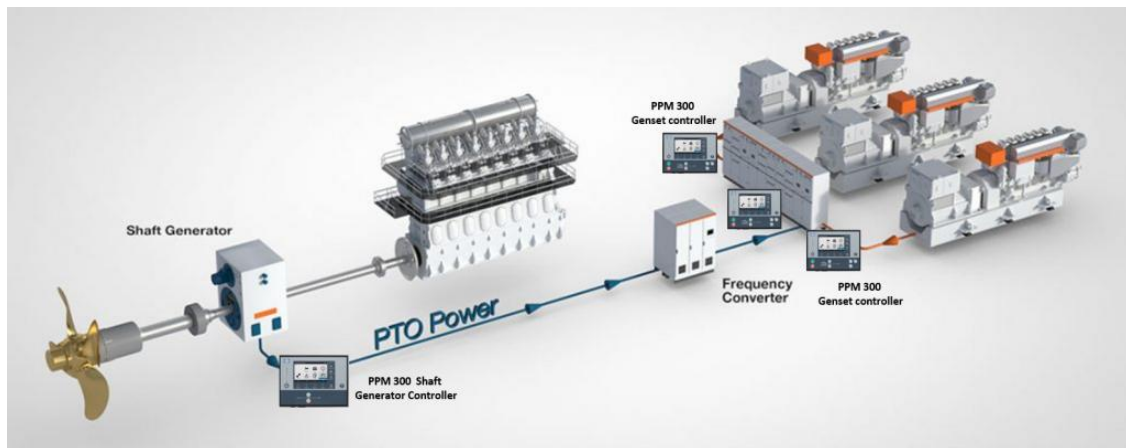


Рисунок 2 — PTO system – Royalstar

Математичне обґрунтування енергоефективності

Для оцінки енергетичної ефективності судна використовується формула конструктивного індексу енергоефективності (EEDI), спрощена версія якої має вигляд:

$$EEDI = \frac{Power \times C_F \times SFC}{Capacity \times V_{ref}}$$

де *Power* – потужність енергетичної установки, *C_F* – вуглецевий коефіцієнт палива, *SFC* – питома витрата палива, *Capacity* – дедвейт судна, *V_{ref}* – швидкість судна.

Впровадження гібридних систем безпосередньо впливає на чисельник даної формули, знижуючи *SFC* та ефективну потужність, необхідну від ДВЗ.

Порівняльний аналіз альтернативних видів палива

Перехід на альтернативні види палива є найскладнішим, але найбільш перспективним напрямком. Кожен тип палива вимагає специфічних конструктивних змін паливної системи та систем зберігання (табл. 1).

Таблиця 1 – Техніко-економічне порівняння перспективних видів суднового палива

Тип палива	Мазут	ЗПГ	Метанол	Аміак
Енергоємність (МДж/кг)	40.5	49.5	19.9	18.6
Температура зберігання, С	+40..+60	-162	Атмосферна	-33
Потенціал зниження ГРГ	0%	20-25%	До 95%	До 100%
Питомий об'єм (відносно Мазута)	1.0	1.8	2.4	3.1

Як видно з таблиці, аміак та метанол мають значно нижчу енергоємність порівняно з мазутом, що потребує збільшення об'ємів паливних танків у 2,5–3 рази для збереження тієї ж дальності плавання.

Цифровізація та інтелектуальне управління

Сучасна СЕУ не може бути енергоефективною без системи інтелектуального моніторингу. Використання «цифрових двійників» судна дозволяє прогнозувати знос вузлів двигуна та оптимізувати витрату палива залежно від гідрометеорологічних умов у реальному часі.

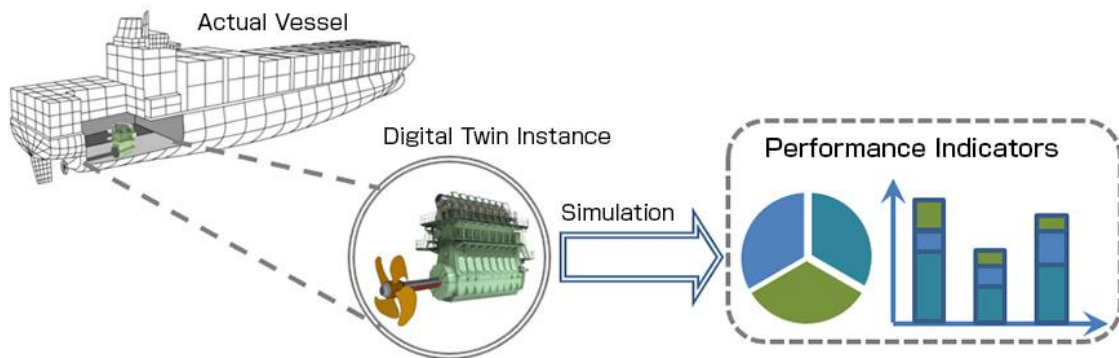


Рисунок 3 – Digital Twin

Результати досліджень. У ході дослідження було змодельовано роботу енергетичної установки середньотоннажного танкера під час переходу довжиною 3000 морських миль. Аналіз показав, що при інтеграції літій-іонної батареї ємністю 2,5 МВт·год та системи валогенератора, загальна економія палива склала 14,2%.

Таблиця 2 – Економічні та екологічні показники після модернізації

Показник	Базовий варіант	Гібридний варіант	Ефект, %
Витрати палива, т/доба	32.4	27.8	-14.2
Викиди CO ₂ , т/рік	35000	29800	-14.8
Операційні витрати, долар/рік	2.1 млн	1.85 млн	-11.9

Важливим результатом є те, що гібридизація дозволила судну перейти з рейтингу СІ «D» у рейтинг «B», що гарантує його безперешкодну експлуатацію в територіальних водах ЄС протягом наступних 10 років без додаткових штрафних санкцій.

Висновки. Впровадження гібридних систем є найбільш раціональним шляхом для модернізації існуючого флоту з метою відповідності вимогам ЕЕХІ та СІ. Використання систем накопичення енергії дозволяє не лише економити паливо, а й зменшувати кількість запусків допоміжних дизель-генераторів, що подовжує їхній ресурс. Повний перехід на безвуглецеве паливо (аміак, водень) на даному етапі стримується відсутністю інфраструктури та високою вартістю технологій зберігання, тому перехідним етапом є використання метанолу та гібридизація. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення уніфікованих алгоритмів управління енергопотоками в складних мультипаливних СЕУ.

ЛІТЕРАТУРА

1. DNV. Maritime Forecast to 2050 : Energy Transition Outlook. Høvik : DNV GL, 2024. 156 p.
2. Wärtsilä Encyclopedia of Marine Technology. 3rd Edition. Helsinki : Wärtsilä, 2023. 412 p.
3. Molland A. F., Turnock, S. R., Hudson D. A. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Cambridge: GB. Cambridge University Press, 2011. 544 p.
4. Hirdaris S. Lecture Notes on Basic Naval Architecture. Helsinki : Science + technology, 2021. 139 p.
5. Lytvynenko D., Schedrolosiev O., Sotsenko V. Introduction to shipbuilding : study guide. Mykolaiv : NUOS, 2025. 167 p.

УДК 629.5.064.2

ОСОБЛИВОСТІ БУНКЕРУВАННЯ МОРСЬКИХ СУДЕН З ДВИГУНАМИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ АМІАК ЯК ПАЛИВО

Кісетов Ю. В., Личко Б. М.
Національний університет кораблебудування
(Україна)

Вступ. Впровадження аміаку як морського палива пов'язане з його здатністю майже повністю знищувати викиди CO₂. У контексті глобального енергетичного переходу та посилення вимог ІМО до 2050 року аміак вважається найбільш життєздатною альтернативою традиційним вуглецевим паливам. Однак, на відміну від традиційних нафтопродуктів, аміак є дуже токсичним і корозійним, що накладає суворі вимоги до процесів його перевантаження та зберігання [1–3].

Для забезпечення безпеки бункерування необхідно враховувати властивості аміаку:

- температура: рідка фаза підтримується при -33,4 °С;
- енергетична інтенсивність: найнижча калорійність становить 18,6 МДж/кг, що у 2,3 рази менше, ніж у паливного мазуту;
- токсичність: поріг запаху 5–50 ppm. При концентраціях 300 ppm і вище існує негайна загроза життю. Це визначає необхідність «нульового витоку» під час операцій з бункерування;
- корозія: схильність до корозійних тріщин у сталях при присутності слідів кисню [5].

Актуальність досліджень. Накопичений досвід експлуатації суден, які мають на борту аміак, перехід від пілотних проектів до комерційної експлуатації (на прикладі суден Yara Euclid та балкерів Kamsarmax) виявили критичну потребу стандартизації процедур бункерування через надзвичайну токсичність і корозійність аміаку [2–4].

Формулювання проблеми. Враховуючи існування особливостей процесів бункерування аміаку виконати відповідний порівняльний аналіз з урахуванням існуючих ризиків, вимог безпеки, характеристик необхідного обладнання і систем, застосовуваних технологій на прикладі суден різної водотонажності.

У сучасній практиці встановлено три основні методи бункерування аміаку, кожен з яких має свої особливості [5–9].

Судно до судна (STS). Цей метод став домінуючим для флоту великої місткості (контейнеровози, балкери). Використовуються спеціалізовані судна для бункерування. Серед переваг – можливість проводити операції на рейдах, мінімізуючи ризики для інфраструктури порту.

Від берега до судна. Використовується на регулярних лініях (пороми, судна-живлення). Потрібен стаціонарний кріогенний термінал із покращеною системою очищення парів.

Вантажівка-судно. Використовується переважно для малих суден. Обмежений невеликою кількістю пального та підвищеним ризиком через кілька підключень.

Розглянемо особливості обладнання і систем бункерування аміаку. Аміачна бункерна станція є високоавтоматизованим комплексом і повинна включати такі компоненти:

- QC/DC (Quick Connect/Disconnect): швидкознімні з'єднання з «сухим» розривом. Вони оснащені подвійними ущільненнями, стійкими до корозійних тріщин. Це дозволяє підключати та від'єднувати шланги миттєво з мінімальним протіканням;
- аварійні з'єднання (ERC – Emergency Release Couplings): активуються при неконтрольованому переміщенні судна, з'єднання спрацьовує автоматично, вимикаючи клапани за мілісекунди;

- система повернення пари (VRS – Vapor Return System): під час процесу передачі витіснені пари аміаку не можуть бути викинуті в атмосферу. Система повертає їх на бункерувальну установку, де їх або знову зріджують, або нейтралізують у водоочисниках;

- система аварійного вимкнення: дворівнева система, яка синхронізує вимкнення насосів і закриття клапанів з обох боків процесу бункерування.

Сфери безпеки та ризиків визначаються доступністю таких технологій:

- система зменшення викидів аміаку (ARMS – Ammonia Release Mitigation Systems); Включає так звані системи водяних завіс – «водяні штори» (Water Curtains). Аміак дуже гігроскопічний, а водяний туман ефективно поглинає його пари, запобігаючи їх поширенню;

- виявлення витоків: використання лазерних та електрохімічних сенсорів з порогом відгуку 20 ppm;

- безпечні притулки (Safe Havens): спеціальні герметично обладнані приміщення на борту з надлишковим тиском і фільтрацією повітря, де екіпаж може сховатися у разі аварійної ситуації. Надбудови судна проектується з урахуванням повної герметизації. У разі спрацьовування датчиків протікання вентиляційна система рециркулює повітря через вуглецеві фільтри, створюючи надлишковий тиск у приміщенні;

- зони виключення: бункерування в порту встановлює радіус до 100-500 метрів, у якому обмежуються інші операції (методологія управління ризиками SIMOPS – Simultaneous Operations). Навколо бункеровочного вузла встановлюється динамічна зона виключення. Використання лазерних газоаналізаторів (Open Path Gas Detectors), які миттєво фіксують хмару газу на відстані до 200 метрів.

З'явилися нові особливості при використанні аміаку:

- вимоги до матеріалів: заборона використання міді, цінку та їх сплавів у всіх системах, що контактують з NH_3 ;

- кваліфікація особового складу: запровадження обов'язкових сертифікатів «Поводження з аміачним паливом» (Ammonia Fuel Handling) для старших офіцерів і палубної команди;

- процедура продування (Purging): обов'язкове використання азоту (N_2) для промивання шлангів до і після передачі палива, щоб уникнути утворення вибухонебезпечних сумішей з повітрям.

З 1 січня 2026 року набули чинності нові вимоги до пакування та тестування систем зберігання токсичного палива. З 1 липня 2026 року очікується, що набудуть чинності поправки до Кодексу IGC, які дозволяють використовувати аміак як паливо для газозовів, що перевозять його як вантаж.

Основний матеріал. Для аналізу особливостей процесів бункерування аміаку суден різної водотонажності було обрано три типи суден, що представляють основні сегменти світового флоту. Розрахунки базуються на коефіцієнті заміщення по енергії 2,3 (у порівнянні з мазутом) та густині аміаку (при $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$) — 680 кг/м^3 . Оцінений запас палива для всіх суден вважається рівним 20 дням (+20% запасу).

Аналіз специфіки за типами суден.

Малий флот (Feeder / Short-sea). Характеризуються низьким обсягом передачі пального та підвищеними ризиками через велику кількість з'єднань. Також для невеликих суден проблемою є обмеження ваги паливних цистерн. Особливості:

- використання цистерн типу C (під тиском), що виключає етап охолодження, оскільки паливо зберігається при температурі навколишнього середовища.

- можливо одночасно бункеруватися з декількох цистерн.

- час роботи скорочується до 5–6 годин через відсутність криогенних процедур, але обмежений низькою продуктивністю насосів.

Середній флот (Panamax / Aframax). Особливості:

- використання повністю охолодженого аміаку ($-33\text{ }^{\circ}\text{C}$). Це вимагає обов'язкової

інертизації азотом.

- логістика – виключно «судно-судно» з використанням бункерувальних барж місткістю 5000-8000 м³.
- час операції: близько 10 годин.

Великотоннажний флот (VLCC / VLOC). Обсяги палива понад 4000 м³ створюють логістичні труднощі. Особливості:

- щоб досягти швидкості 1200 м³/год, необхідно одночасно використовувати 3–4 лінії бункерування, що збільшує ризик протікання на з'єднаннях.
- безпека: зона виключення для бункерування VLCC у 2026 році досягне 500 метрів.
- час роботи: незважаючи на високі швидкості перекачування, через тривалу підготовку та перевірку всіх ліній, загальний час становить 14-16 годин.

Результати досліджень. У табл. 1, 2 наведено характеристики процесу бункерування трьох класів суден – Feeder container ship, Panamax bulk carrier, VLCC / Capesize.

Таблиця 1 – Характеристики процесу бункерування

Параметр	Feeder (Контейнеровоз)	Panamax (Балкер)	VLCC / Capesize
Дедвейт (DWT), т	15000 (1500 TEU)	75000	300000
Добове споживання мазуту (MDO экв.), т/доб	15	30	55
Необхідна маса NH ₃ , т	828	1656	3036
Необхідний обсяг NH ₃ , м³	1218	2435	4465
Рекомендований метод бункерування	Truck-to-Ship / Barge	Ship-to-Ship (STS)	STS / Shore Terminal
Швидкість перекачування, м³/ч	250	600	1200

Таблиця 2 – Розрахунок операційного циклу (зведений графік часових витрат)

Етап	Feeder (C-type)	Panamax (Fully Refrig.)	VLCC (Fully Refrig.)
Швартування та підготовка	1,5	2,0	3,0
Інертизація та підключення	1,0	1,5	2,5
Охолодження (Cool-down)	0,0 (н/д)	0,75	1,5
Перекачування	4,8	4,0	3,7
Продування та відшвартування	1,0	1,75	3,0
Усього, год	~8,5	~10	~13,7

Висновки. Бункерування аміаку вимагає радикальної зміни стандартів безпеки та підготовки персоналу. Ключовими факторами успіху є використання закритих систем передачі палива (з нульовими витоками), автоматизація процесів моніторингу та міжнародна стандартизація роз'ємів бункерувальних шлангів.

Масштаб судна впливає на логістику бункерування аміаку. Зрозуміло, що не існує «універсального стандарту» для всіх суден: малі фідери та гігантські танкери потребують принципово різних підходів до швидкості перекачування та організації зон безпеки.

Капітальні витрати на систему бункерування аміаку на 30–40% вищі, ніж, наприклад, у таких же систем для зрідженого природного газу. Це пов'язано з необхідністю використання певних сортів нержавіючої сталі та складної електроніки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ammonia as marine fuel? Benefits, challenges, and smart adoption / URL:

<https://www.wartsila.com/insights/article/ammonia-fuel-for-thought-in-our-deep-dive#all-about-ammonia> (дата звернення 05.03.2026).

2. IMO MSC.1/Circ.1687. Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Ammonia as Fuel : [approved by the Maritime Safety Committee on December 2024] / International Maritime Organization/ URL: <https://www.imo.org> (дата звернення 05.03.2026)..

3. ISO 23269-1:2025. Ships and marine technology — Ammonia fuel systems — Part 1: Design and testing of bunkering manifolds / International Organization for Standardization. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:23269:-1:ed-1:v1:en> (дата звернення 05.03.2026).

4. MAN Energy Solutions. Two-stroke Ammonia Engine and Fuel Supply System Specification. URL: <https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/tools/man-b-w-two-stroke-engine-engine-operating-on-ammonia.pdf> (дата звернення 05.03.2026).

5. Maritime Forecast to 2050: Ammonia Infrastructure and Safety Module. URL: <https://www.dnv.com> <https://www.dnv.com/maritime/maritime-forecast> (дата звернення 05.03.2026).

6. FP23-01_Ammonia — Safety and Operational Guidelines — Bunkering. URL: https://sgmf.info/product/fp23-01_ver1-0_ammonia-safety-and-operational-guidelines-bunkering (дата звернення 05.03.2026).

7. ClassNK. Guidelines for Safety Operation for Ammonia-Fueled Vessels (Version 1.0). https://download.classnk.or.jp/guidelines/gl_ammonia_operation_e.pdf (дата звернення 05.03.2026).

8. Wärtsilä Marine Power. Scaling Ammonia Fuel Systems: From Tugboats to VLCCs. https://www.researchgate.net/publication/398737581_Safety_of_Ammonia_for_use_in_Ships (дата звернення 05.03.2026).

9. NH₃CRAFT - SAFE AND EFFICIENT STORAGE OF AMMONIA WITHIN SHIPS. https://www.researchgate.net/profile/Spyros-Hirdaris/publication/392191633_Pertinent_Technical_Rules_on_the_Safe_and_Efficient_Storage_of_Ammonia_onboard_Ships/links/6838302fd1054b0207f68eb6/Pertinent-Technical-Rules-on-the-Safe-and-Efficient-Storage-of-Ammonia-onboard-Ships.pdf (дата звернення 05.03.2026).

10. International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels. <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/igf-code.aspx> (дата звернення 05.03.2026).

ЕКОДИЗАЙН ТА ІННОВАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ПІДШИПНИКІВ В СУДНОБУДУВАННІ

Пізінцалі Л.В., Войнович М.В., Дімова С.М.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Особливістю сьогодення світу є глобальна екологічна криза, наслідком якої стали незворотні зміни у навколишньому середовищі (НС). Вона змінила вектор цінностей технологічної цивілізації, який розгортає політику будь якої держави на екологічні орієнтири – егоцентризм на екоцентризм з установленням та підтриманням рівноправних, гармонічних взаємовідносин суспільства та природи. Особливо гостро постає питання забруднення водних ресурсів. Перш за все, це відноситься до суднобудівної галузі.

Екодизайн у суднобудуванні – це проектування суден з урахуванням мінімізації шкідливого впливу на довкілля, що включає зниження викидів (стандарти DE-Tier III), використання екологічних матеріалів, альтернативних джерел енергії та стійких технологій, що викликано посиленням вимог Міжнародної морської організації (ІМО).

Автори підкреслюють, що одним із світових трендів в екодизайні суднобудування є впровадження полімерно-композиційних матеріалів (ПКМ) в суднобудівну галузь.

Нема сумнівів, що стан суднобудування відображає рівень науково-технічного потенціалу країни, так як саме судно являє собою сукупність досягнень в металургії, машинобудуванні, електроніці і новітніх технологій.

Суднобудівна галузь володіючи науково-технічним і виробничим потенціалом, грає важливу роль в багатьох суміжних галузях, в економіці держави в цілому, впливає на її обороноздатність і політичне становище в світі. Крім того, розвиток технологій суднобудування держави це забезпечення екологічних вимог світового суспільства.

Автори впевнені, що обсяг використання ПКМ) – один із показників технічного рівня розвитку суднобудування сьогодні тому аналіз їх використання у судових підшипниках є актуальним дослідженням.

Матеріали та методи. Морські судна продовжують залишатися основою глобальної міжнародної торгівлі та морська промисловість забезпечує близько 80% всесвітнього торгового обороту. Разом з тим, індустрія морських перевезень є одним із найбільших джерел забруднення навколишнього середовища та викидів вуглекислого газу на планеті, а морські судна витрачають до 4.4 млн. барелів нафти на день, що становить десять відсотків від споживання нафти у всьому транспортному секторі [1].

Однак різні оцінки стану Світового океану показують, що біологічні ресурси прибережних морських районів продовжують деградувати [2], а з урахуванням очікуваного збільшення людства до 2050 року до 9,7 мільярда людей [3], негативний вплив на морське середовище значно зростає.

У контексті сталого розвитку морського транспорту та зеленої економіки, особливу увагу приділяють: скороченню забруднення з суден; захисту атмосфери шляхом впровадження нових лімітів на викиди сірки; керування баластними водами; контролю за перевезенням небезпечних та шкідливих речовин; збереженню прибережних та морських районів тощо. Крім того, актуальним є виробництво екологічних матеріалів для суднобудування, зокрема судових підшипників.

В останні роки все більше уваги приділяється розробці матеріалів, які можуть знижувати вплив суден на довкілля. Наприклад, дослідження в галузі використання біорозкладних композитів та екологічно чистих антикорозійних покриттів спрямовані на створення рішень, що мінімізують забруднення океанів та інших водойм.

На вибір матеріалів для морських суден впливає: тип судна; призначення; експлуатаційні умови; вимоги до міцності, ваги, корозійної стійкості; вартість, тощо.

Найбільший вплив на НС спричиняє найбільш тривалий етап ЖЦ судна –

«Експлуатація (ремонт і технічне обслуговування)».

Найчастіше із забрудненням морської води, флори та фауни з суден пов'язані розливи нафти, які мають руйнівні наслідки. Широке застосування в механізмах суден підшипників, для змащення яких використовують різні мастила та порушення правил їх використання, також призводить до проникнення нафтопродуктів у воду.

На думку авторів, екодизайн у виборі матеріалів в суднобудуванні, перш за все торкається підшипників.

Підшипники на судні забезпечують надійну роботу механізмів, що обертаються, зменшуючи тертя, підтримуючи вали і передаючи навантаження на корпус. Вони критично важливі для роботи гребного гвинта, кермового керування, двигунів та допоміжного обладнання, запобігаючи зносу та заклиненню в умовах високих навантажень та морської корозії.

Традиційні металеві підшипники вимагають, щоб у дейдвудній трубі знаходилося масло. Його витікання необхідне для нормального функціонування системи. При цьому кормове масло підтікає за борт, а носове у трюм.

Навіть допустимий обсяг підтікання мастила 6 літрів за добу завдає шкоди НС. Витік із дейдвудної труби при пошкодженні кормового валу може перевищувати 1500 літрів! [4].

Нафтопродукти утворюють стійку плівку на воді, перешкоджають проникненню кисню та викликають загибель морських тварин та рослин. Ці речовини здатні накопичуватися в тілах мешканців моря і по харчовому ланцюжку потрапляти в організм людини, отруюючи його, а при витіканні олії у прісних водоймах наслідки відчуває і місцеве населення, отримуючи токсичні речовини разом із водопровідною водою.

Місія ЄС «Відновлення водних ресурсів», розрахована до 2030 року, має на меті захистити та відновити здоров'я (якісні показники) океанів і водних ресурсів за допомогою досліджень та інновацій, залучення громадян і «зелених» інвестицій. Новий підхід Місії розглядатиме океани і водні об'єкти як єдине ціле і відіграватиме ключову роль у досягненні кліматичної нейтральності та відновленні природи [5].

Автори підкреслюють, що ЄС взяв курс на політику Zero Tolerance [6] щодо витоків на морських судах, правовий фундамент якої – міжнародна конвенція MARPOL 73/78, яка регулює запобігання забрудненню з суден. Зокрема: Додаток I: Нафта та нафтопродукти. Нульова толерантність це засіб забезпечення пильного контролю держави за будь-якими проявами тих явищ, які потенційно несуть небезпеку для суспільства та держави.

Перша частина Додатка I Конвенції МАРПОЛ стосується поводження з нафтовмісними відходами машинного відділення. Існують різні покоління технологій та технічних засобів, розроблених для запобігання скиданню таких відходів у море [7, 8].

Політика нульового допуску для суден як джерел забруднення впроваджується все жорсткіше, і розумним рішенням, для нових і вже існуючих суден, на думку авторів, буде перехід на дейдвудні підшипники, що змащуються водою.

Посилення екологічних стандартів та плачевний стан водних ресурсів стимулює пошук та виробництво екологічних матеріалів та систем.

Автори провели аналіз сучасних трендових матеріалів, що використовуються при виготовленні підшипників для забезпечення умов екодизайну (рис. 1).

28 серпня 2025 року Президент України своїм Розпорядженням уповноважив Олексія Соболева на підписання Угоди в рамках Конвенції ООН з морського права про збереження та стале використання морського біологічного різноманіття в районах за межами національної юрисдикції.

«Ця Угода — черговий важливий крок до європейського майбутнього України. Ми підтверджуємо, що питання збереження океанів та морів є частиною нашої європейської та світової екологічної інтеграції. Наше розташування на Чорному та Азовському морях

робить питання морської безпеки та захисту екосистем стратегічними для країни й регіону. Навіть у час війни ми доводимо, що здатні дбати про глобальне довкілля, протистояти кліматичним викликам та боротися з екологічними злочинами агресора», – зазначив Міністр економіки, довкілля та сільського господарства України Олексій Соболев [9].

Результати дослідження. Аналіз матеріалів суднових підшипників показав, що інтеграція принципів екодизайну в суднобудуванні, на прикладі використання новітніх матеріалів підшипників дозволяє:



Рисунок 1 – Екодизайн. Класифікація ПКМ суднових підшипників

- виключити вплив акустичного впливу на НС (шумів), внаслідок низького коефіцієнта тертя;
- за рахунок стійкості до ударних та кромкових навантажень збільшити довговічність вдвічі, ніж, наприклад при використанні гумово-металевих підшипників;
- збільшення терміну служби призводить до скорочення втрат від простою на обслуговуванні;
- швидке обслуговування та ремонт: для робіт з підшипниками не потрібно розбирати весь валопровід, а роботи зі зміни займають не більше кількох годин.

Ґрунтуючись на досвіді експлуатації неметалічних підшипників та ущільнень, наприклад *Thordon* у світі, можна зробити прогноз для українського суднобудування та гідроенергетики.

Висновки. Впровадження екодизайну у суднобудування на прикладі використання

екологічних матеріалів суднових підшипників, здатне:

- знизити рівень забруднення водних ресурсів України;
- вирішити проблеми витоку нафтопродуктів на судах;

Довговічність та надійність використовуваних матеріалів також дозволяють скоротити фінансові витрати на ремонт та обслуговування, уникнути збитків від простою суден та ситуацій, коли у разі витоку мастила судно може бути відбуксоване.

ЛІТЕРАТУРА

1. IMO 2020: як знизити рівень сірки в судовому паливі. Стаття [online]. URL: <https://seacomm.ru/dokumentacija/14324/>.
2. Emissions Gap Report. 2018 // UN Environment. Emissions Gap Report. [online] Режим доступу: URL: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2018>.
3. The UNCTAD Handbook of Statistics. Geneva, 2019. [online] Режим доступу: URL: <https://unctad.org/webflyer/handbook-statistics-2019>.
4. Екологічні матеріали для водного транспорту <https://speranza-ua.com/news/ekologichnye-materialy-dlya-vodnogo-transporta>.
5. Місія ЄС: Відновлення водних ресурсів. Офіс Горизонт Європа в Україні <https://horizon-europe.org.ua> > ... > Місії ЄС.
6. Іванова А. В. Особливості застосування принципу «Zero tolerance policing» в рамках національної безпеки держави / А. В. Іванова // Актуальні проблеми політики : зб. наук. пр. / редкол.: С. В. Ківалов (голов. редкол.), Л. І. Кормич (голов. ред.), І. М. Милосердна (відп. ред.) [та ін.]; НУ «ОЮА», Південноукр. центр гендер. проблем. – Одеса: Фенікс, 2019. – Вип. 64. – С. 194-209. URI <https://hdl.handle.net/11300/14570>.
7. МАРПОЛ 73/78. Wikipedia. https://uk.wikipedia.org/wiki/МАРПОЛ_73
8. Міжнародна конвенція по запобіганню забрудненню з...Офіційний портал Верховної Ради України <https://zakon.rada.gov.ua> > ...
9. Україна підписала Угоду про відкрите море, яка ...Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України...<https://me.gov.ua> > News > Detail.

RESEARCH ON THE OPERATIONAL RELIABILITY OF A MARINE VESSEL'S PROPELLER SHAFT

Strelbitskyi V.V.
Odessa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. Marine vessels play a key role in global trade, as they allow for the transportation of a wide range of goods. Without them, modern logistics would be unimaginable. The performance of a vessel depends on the reliable operation of its propulsion system. The propeller shaft is a crucial component of the propulsion system, responsible for transmitting power from the main engine to the propeller [1]. It consists of the propeller shaft, intermediate shafts, bearing supports, and connecting couplings. Any malfunction of the shaft line during operation means that the vessel loses its ability to move and steer [1, 2]. In open sea conditions, especially in adverse weather conditions (storm), a vessel that is unable to move is unable to withstand the effects of waves, which can cause it to turn broadside to the wave and subsequently capsize.

Relevance of research. Shaft line malfunctions lead to the stoppage or limitation of the vessel's activities, which results in either lost profits for the owner/operator or the impossibility of accomplishing the assigned tasks. Moreover, unscheduled shaft line repairs entail significant additional costs. Therefore, the reliability of the propeller shaft directly affects the safety of the vessel's operation, the economy and efficiency of maritime transportation. In the conditions of long-term operation, the propeller shaft is exposed to variable loads, vibrations, corrosion and wear [1,3]. Therefore, studying its operational reliability is an important task in the design, operation, and maintenance of ships.

Statement of the problem. As practice shows, failures in ship propulsion systems can occur due to equipment failure, human error, and external events [1, 3–7]. These failures in propulsion systems are the most recognizable hazards on ships, which can lead not only to a stoppage but also to a collision with other ships. Deteriorating weather conditions and sea conditions directly increase the load on the engine, which accelerates wear and shortens the service life of the propeller shaft [4–7].

It should be noted that conclusions about failures in components and elements can only be made based on the results of ship operation. The results obtained serve as a basis for identifying the weak points of the design, as well as assessing the reliability of individual units and elements of the project. It is also worth noting that the issues of reliability of propeller shafts of floating cranes are insufficiently covered in the available sources.

Main material. Three cargo ships that were operated in the Black Sea ports were selected as objects.

The frequency of shaft inspections is as follows:

- 1) intermediate inspections are performed every 2.5 years;
- 2) full inspections are performed every 5 years (in the docks).

During the inspection, the following tasks are performed:

- a) checking the condition of the propeller shaft;
- b) measuring the wear of the bearings;
- c) checking the propeller;
- d) inspecting the propeller shaft device.

During operation, ultrasonic, vibration, and capillary non-destructive testing methods were used to determine the actual condition.

Research results. Analysis of data from ship and engine logs, and repair reports, has allowed the following defects of the propeller shafts to be identified:

- 1) the most dangerous defect is fatigue cracks;
- 2) corrosion-fatigue damage

- 3) wear of the necks and bearing surfaces;
- 4) cavitation damage;
- 5) fretting corrosion;
- 6) plastic deformation.

It is established that:

- 1) the vast majority (60–70%) of all shaft failures are due to fatigue (including corrosion);
- 2) 15–20% are due to wear and bearing failures;
- 3) up to 10% are due to other defects

It is established that the failure of propeller shafts of dry cargo ships is the result of a complex effect of several factors. The basis is fatigue failure, provoked by cyclic loads and stress concentration zones. This process is significantly aggravated by corrosion phenomena, which contribute to the accelerated development of cracks. Additional factors that accelerate degradation are operational defects, such as wear and misalignment.

The service life of a ship's propeller shaft can vary depending on various factors, including the type of ship, operating conditions, and the frequency and intensity of engine usage.

Analyzing failure data allows engineers and designers to make necessary adjustments to the design, improving its strength and durability.

Conclusions. The operational reliability of the propeller shaft is an important factor in the safety and efficiency of marine vessels. A comprehensive approach that includes condition monitoring and design improvements can significantly reduce the likelihood of failures and extend the lifespan of the shaft system. By analyzing failures, we can improve our designs to make them more reliable and durable.

REFERENCES

1. American Bureau of Shipping (ABS) (2019) Guidance Notes on Propulsion Shafting Alignment. American Bureau of Shipping, Houston.
2. Bai Y., Jin W. L. (2016). Marine Structural Design.
3. Korczewski Z., Rudnicki J. (2015). The vibration based diagnostics of ship propulsion systems. In MARINE VI: proceedings of the VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering. Pp. 535–545.
4. Ayyub B.M., Beach J.E., Sarkani S. and Assakkaf I.B. (2002) Risk Analysis and Management for Marine Systems. Naval Engineers Journal, 114, 181-206. <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.2002.tb00130.x>.
5. Vizentin G., Vukelić G., Srok, M. (2017). Common failures of ship propulsion shafts. Pomorstvo, 31(2), 85–90.
6. Onwuegbuchunam D. E., Ogwude I. C., Igboanusi C. C., Okeke K. O., Azian N. N. (2020). Propulsion shaft and gearbox failure in marine vessels: A duration model analysis. Journal of Transportation Technologies, 10(4), 291-305. DOI: 10.4236/jtts.2020.104019.
7. Van Ta T., Vu N. H., Triet M. A., Thien D. M., Cang V. T. (2017). Assessment of Marine Propulsion System Reliability Based on Fault Tree Analysis. Int. J. Transp. Eng. Technol, 2, 55. DOI:10.11648/j.ijtet.20160204.14.

РОТОРНІ СИСТЕМИ ФЛЕТТНЕРА ЯК РІШЕННЯ ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Россомаха О. А.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. В умовах глобальних кліматичних змін і посилення міжнародних вимог щодо скорочення викидів парникових газів, відновлювані джерела енергії, такі як енергія вітру, сонця і припливів, викликають широкий міжнародний інтерес у судноплавній галузі [1]. Морський транспорт, на частку якого припадає значна частина глобальних викидів вуглекислого газу, активно шукає шляхи декарбонізації та підвищення енергетичної ефективності. Завдяки доступності та передбачуваності метеорологічних умов у світовому океані, енергія природного вітру є одним з найбільш перспективних та економічно обґрунтованих джерел енергії для суден, які прагнуть мінімізувати або повністю виключити використання викопного палива [2]. У цьому контексті особливого значення набувають технології вітрового допоміжного руху, які можуть ефективно доповнювати традиційні пропульсивні системи. Однією з найбільш інноваційних і технічно опрацьованих технологій уловлювання енергії вітру, яка відкриває значні можливості для економії палива і зниження експлуатаційних витрат суден, є ротор Флеттнера.

Основна частина. Система ротора Флеттнера (FR) є інноваційною технологією вітрового приводу, розробленою і запатентованою німецьким інженером Антоном Флеттнером на початку XX століття. Принцип роботи системи базується на використанні вертикально орієнтованих циліндричних роторів, здатних обертатися навколо своєї осі і перетворювати кінетичну енергію вітрового потоку в рушійну силу судна. При обтіканні обертового циліндра повітряним потоком виникає аеродинамічний ефект Магнуса, що призводить до генерації значної підйомної сили в напрямку, перпендикулярному набігаючому потоку. Дана сила ефективно використовується для створення додаткової тяги, що сприяє руху судна в заданому напрямку. Технологія FR знайшла практичне застосування в різних сегментах морського транспорту, включаючи вітрильно-моторні експедиційні судна, сучасні контейнеровози і пороми, переконливо демонструючи свій значний потенціал в області підвищення паливної ефективності та зниження екологічного впливу судноплавства.

Антон Флеттнер став піонером у галузі практичного дослідження можливостей використання вітрової енергії через роторні системи для судових пропульсивних установок [3]. Історичне значення має судно Вискау, яке в 1924 році стало першим морським транспортним засобом, оснащеним експериментальною роторною установкою, відкривши нову еру в розвитку альтернативних рушіїв. Наступним важливим етапом стало створення в 1926 році судна MV Barbara, яке було першим спеціально спроектованим і побудованим судном з інтегрованою системою FR. Після значної перерви в розвитку технології, в 2010 році німецька енергетична компанія Enercon ініціювала відродження інтересу до роторних систем, ввівши в експлуатацію вантажне судно E-Ship 1, оснащене сучасними роторами Флеттнера. У 2015 році фінська компанія Norsepower зробила наступний значний крок, встановивши два 30-метрових роторних вітрила нового покоління на танкері компанії Maersk Tankers, що ознаменувало початок комерційного впровадження технології в сучасному судноплаванні.

FR демонструє ряд істотних переваг у порівнянні з альтернативними системами вітрового допоміжного руху, такими як класичні вітрильні установки або буксировані повітряні змії. Серед ключових переваг слід виділити здатність системи ефективно функціонувати при значно ширшому діапазоні кутів зустрічного вітру, що забезпечує більшу операційну гнучкість. Система характеризується істотною простотою в управлінні та розгортанні, вимагаючи мінімальної участі екіпажу в процесі експлуатації, що знижує

людський фактор і експлуатаційні ризики. Важливою перевагою є високий ступінь сумісності з існуючими архітектурними концепціями суден, що дозволяє інтегрувати ротори без кардинальної переробки конструкції корпусу. Технологія також надає можливість модернізації експлуатованих суден з впровадженням роторних установок при мінімальних структурних змінах. Як зазначено в дослідженні [4], FR здатна ефективно працювати при будь-яких напрямках і швидкостях вітру, що значно розширює операційний діапазон застосування. Крім того, роторні установки відрізняються компактними габаритними розмірами [5] і можуть розглядатися як ефективне доповнення до традиційної пропульсивної системи судна [6].

Паливна ефективність FR визначається комплексною взаємодією безлічі технічних і експлуатаційних параметрів. До основних факторів відносяться геометричні характеристики роторів, включаючи їх лінійні розміри і пропорції. Істотний вплив має швидкість обертання циліндрів, яка повинна бути оптимізована в залежності від поточних вітрових умов. Метеорологічні параметри, такі як напрямок і швидкість вітру, відіграють критичну роль у визначенні генерованої тяги. При використанні декількох роторів необхідно враховувати ефекти аеродинамічної взаємодії між ними, які можуть як посилювати, так і послаблювати загальну ефективність системи. Архітектурні особливості судна, включаючи форму корпусу і надбудови, впливають на характер обтікання роторів повітряним потоком. Умови експлуатації, включаючи завантаження судна і режим руху, також вносять вклад в результуючу ефективність. Комплексна оптимізація всіх перерахованих факторів є критично важливою для досягнення максимально можливої економії палива при використанні технології FR.

Для комплексного розуміння технічних, екологічних та економічних елементів застосування FR на судах необхідне детальне вивчення фізичних принципів функціонування даних систем. Фундаментальною основою роботи FR є ефект Магнуса, вперше науково описаний німецьким фізиком Генріхом Густавом Магнусом у 1853 році (рис. 1а). Даний ефект ґрунтується на фундаментальному взаємозв'язку між швидкістю руху рідкого або газоподібного середовища і статичним тиском в ньому: збільшення швидкості потоку супроводжується пропорційним зниженням тиску, і навпаки, відповідно до принципу Бернуллі. Під впливом індукованого вітрового потоку на обертовий циліндр відбувається модифікація поля швидкостей навколо нього: з одного боку циліндра спостерігається уповільнення повітряного потоку, в той час як з протилежного боку відбувається його прискорення. Дана асиметрія в розподілі швидкостей призводить до формування зон підвищеного і зниженого тиску навколо обертового циліндра. Результуюча різниця тисків генерує аеродинамічні сили: підйомну силу, що діє в напрямку, перпендикулярному вектору вітрового потоку, і силу опору, орієнтовану паралельно напрямку потоку (рис 1б) [7].

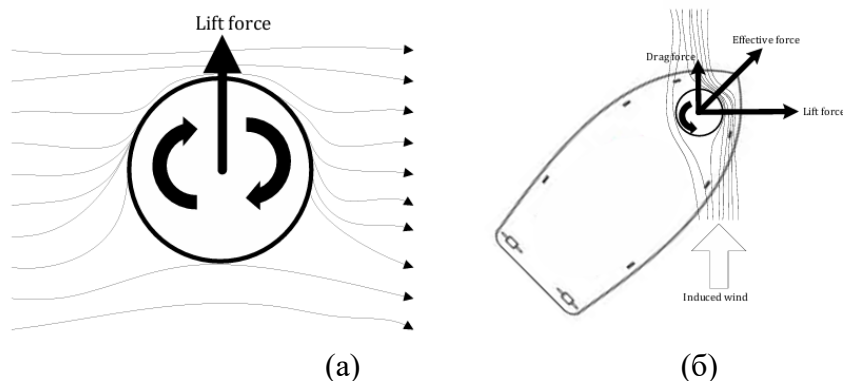


Рисунок 1 – Механізм ефекту Магнуса (а) і генерація аеродинамічних сил (б) [7]

Ефективна тяга, що генерується роторною установкою, визначається балансом між

потужністю, що споживається приводним двигуном ротора, і створюваною тягою, що дозволяє кількісно оцінити ступінь заміщення потужності головної пропульсивної установки. Результируюча ефективна сила розраховується шляхом векторного додавання компонентів підйомної сили і сили опору в напрямку руху судна [3].

Інженерне проектування та розрахунок параметрів FR є критично важливими етапами для максимізації їхнього внеску в підвищення паливної ефективності суден. Процес проектування включає детальний аналіз та оптимізацію геометрії ротора, співвідношення його розмірних характеристик, абсолютної висоти установки та оптимальної кількості роторних елементів для досягнення максимальної ефективності системи FR. Одним з ключових параметрів, що визначають ефективність FR, є аспектне співвідношення (AR), яке представляє собою відношення висоти ротора до його діаметра. При використанні виключно високих значень подовження підйомна сила, що генерується FR, може перевищити теоретично прогнозовані максимальні межі [3]. Загальне аспектне співвідношення безпосередньо впливає на висоту ротора (H) і співвідношення між його геометричними параметрами (d), при цьому величина підйомної сили демонструє пропорційну залежність від абсолютних розмірів ротора [8]. Коефіцієнт швидкісного режиму (SR) є ще одним фундаментальним параметром, що має істотний вплив на підйомну силу FR. Основними визначальними показниками для розрахунку SR служать кутова швидкість обертання ротора (Ω), його діаметр і уявна швидкість вітру відносно судна (V_a) [3;8]. Кінцева пластина, також відома як диск Тома, що встановлюється на верхній торцевій частині ротора і характеризується діаметром (d_e), є ще одним критично важливим конструктивним елементом FR. Даний компонент виконує функцію оптимізації аеродинамічної ефективності робочої поверхні ротора шляхом зниження індуктивного опору [8]. При високих значеннях коефіцієнта швидкісного режиму кінцева пластина здатна збільшити генеровану підйомну силу майже в чотири рази [3]. Геометричні та силові параметри FR представлені на рис. 2, де підйомна сила (Lift) діє перпендикулярно напрямку вектора вітру, а сила аеродинамічного опору (Drag) орієнтована у напрямку вітрового потоку.

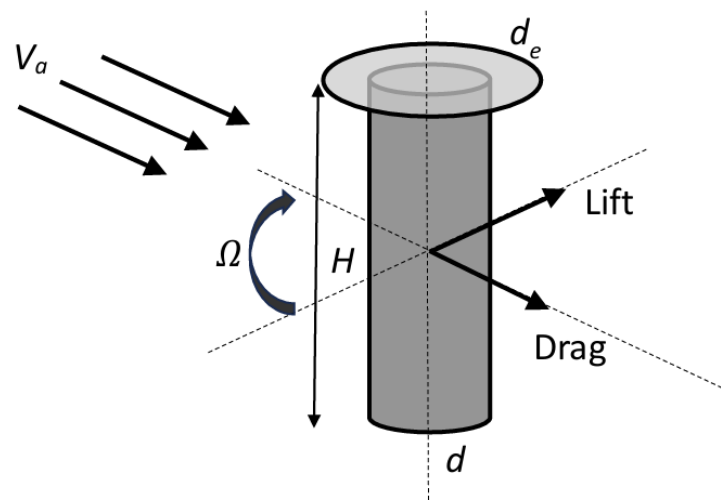


Рисунок 2 – Геометричні параметри ротора Флеттнера [3]

Висновок. Ротор Флеттнера є перспективною технологією вітрового допоміжного руху, заснованою на ефекті Магнуса. Система демонструє значні переваги перед альтернативними рішеннями, включаючи широкий діапазон робочих кутів вітру, простоту управління і сумісність з існуючими суднами. Ефективність FR визначається комплексною взаємодією геометричних параметрів роторів, режимів обертання і метеорологічних умов. Оптимізація конструктивних характеристик, включаючи аспектне співвідношення,

коефіцієнт швидкісного режиму і параметри кінцевих пластин, є критично важливою для максимізації паливної економії. Технологія відкриває реальні можливості для зниження викидів і операційних витрат в сучасному судноплаванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. De Kat, J. O., & Mouawad, J. (2019). Green ship technologies. In *Sustainable Shipping: A Cross-Disciplinary View*
2. Lu, R., & Ringsberg, J. W. (2020). Ship energy performance study of three wind-assisted ship propulsion technologies including a parametric study of the Flettner rotor technology. *Ships and Offshore Structures*, 15(3), pp. 249–258
3. De Marco, A., Mancini, S., Pensa, C., Calise, G., & De Luca, F. (2016). Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study. *International Journal of Rotating Machinery*, 2016
4. Julià, E., Tillig, F., & Ringsberg, J. W. (2020). Concept design and performance evaluation of a fossil-free operated cargo ship with unlimited range. *Sustainability (Switzerland)*, 12(16)
5. Chou, T., Kosmas, V., Acciaro, M., & Renken, K. (2021). A comeback of wind power in shipping: An economic and operational review on the wind-assisted ship propulsion technology. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), pp. 1–16
6. De Kat, J. O., & Mouawad, J. (2019). Green ship technologies. In *Sustainable Shipping: A Cross-Disciplinary View*
7. Seddiek, I. S., & Ammar, N. R. (2021). Harnessing wind energy on merchant ships: case study Flettner rotors onboard bulk carriers. *Environmental Science and Pollution Research*
8. Siegl, J., Arief, I. S., & Hartawan, A. R. (2020). Analysis of Energy Efficiency of Rotate Flettner Rotor Based on Variation in Wind Direction and Rotor's Material. *International Journal of Marine Engineering Innovation and Research*, 5(2), pp. 92–101

АНАЛІЗ РИЗИКІВ ПРИ СТОЯНЦІ СУДНА БІЛЯ ПРИЧАЛУ ТА РОЛЬ ШПРИНГІВ У СИСТЕМІ ШВАРТУВАННЯ

Россомаха О.І.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Безпечна експлуатація морського судна значною мірою залежить від ефективності організації його стоянки біля причалу, оскільки саме цей етап експлуатаційного циклу пов'язаний із значною кількістю зовнішніх та внутрішніх навантажень, які діють на корпус судна і швартовну систему. У процесі стоянки судно перебуває під впливом комплексу факторів морського середовища, серед яких домінують вітер, течія, хвилювання, гідродинамічні ефекти від проходження інших суден, а також зміни осадки та розподілу мас під час вантажних операцій. Усі ці чинники формують змінний силовий баланс, що безпосередньо впливає на стабільність положення судна біля причалу.

Одним із ключових елементів системи утримання судна є швартовні канати, які формують просторову силову конструкцію між судном і причальною інфраструктурою. Їх правильне розміщення та оптимальний розподіл навантаження забезпечують стабільність корпусу, обмежують його переміщення та запобігають аварійним ситуаціям. Особливу роль у цій системі відіграють шпринги – швартові лінії, що призначені для обмеження поздовжнього переміщення судна вздовж причалу.

Функціонування шпрингів пов'язане з перерозподілом сил у швартовній системі та формуванням стабілізуючого моменту, який протидіє дії вітру, течії та хвиль. Вони виконують роль елементів, що стримують судно від зміщення вперед або назад та забезпечують стабільність його положення під час вантажних операцій. У реальних умовах ефективність роботи шпрингів залежить від їх довжини, кута заведення, еластичності матеріалу, схеми швартування та рівня професійної підготовки екіпажу.

Сучасна морська практика демонструє, що значна частина інцидентів під час стоянки суден у портах пов'язана саме з перевантаженням або неправильним використанням шпрингів. Помилки при їх заведенні, нерівномірний розподіл натягу або недооцінка впливу гідрометеорологічних умов можуть призводити до розриву канатів, зміщення судна вздовж причалу, пошкодження причальної інфраструктури або травмування персоналу. Особливо небезпечними є ситуації, пов'язані з раптовим вивільненням накопиченої енергії у разі розриву каната, коли виникає так званий ефект відскоку.

Міжнародні нормативні документи, зокрема рекомендації з безпечного швартування суден [3], керівництва з експлуатації швартовного обладнання [4] та стандарти управління ризиками [5], наголошують на необхідності системного підходу до оцінювання безпеки швартовних операцій. Такий підхід передбачає поєднання технічного аналізу навантажень, дослідження експлуатаційних параметрів канатів та врахування людського елемента під час прийняття рішень екіпажем.

У зв'язку з цим дослідження особливостей використання шпрингів під час стоянки судна біля причалу та оцінка ризиків, що виникають у процесі їх експлуатації, є важливим завданням сучасної морської практики. Комплексне вивчення механічних, організаційних та експлуатаційних аспектів використання шпрингів дозволяє підвищити безпеку портових операцій та зменшити ймовірність аварійних ситуацій.

Актуальність досліджень. Зростання інтенсивності світових морських перевезень та збільшення розмірів торговельних суден призводить до підвищення вимог до безпеки їх експлуатації у портах. Сучасні контейнеровози, танкери та балкери мають значні габарити, велику вітрову площу та значну інерційність, що ускладнює процес їх утримання біля причалу. У таких умовах швартовна система повинна забезпечувати

стабільність судна навіть за дії значних зовнішніх навантажень.

Одним із найбільш навантажених елементів цієї системи є шпринги, які виконують функцію обмеження поздовжніх переміщень судна. Саме на них припадає значна частина навантаження під час косого вітру або змін напрямку течії. При неправильному розрахунку параметрів шпрингів або помилках у схемі їх заведення можливе перевантаження окремих ліній, що підвищує ризик їх розриву.

Актуальність дослідження також зумовлена необхідністю врахування динамічного характеру навантажень, які діють на судно під час стоянки. Пориви вітру, хвилювання, проходження інших суден або зміна осадки під час вантажних операцій створюють змінні сили, що призводять до циклічного розтягування швартовних канатів. Такі навантаження можуть значно перевищувати статичні значення та спричиняти поступове накопичення втоми матеріалу канатів [9].

Особливе значення має і проблема безпеки екіпажу. У разі розриву швартового каната виникає небезпечна зона відскоку, яка може призвести до тяжких травм або загибелі персоналу. За даними досліджень морської безпеки, значна частина інцидентів під час швартовних операцій пов'язана саме з цим явищем [13].

Не менш важливим є вплив людського елемента на безпеку швартування. Неправильний порядок заведення канатів, недостатній контроль натягу або ігнорування змін погодних умов можуть спричинити перекіс сил у системі швартування та перевантаження окремих ліній. За статистичними оцінками, до 40 % інцидентів під час швартовних операцій пов'язані саме з організаційними помилками екіпажу.

Таким чином, актуальність дослідження визначається необхідністю комплексного аналізу технічних характеристик шпрингів, умов їх експлуатації та ризиків, що виникають під час стоянки судна біля причалу.

Постановка задачі. Метою дослідження є аналіз особливостей використання шпрингів під час стоянки морського судна біля причалу та оцінка ризиків, що виникають у процесі їх експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати типові помилки екіпажу під час використання шпрингів;
- провести оцінку ризиків розриву канатів або зміщення судна;
- визначити основні заходи з підвищення безпеки швартовних операцій.

Об'єктом дослідження є процес забезпечення безпечної стоянки морського судна біля причалу.

Предметом дослідження є використання шпрингів у системі швартування судна та ризики, що виникають у процесі їх експлуатації.

Основний матеріал. Система швартування судна біля причалу формує складну силову конструкцію, яка повинна забезпечувати стабільність положення корпусу під дією зовнішніх і внутрішніх навантажень. Основними елементами цієї системи є носові та кормові канати, брідж-лінії та шпринги. Кожен із цих елементів виконує певну функцію у загальній системі утримання судна.

Шпринги відіграють ключову роль у забезпеченні поздовжньої стабільності судна. Носовий шпринг, заведений від носової частини судна у напрямку до корми причалу, перешкоджає переміщенню судна вперед. Кормовий шпринг, заведений у протилежному напрямку, стримує його рух назад. Разом вони формують систему сил, що стабілізує судно вздовж причалу.

На ефективність роботи шпрингів значною мірою впливають їх геометричні параметри. Довжина шпринга визначає ступінь його подовження під навантаженням та здатність поглинати енергію хвиль і поривів вітру. Довші шпринги забезпечують більш плавний розподіл навантаження, однак допускають більші переміщення судна. Коротші лінії створюють жорсткішу фіксацію, але можуть спричиняти локальні перевантаження.

Важливим параметром є також кут заведення шпринга відносно діаметральної

площини судна. Чим менший цей кут, тим більшу поздовжню складову має сила натягу каната. При великих кутах збільшується поперечна складова сили, що може впливати на положення судна відносно причалу.

Значну роль відіграють і механічні властивості матеріалу канатів. Сучасні синтетичні канати мають високу міцність та певну еластичність, що дозволяє їм поглинати енергію динамічних навантажень. Проте надмірна еластичність може призводити до небажаних переміщень судна.

У реальних умовах експлуатації на судно діє комплекс сил: вітер, течія, хвилювання та інерційні ефекти від проходження інших суден. Ці сили змінюються у часі та створюють циклічні навантаження на швартовні канати.

Важливою складовою безпеки є правильний розподіл навантаження між усіма елементами швартовної системи. Якщо один із канатів перевантажений, а інші працюють недостатньо, виникає дисбаланс сил, який може призвести до обриву лінії або зміщення судна.

Результати досліджень. Проведений аналіз показав, що ефективність використання шпрингів залежить від поєднання кількох ключових факторів: довжини канатів, кута їх заведення, механічних властивостей матеріалу та схеми швартування.

Дослідження показало, що оптимальна довжина шпрингів повинна становити приблизно 1,0–1,3 довжини судна залежно від його типу та умов порту. При такому співвідношенні забезпечується достатня еластичність системи та рівномірний розподіл навантаження.

Аналіз силового балансу показав, що під час поривчастого вітру навантаження на носові шпринги може зростати на 30–40 % порівняно зі спокійними умовами. У випадку асиметричного впливу вітру або хвиль можливий нерівномірний розподіл сил між лініями, що підвищує ризик перевантаження окремих канатів.

		Ймовірність				
		1 Дуже низька	2 Низька	3 Середня	4 Висока	5 Дуже висока
Попередження	5 – Катастрофічні (Загибель людей, повне пошкодження судна)					
	4 – Критичні (Серйозні пошкодження судна, важні травми)					
	3 – Серйозні (Пошкодження швартових систем, середні травми)					
	2 – Помірні (Пошкодження обладнання, легкі травми)					
	1 – Незначні (Дрібні пошкодження, незначні травми)					

Низький ризик
 Помірний ризик
 Високий ризик
 Критичний ризик

Рисунок 1 – Матриця ризиків шпрингів при стоянці судна

Оцінка ризиків показала, що найбільш небезпечними є такі сценарії:

- розрив шпринга через перевантаження;
- каскадний обрив кількох ліній;
- зсув судна вздовж причалу;
- травмування персоналу в зоні відскоку каната.

Використання матриці ризиків (рис. 1) дозволило систематизувати можливі небезпеки та визначити їх пріоритетність. Найвищий рівень ризику мають події, пов'язані з обривом шпрингів під час штормових умов або при значних динамічних навантаженнях.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило важливу роль шпрингів у забезпеченні безпечної стоянки судна біля причалу. Вони є ключовим елементом швартовної системи, що обмежує поздовжні переміщення судна та забезпечує стабільність його положення.

Встановлено, що ефективність роботи шпрингів залежить від комплексу факторів: довжини та кута заведення канатів, їх механічних властивостей, схеми швартування та умов морського середовища.

Результати дослідження показали, що основними причинами аварійних ситуацій під час стоянки суден є перевантаження швартовних канатів, нерівномірний розподіл натягу та помилки екіпажу.

Застосування ризик-орієнтованого підходу дозволяє підвищити ефективність управління безпекою швартовних операцій. Використання матриці ризиків, регулярний контроль технічного стану канатів та належна підготовка екіпажу сприяють зменшенню ймовірності аварій.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, as amended. – London : International Maritime Organization, 2020.
2. International Safety Management (ISM) Code: International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention. London : International Maritime Organization, 2018.
3. Guidelines on the Safe Mooring of Ships. London : International Maritime Organization, 2016.
4. Mooring Equipment Guidelines (MEG4). London : Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), 2018.
5. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2018.
6. ISO 4309:2017 Cranes – Wire ropes – Care and maintenance, inspection and discard. Geneva : International Organization for Standardization, 2017.
7. House D. J. Ship Handling: Theory and Practice. London : Routledge, 2015.
8. Kemp J. F. The Shipmaster's Business Self-Examiner. London : Witherby Publishing Group, 2009.
9. Principles of Naval Architecture Series. Jersey City : Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 2010.
10. Lewis E. V. Principles of Naval Architecture. Jersey City : SNAME, 1988.
11. Fossen T. I. Marine Hydrodynamics and Motion Control. Chichester: Wiley, 2011.
12. Guidelines for Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process. – London : International Maritime Organization, 2018.
13. Managing the Risk of Snap-Back Zones. London : The Nautical Institute, 2015.
14. Правила технічної експлуатації морських портів України. Київ : Міністерство інфраструктури України, 2013.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПОРТАТИВНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ МОДУЛІВ У ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ МОРСЬКИХ СУДЕН

Стовба Т.А.

Херсонська державна морська академія
(Україна)

За даними Конференції ООН з торгівлі та розвитку морський транспорт доставляє понад 80% світового обсягу вантажів у міжнародній торгівлі [1].

Морська галузь залишається джерелом викидів парникових газів. За оцінками Міжнародної морської організації частка морського транспорту у глобальних викидах вуглецю становить майже 3% [2]. Міжнародні нормативні документи передбачають поступове скорочення викидів від судноплавства у майбутньому, що потребує модернізації суднових енергетичних систем та впровадження нових технологій енергоефективності [3].

Одним із перспективних напрямів є розвиток гібридних суднових енергетичних систем, що поєднують традиційні дизельні двигуни, електричні системи накопичення енергії (Energy Storage System далі – ESS) та інтелектуальні системи управління енергоспоживанням [4]. ESS забезпечує акумуляування, зберігання та віддачу електричної енергії з метою оптимізації енергоспоживання, підвищення ефективності та надійності енергосистеми. Отже використання акумуляторних батарей дозволяє оптимізувати роботу генераторних установок, зменшити коливання навантаження та підвищити ефективність використання пального [5].

Метою дослідження є аналіз впливу портативних акумуляторних модулів (Marine Power Bank) у складі гібридних енергетичних систем морських суден на втрати судового пального та визначення потенційних технічних і експлуатаційних переваг батарей.

Розвиток гібридних енергетичних систем (diesel – electric + ESS) на морських судах спрямований на підвищення енергоефективності суден та зменшення шкідливих викидів. У таких системах акумуляторні батареї використовують як елемент буферного накопичення енергії. Основними функціями ESS у суднових енергетичних установках є компенсація короточасних пікових навантажень, оптимізація режимів роботи дизель-генераторів, забезпечення резервного електроживлення, підвищення ефективності використання енергії; під час заходу суден у порт або руху на малих швидкостях електрична енергія може використовуватися для зменшення викидів забруднюючих речовин у довкілля.

Застосування акумуляторних батарей дозволяє працювати дизельним генераторам у режимах, близьких до оптимального навантаження, що знижує витрати пального та зменшує викиди [5]. Але традиційні судові батарейні системи мають значну вагу та потребують складної інтеграції у структуру судна. На думку експертів перспективним є використання модульних або портативних систем накопичення енергії, які можуть інтегруватись у гібридні енергетичні системи без значних конструктивних змін.

Портативні акумуляторні модулі можуть розглядатись як елементи системи накопичення енергії, що підключаються до судової електромережі через силові перетворювачі. Типова структура гібридної судової енергетичної системи включає дизель-генераторні установки, судову електричну мережу, систему накопичення енергії, систему управління енергоспоживанням. Модульні акумуляторні системи можна використовувати для компенсації пікових навантажень, стабілізації напруги у судовій мережі, резервного живлення критичних систем тощо. Зокрема, у режимах нерівномірного навантаження акумуляторні системи можуть накопичувати надлишкову енергію від дизель-генераторів (ДГ) або відновлюваних джерел. Вони дозволяють зменшити частоту пусків/зупинок генераторів, підвищити ефективність роботи двигунів, скоротити витрати

пального. Інтеграція таких модулів здійснюється через двонаправлені перетворювачі енергії, які забезпечують можливість заряджання/розряджання батарей залежно від режиму роботи суднової енергосистеми.

Використання портативних акумуляторних модулів у суднових енергетичних установках дозволяє оптимізувати роботу ДГ, що зменшує витрати пального на 5–15% залежно від режимів експлуатації, зменшення викидів CO₂, NO_x та SO_x та знижує експлуатаційні витрати [4]. Мобільні накопичувачі можуть використовуватись в якості резервних джерел енергії для критичних систем судна. Модульна структура дозволяє легко масштабувати систему залежно від потреб судна, а також завдяки системам моніторингу інтегрувати їх у цифрові системи управління енергетикою судна.

Проаналізуємо ефективність використання акумуляторних модулів на прикладі умовного судна з параметрами: сумарна потужність ДГ – 4 МВт, середнє навантаження (P_c) – 2,5 МВт, пікове навантаження – 3,5 МВт, ємність батареї – 0,5 МВт-годин, питомі витрати пального – 200 г/кВт-год, ціна пального – 1000 \$/т, час роботи судна (t) – 5000 годин /рік.

За базовим сценарієм (без батареї) річне виробництво електроенергії (E)

$$E = P_c * t = 2,5 * 5000 = 12500 \text{ МВт} - \text{годин} \quad (1)$$

Витрати пального (M)

$$M = 12500 * 0,62 = 2500 \text{ т} \quad (2)$$

Вартість пального (C)

$$C = 2500 * 1000 = 2\,500\,000 \$ \quad (3)$$

Батарея 0,5 МВт-годин може зрізати піки (Peak shaving) 3,5 – 2,5 = 1МВт та покривати

$$t = \frac{0,5}{1} = 0,5 \text{ години} = 30 \text{ хвилин}. \quad (4)$$

Отже, короточасні піки можуть повністю згладжуватись без запуску додаткового дизеля протягом 30 хв.

Відомо, що дизелі найефективніші при навантаженні 70-85%. Без батареї ДГ працюють на часткових навантаженнях, з частими пусками/зупинками. Ефект від використання батареї полягає у стабілізації навантаження, зменшенні роботи на «малих режимах». Згідно із дослідженнями енергоефективності суднових систем (DNV, Wärtsilä, MAN) економія від використання акумуляторних накопичувачів для таких конфігурацій становить 5–15% залежно від режиму експлуатації судна [3]. Прийmemo 8%. Тоді економія пального становитиме:

$$\Delta M = 2500 * 0,08 = 200 \text{ т/рік}. \quad (5)$$

Економія коштів:

$$\Delta C = 200 * 1000 = 200\,000 \$/\text{рік}. \quad (6)$$

Загалом економія коштів збільшиться внаслідок зменшення зносу двигунів (менше пусків/зупинок збільшує ресурс на 10-20%), скороченню витрат на технічне обслуговування — майже 50-100 тис. \$/рік, зниження викидів вуглецю, яка з 1 т пального дорівнює≈ 3,2 т CO₂, а за рік складе

$$200 * 3,2 = 640 \text{ т CO}_2/\text{рік}. \quad (7)$$

Орієнтовна вартість батареї 0,5МВт-годин становить

$$500 \text{ кВт} - \text{годин} * (600 \div 900 \$/\text{кВт} - \text{годину}) \approx 300\,000 \div 450\,000 \$ \quad (8)$$

Відтак термін окупності без урахування зміни вартості грошей у часі дорівнюватиме 1,5–2,25 роки. У традиційній системі для забезпечення пікових режимів генератори мають працювати із значним резервом потужності. Інтеграція акумуляторного модуля невеликої ємності (500 кВт-годин) у гібридну енергосистему судна забезпечує оптимізацію режимів навантаження генераторів, знижує питомі витрати пального на 5–15% (відповідно до традиційної інженерної залежності), суттєво покращує екологічні показники (скорочення викидів вуглецю на 640 т на рік), має короткий термін окупності.

На рис. 1 визначена залежність річної економії пального від ємності батареї за вихідних умов, наведених у табл. 1: базові витрати пального (без використання батареї) – 2500 т/рік, ціна викопного пального для ДГ – 1000 \$/т, максимальна економія для умовного судна 15%.

Таблиця 1 – Результати розрахунку залежності річної економії пального від ємності батареї

№ з/п	Ємність батареї, МВт-годин	Економія пального, %	Економія пального, т/рік	Економія коштів, \$/рік	Вартість батареї, тис. \$	Термін окупності інвестицій у батарею, років
1	0,5	8	200	200 000	300 ÷ 450	1,5 ÷ 2,25
2	1,0	10	250	250 000	600 ÷ 900	2,4 ÷ 3,6
3	2,0	12,5	312	312 000	1200 ÷ 1800	3,8 ÷ 5,8
4	3,0	14	350	350 000	1800 ÷ 2700	5,1 ÷ 7,7
5	4,0	14,5	362	362 000	2400 ÷ 3600	6,6 ÷ 9,9
6	5,0	15	375	375 000	3000 ÷ 4500	8 ÷ 12

Максимальна економія для умовного судна становитиме 375 тис. \$/рік (15% відповідно до спостережень DNV, Wärtsilä) (табл.1).

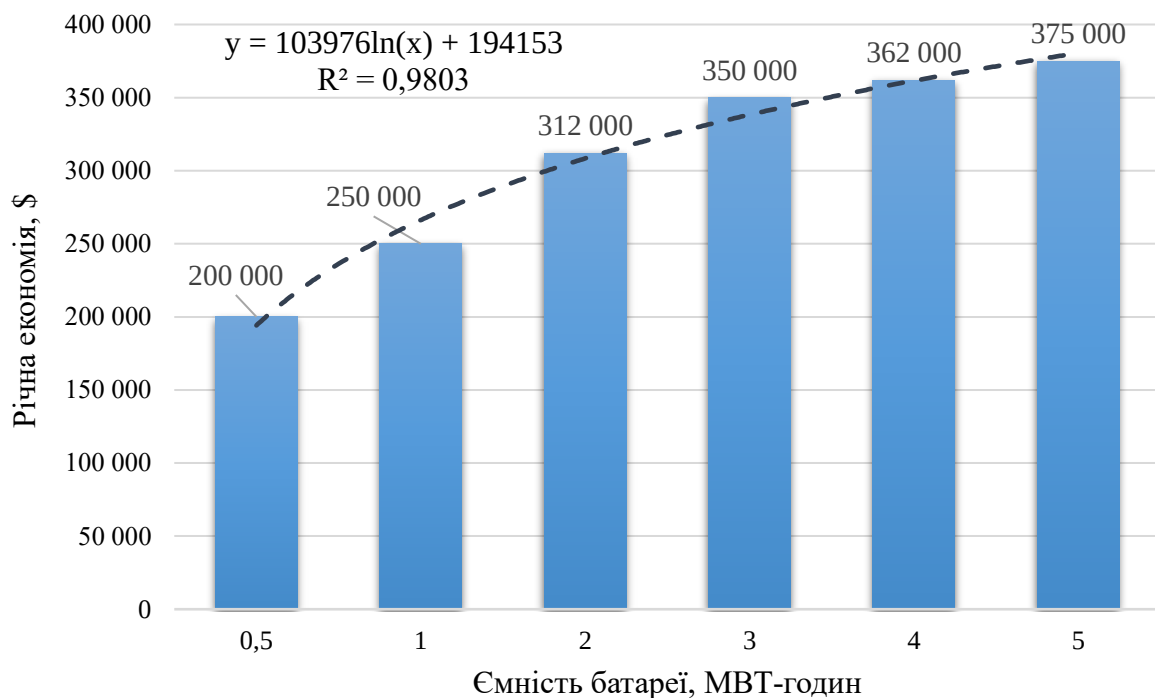


Рисунок 1 – Кореляція ємності батареї та річної економії суднового пального

Таким чином, логарифмічна залежність відображає закон спадної граничної продуктивності. Розглянемо отриману на рис. 1 логарифмічну залежність більш детально:

$$y = 103976 \ln(x) + 194153, \quad R^2 = 0,9803, \quad (9)$$

де x – ємність батареї, МВт-годин;

y – річна економія, \$/рік.

Логарифмічний характер залежності (9) свідчить про те, що кожне наступне збільшення ємності батареї дає менший приріст економії. Тобто, на малих ємностях батарея використовується максимально ефективно, на великих – частина енергії не використовується внаслідок ефекту насичення. Отримана залежність пояснює 98,03%

варіації, що свідчить про високу точність апроксимації.

При $x \rightarrow 1$ річна економія пального $y \approx 194153$ \$, тобто відносно невелика батарея дає економію майже у 194,1 тис. \$/рік, яка обумовлена оптимізацією режиму ДГ та зменшенням їх роботи на низьких навантаженнях. Коефіцієнт 103976 – це гранична ефективність масштабування:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{103976}{x}. \quad (10)$$

У табл. 2 наведено граничну економію на 1 МВт – годину для різних ємностей, яка свідчить, що ефективність кожної додаткової МВт-години обернено пропорційна ємності батареї.

Таблиця 2 – Гранична ефективність масштабування ємності батареї

№ з/п	Ємність батареї, МВт-годин	Гранична ефективність батареї, тис. \$/рік
1	0,5	207,95
2	1,0	103,98
3	2,0	51,99
4	3,0	34,66
5	4,0	25,99
6	5,0	20,8

Відтак, зона високої ефективності батарей дорівнює 0,5–1 МВт-години, в якій покриваються пікові навантаження, ДГ працюють на 70-85% навантаження, спостерігається максимальна економія пального на одиницю капіталу, мінімальний термін окупності дорівнює 1,5÷3,6 роки (табл. 1). У зоні надлишкової ємності (4–5 МВт-годин) батарея не використовується повністю, спостерігається зниження економічної ефективності інвестицій. Відтак батареї ємністю 0,5–1 МВт-годин мають високу граничну ефективність, мінімальний термін окупності.

Висновки. Використання портативних акумуляторних модулів у складі гібридних суднових енергетичних систем є перспективним напрямом підвищення енергоефективності морських суден. Основними перевагами інтеграції модульних систем накопичення енергії є зниження пікових навантажень на генератори, підвищення ефективності використання викопного пального, покращення стабільності судової електромережі, можливість резервного електроживлення критичних систем тощо.

Проаналізовано вплив ємності батареї на річну економію пального. Визначено, що енергетична ефективність гібридних суднових систем описується логарифмічними функціями. Ключовим фактором при виборі батарей є узгодження ємності ESS із профілем навантаження. Доведено, що надлишкова ємність призводить до зниження економічної ефективності інвестицій. Зокрема, оптимальна ємність батарей для умовного судна дорівнює 0,5–1 МВт-години. Максимальна економія пального від використання батарей ємністю 5,0 МВт-годин становитиме 375 тис. \$/рік або 15%. Доцільно вибирати ємність батареї так, щоб забезпечити покриття пікових навантажень і при цьому не суттєво перевищувати їх тривалість.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shipping data: UNCTAD releases new seaborne trade statistics. unctad.org : веб-сайт. URL: <https://unctad.org/news/shipping-data-unctad-releases-new-seaborne-trade-statistics> (дата звернення: 05.03.2026).
2. Review of Maritime Transport 2025. Staying the course in turbulent waters. unctad.org : веб-сайт. URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2025> (дата звернення: 21.03.2026).
3. Energy Transition Outlook 2023: Maritime Forecast to 2050. maritimecyprus.com :

веб-сайт. URL: https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2023/09/DNV_Maritime_Forecast_2050_2023-report_c.pdf (дата звернення: 20.03.2026).

4. Roslan S. B., Konovessis D., Tay Z. Y. Sustainable Hybrid Marine Power Systems for Power Management Optimisation: A Review. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 24. Article 9622. <https://doi.org/10.3390/en15249622>.

5. Xiaodong Guo, Xiao Lang, Yupeng Yuan, Liang Tong, Boyang Shen, Teng Long, Wengang Mao. Energy management system for hybrid ship: Status and perspectives. *Ocean Engineering*. 2024. Volume 310, Part 1. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118638>.

INNOVATIVE SYSTEMS AND METHODS FOR MEASURING THE SHIP'S ACOUSTIC PROFILE

Kucherenko V.Y., Voloshyn A.O.
Odesa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. The underwater acoustic environment of the world ocean has undergone significant transformation over the past century due to rapid growth of maritime transportation, offshore industrial activities, and increasing deployment of underwater infrastructure. Among all anthropogenic sound sources present in the marine environment, commercial ships represent one of the most dominant contributors to underwater radiated noise (URN). The acoustic emissions generated by vessels propagate efficiently through seawater and may travel over extremely long distances, particularly in low-frequency bands where sound absorption is minimal. The acoustic profile of a surface ship can be defined as a complex spectral and temporal representation of sound radiation generated by propulsion systems, onboard mechanical equipment, and hydrodynamic interaction between the vessel hull and surrounding water. Each ship possesses a characteristic acoustic signature that depends on structural design parameters, propulsion configuration, operational conditions, and environmental factors.

The primary components of ship-generated underwater noise include machinery tonal lines and broadband hydrodynamic noise. Tonal components typically originate from rotating mechanical elements such as diesel engines, reduction gearboxes, pumps, compressors, and electrical generators. These signals appear at specific rotational frequencies and their harmonic multiples. Broadband noise components arise primarily from turbulent boundary layer flow and propeller cavitation processes. Propeller cavitation is widely recognized as the dominant source of high-intensity underwater noise generated by ships operating at moderate and high speeds. Cavitation occurs when local pressure near propeller blades falls below the vapor pressure of water, resulting in formation and collapse of vapor bubbles. The rapid collapse of these bubbles produces strong acoustic impulses that contribute to broadband noise radiation. Recent decades have witnessed growing interest in the study of underwater radiated noise due to increasing awareness of its potential impact on marine ecosystems. Numerous studies have demonstrated that anthropogenic underwater noise may influence communication, navigation, and feeding behavior of marine mammals and other aquatic species. As a result, international organizations such as the International Maritime Organization have initiated programs aimed at reducing underwater noise emissions from commercial vessels.

Relevance of the Research. The rapid expansion of global maritime transportation has led to a significant increase in underwater acoustic emissions from commercial vessels. According to recent studies, global shipping noise levels have increased by several decibels per decade in major ocean basins. This growth in underwater noise is primarily attributed to increasing ship size, higher propulsion power, and intensified maritime traffic along major shipping routes. The influence of underwater noise on marine ecosystems has become a topic of considerable scientific and environmental concern. Marine mammals rely heavily on acoustic communication for navigation, prey detection, and social interaction. Persistent exposure to anthropogenic noise may disrupt these biological processes and alter migration patterns of marine species. In addition to ecological considerations, underwater acoustic monitoring plays an essential role in maritime security and situational awareness systems. Passive acoustic detection technologies allow monitoring of maritime traffic without emitting active sonar signals, which may disturb marine life or reveal the presence of monitoring systems. Acoustic monitoring systems are also used in naval applications for vessel detection and classification. Each vessel produces a unique acoustic signature determined by its propulsion system, hull design, and operational parameters. By analyzing these acoustic signatures, it is possible to identify specific vessel types and monitor maritime activities over large ocean areas. Furthermore, ship acoustic

monitoring can be applied as a diagnostic tool for evaluating the technical condition of propulsion machinery. Changes in acoustic signature may indicate mechanical faults, imbalance in rotating components, or cavitation-related damage to propeller blades. The growing importance of underwater noise management has led to development of international regulatory frameworks. The International Maritime Organization has introduced guidelines for reducing underwater noise from commercial ships, encouraging improvements in ship design and propulsion technologies.

Problem Statement. Despite considerable progress in hydroacoustic measurement technologies, accurate determination of ship acoustic profiles remains a challenging scientific and engineering task. Traditional measurement approaches often rely on limited sensor configurations or short-duration experiments that may not capture the full complexity of underwater acoustic fields generated by moving vessels. Ship-generated acoustic signals are influenced by numerous operational and environmental factors. Vessel speed, propeller loading conditions, hull fouling, sea state, and water temperature stratification can all affect acoustic radiation patterns. Additionally, underwater sound propagation is influenced by oceanographic conditions such as sound speed gradients and seabed composition. Another challenge arises from the presence of multiple simultaneous sound sources in busy maritime regions. In heavily trafficked shipping lanes, acoustic signals from different vessels may overlap in both time and frequency domains. This makes it difficult to isolate individual ship signatures using conventional hydrophone measurements. Environmental noise sources such as wind-generated waves, rainfall, seismic activity, and biological sounds further complicate acoustic measurements. These background noise components may mask weaker ship signals and reduce detection accuracy. Therefore, modern research focuses on development of innovative measurement systems capable of capturing spatial and temporal characteristics of underwater acoustic fields.

Main Material. Modern hydroacoustic monitoring systems employ several types of sensing technologies designed to measure underwater acoustic emissions generated by ships. One of the most widely used approaches involves coherent hydrophone arrays. These arrays consist of multiple hydrophones arranged in linear, planar, or volumetric configurations. By combining signals from multiple sensors using beamforming algorithms, hydrophone arrays can significantly increase the signal-to-noise ratio and determine the direction of arrival of acoustic signals. Vector acoustic sensors represent another important innovation in hydroacoustic technology.

$$y(t) = \sum_{n=1}^N w_n x_n(t - \tau_n), \quad (1)$$

where, $y(t)$ is the beamformed output signal representing the combined and spatially filtered acoustic response of the hydrophone array, $x_n(t)$ – signal received by the n -th hydrophone, w_n – weighting coefficient, τ_n – time delay, n – number of sensors.

In addition, the efficiency of hydroacoustic monitoring systems is significantly influenced by environmental conditions such as water depth, temperature gradients, and seabed characteristics, which affect sound propagation and signal attenuation. Therefore, accurate measurement of ship-generated acoustic emissions requires consideration of oceanographic parameters and the application of appropriate propagation models. Furthermore, modern hydroacoustic systems increasingly incorporate real-time data processing and adaptive filtering techniques, which enhance detection performance in complex acoustic environments with multiple noise sources. This allows reliable identification and separation of ship acoustic signatures even under high background noise conditions. The integration of multi-sensor systems, including hydrophone arrays and vector sensors, provides a more comprehensive representation of the underwater acoustic field. Such combined approaches improve spatial resolution and enable more precise estimation of ship acoustic characteristics, including dominant frequency components and directional properties of radiated noise.

Results of Research. Unlike conventional hydrophones that measure only acoustic

pressure, vector acoustic sensors provide simultaneous measurement of both scalar pressure and vector particle velocity components of the acoustic field. This capability enables direct estimation of the direction of arrival (DOA) of acoustic signals without requiring large-aperture sensor arrays. As a result, vector sensor systems represent a compact and efficient solution for directional hydroacoustic measurements, particularly in shallow water and coastal environments where installation of large hydrophone arrays may be impractical.

The combined use of pressure and particle velocity measurements allows reconstruction of the acoustic intensity vector (I), which is defined as:

$$I = p(t) \cdot v(t), \quad (2)$$

where $p(t)$ is the acoustic pressure and $v(t)$ is the particle velocity vector. This relationship provides direct information about the direction and magnitude of acoustic energy propagation, which is essential for accurate characterization of ship acoustic profiles. Autonomous underwater vehicles (AUVs) and underwater gliders significantly extend the capabilities of traditional hydroacoustic monitoring systems by introducing mobility into the measurement process. Unlike fixed observatories, these platforms can perform spatial scanning of underwater acoustic fields, enabling detailed mapping of noise distribution associated with moving vessels. This is particularly important for studying dynamic acoustic phenomena such as wake-induced turbulence, cavitation noise evolution, and propagation effects in variable oceanographic conditions. Due to their low hydrodynamic noise and long operational endurance, underwater gliders are especially suitable for large-scale ocean monitoring missions. Their buoyancy-driven propulsion mechanism minimizes self-generated acoustic interference, allowing high-quality recording of low-frequency ship noise. In addition, gliders can operate over extended periods, often exceeding several weeks, which enables continuous monitoring of maritime traffic and long-term assessment of underwater acoustic environments. The integration of mobile platforms with advanced signal processing techniques further enhances the effectiveness of hydroacoustic monitoring systems. By combining beamforming, cross-correlation analysis, and spectral decomposition methods, it becomes possible to extract key features of ship acoustic signatures even in complex multi-source environments. These features include tonal frequencies associated with rotating machinery, blade-passage frequencies of propellers, and broadband noise components caused by cavitation and turbulent flow. Another important result is the ability to estimate ship source levels and acoustic emission characteristics under real operating conditions. By applying transmission loss models and inverse acoustic methods, the measured signals can be transformed into quantitative estimates of underwater radiated noise. This allows comparison of different vessel types and evaluation of compliance with international noise reduction guidelines. Table 1 summarizes the main systems used for measuring the acoustic profile of ships, including their sensor types, key advantages, and typical applications. Hydrophone arrays are widely used for long-range detection and tracking of vessels due to their high sensitivity and spatial processing capabilities. Vector sensors provide compact solutions for determining the direction of arrival of acoustic signals by measuring both pressure and particle velocity components. Underwater gliders represent mobile monitoring platforms that enable large-scale mapping of ocean acoustic fields and long-term observation of ship-generated noise.

Table 1 – Main systems for measuring the acoustic profile of ships

Monitoring system	Sensor type	Key advantages	Application
Hydrophone arrays	Pressure sensors	Long detection range	Ship tracking
Vector sensors	Pressure and particle velocity sensors	Direction of arrival detection	Port monitoring
Underwater gliders	Mobile hydrophone platforms	Large area coverage	Ocean noise mapping



Figure 1 – Configuration of an underwater vibration excitation and measurement system

Figure 1 presents an integrated experimental system designed for the generation, transmission, and measurement of controlled underwater vibration and acoustic signals simulating ship-induced noise. The system consists of four main functional subsystems: signal generation and control, hydraulic servo actuation, hydraulic power supply, and underwater vibration source deployment. The signal generation subsystem provides a programmable digital interface for defining excitation parameters, including frequency, amplitude, and waveform characteristics. The output waveform demonstrates a controlled low-frequency oscillatory signal (approximately 2 Hz), which is representative of dominant ship machinery and propulsion-induced vibration components. The hydraulic servo system converts the electrical control signal into mechanical motion using a closed-loop hydraulic actuation mechanism. Key components such as pressure control units, filters, relief valves, and monitoring instruments ensure stable and precise operation of the excitation system. The hydraulic servo power unit supplies the required energy, incorporating accumulators and electric drive systems to maintain pressure stability and dynamic response. The underwater vibration subsystem includes a submerged cylindrical excitation device connected to the surface system via an integrated pipeline. This device generates controlled mechanical oscillations that propagate into the surrounding water and seabed.

Conclusion. The study demonstrates that modern hydroacoustic technologies provide effective tools for measuring the acoustic profile of surface ships. The use of hydrophone arrays, vector sensors, and autonomous underwater platforms significantly improves detection accuracy and spatial resolution of underwater acoustic measurements. Beamforming and advanced signal processing techniques enable reliable extraction of key acoustic features, including machinery tonal components and broadband cavitation noise. These features are essential for vessel identification, monitoring, and environmental assessment. The results confirm that ship acoustic emissions strongly depend on operational and environmental conditions, requiring integrated multi-sensor measurement approaches.

REFERENCES

1. Buszman, K. (2020). Analysing the impact on underwater noise of changes to the parameters of a ship's machinery. *Polish Maritime Research*, 27(3), 176-181. <https://doi.org/10.2478/pomr-2020-0059>
2. International Maritime Organization. (2023). Revised guidelines for the reduction of underwater radiated noise from shipping to address adverse impacts on marine life (MEPC.1/Circ.906). IMO.
3. International Maritime Organization. (2014). Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life (MEPC.1/Circ.833). IMO
4. International Organization for Standardization. (2016). ISO 17208-1:2016. Underwater acoustics – and procedures for description and measurement of underwater sound from ships - Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes.
5. McKenna, M. F., Ross, D., Wiggins, S. M., & Hildebrand, J. A. (2012). Underwater radiated noise from modern commercial ships. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131(1), 92-103. <https://doi.org/10.1121/1.3664100>
6. Barth, A., Rustad, A. M., Johansen, T. A., & Nilsen, F. (2020). Long-range automatic detection, acoustic signature characterization and bearing-time estimation of multiple ships with coherent hydrophone array. *Remote Sensing*, 12(22), Article 3731. <https://doi.org/10.3390/rs12223731>

УДК 656.61.052.484

ВИБІР СКАЛЯРНОГО КРИТЕРІЮ ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ ОБСЕРВАЦІЇ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

Алексейчук Б.М.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. У судноводінні передбачено безперервний контроль місця судна для забезпечення навігаційної безаварійності, точність якого в значній мірі залежить від похибок навігаційних вимірів. В останні десятиріччя було встановлено, що випадкові похибки навігаційних вимірів розподілені не лише по нормальному закону, а і по змішаним законам двох типів [1–3]. Тому при розрахунку обсервованих координат методом найменших квадратів може відбуватися втрата їх точності. В зв'язку з цим виникає потреба в розробці способів компенсації втрат точності.

Актуальність досліджень. Результати досліджень являються актуальним при застосуванні в районах поганого проходження сигналу супутникових систем, де використовуються альтернативні системи контролю місця судна, а також при застосуванні систем кореляційної навігації в прибережних і внутрішніх водах. Також це актуально при використанні ЕКНІС для визначення місця судна по дистанціям і пеленгам.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Ціллю статті являється розробка скалярного критерію оцінки точності обсервації та аналіз шляхів її підвищення.

Виклад основного матеріалу. Як показано в роботі [4], дисперсія обсервації має вигляд:

$$D_n^{mn} = k(n, \alpha_i) \frac{1}{s},$$

$$\text{де } k(n, \alpha_i) = \frac{\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i + \sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i}{\left[\left(\sum_{i=1}^n \cos^2 \alpha_i \right) \left(\sum_{i=1}^n \sin^2 \alpha_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n \sin \alpha_i \cos \alpha_i \right)^2 \right]} - \text{геометричний фактор};$$

$$s - \text{невласний інтеграл, причому } s = \int_{R1} \frac{\left[\frac{\partial}{\partial \xi} f(\xi) \right]^2}{f(\xi)} d\xi;$$

n – число ліній положення (ЛП);

α_i – кут напрямку градієнту і ЛП;

$f(\xi)$ – щільність розподілу похибки ЛП.

Геометричний фактор $k(n, \alpha_i)$ залежить лише від взаємного розташування ЛП.

Дисперсія обсервації D_n^{mn} також залежить від закону розподілу похибки ліній положення, тобто невластного інтегралу s . В роботі [1] показано, що похибки ліній положення можуть мати розподіл по нормальному закону, а також по змішаним законам першого і другого типу.

Якщо через D_m позначити дисперсію похибки ліній положення, то залежність D_n^{mn} від D_m для нормального розподілу похибки має вигляд $D_n^{mn} = k(n, \alpha_i) D_m$, а для змішаних законів першого і другого типу $D_n^{mn} = k(n, \alpha_i) D_m e_{(1,2)}$, причому $e_{(1,2)}$ – ефективність обсервованих координат судна в разі їх розрахунку методом найменших

квадратів.

Як показано в роботі [4], ефективність обсервованих координат судна $e_{(1,2)}$ відповідно має наступний вигляд:

$$e_1 = 1 - \frac{3}{2m^2 + 3m + 1} \text{ і } e_2 = 1 - \frac{3}{2m^2 + 5m + 3},$$

де m – суттєвий фактор закону змішаного розподілу.

Таким чином, одержали вирази мінімальної дисперсії обсервації для нормального закону D_{nN}^{mn} та змішаних законів першого D_{nS1}^{mn} і другого D_{nS2}^{mn} типів, при умові, що кількість ліній положення була більше двох. Причому:

$$D_{nN}^{mn} = k(n, \alpha_i) D_m, \quad D_{nS1}^{mn} = k(n, \alpha_i) D_m e_1, \quad D_{nS2}^{mn} = k(n, \alpha_i) D_m e_2.$$

Якщо розрахунок обсервованих координат проводиться методом найменших квадратів, то незалежно від закону розподілу їх дисперсія D_n дорівнює D_{nN}^{mn} , тобто $D_n = k(n, \alpha_i) D_m$. В роботі [18] зазначається, що ефективність обсервованих координат судна e в контексті проблеми, що розглядається, має статистичну інтерпретацію, тобто дорівнює відношенню мінімально можливої дисперсії обсервованих координат D_n^{mn} до дисперсії D_n , яка забезпечується застосовуванням методом розрахунку координат, у нашому випадку методом найменших квадратів. Очевидно, $e = \frac{D_n^{mn}}{D_n}$, і в разі розподілу похибок ліній положення по нормальному закону $e=1$, а якщо по змішаному закону розподілу першого типу, то $e = e_1$ і змішаному закону розподілу другого типу – $e = e_2$.

Аналіз вище викладеного показує, що дисперсія модуля векторіальної похибки D_n залежить від дисперсії похибки лінії положення D_m , орієнтації ліній положення α_i , їх числа n , та від і метода розрахунку координат, який визначає величину e .

Очевидно, що покращення точності обсервації, тобто зменшення дисперсія модуля векторіальної похибки D_n , можливо вибором коректних параметрів D_m , $k(n, \alpha_i)$ і e .

Розглянемо геометричний фактор $k(n, \alpha_i)$. Проведеними дослідженнями було встановлено, що при постійному куті $\Delta\alpha_i$ між сусідніми напрямками α_i і α_{i+1} , значення якого є $\Delta\alpha_i = \frac{360}{n}$, фактор $k(n, \alpha_i)$ набуває мінімального значення, що залежить лише від числа n ЛП, як показано в табл. 1.

Таблиця 1 – Залежність геометричного фактору від числа n ЛП

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$k(n, \alpha_i)$	2	1,333	1	0,8	0,666	0,5714	0,5	0,444	0,4

Залежно від завданого числа n лінії положення слід вибрати якомога ближче до значення $\Delta\alpha_i = \frac{360}{n}$, чим буде мінімізовано геометричний фактор $k(n, \alpha_i)$.

Похибка навігаційних вимірювань у вибірці має змішаний тип розподілу, як

сукупність нормально розподілених похибок з різними дисперсіями, що залежать від умов вимірювання.

При визначенні місця судна умови вимірювання незмінні, тому похибка навігаційних вимірювань має нормальний розподіл з постійною дисперсією, значення якої невідомо. Із вибірки відомо лише її середньо змішане значення, яке позначимо через D_m . Якщо завдано дисперсію обсервованого місця судна D_z , то, знаючи залежність D_z від числа ЛП і дисперсії D_m , можливо визначити необхідну кількість ЛП, яка забезпечує дисперсію обсервованого місця судна D_z ($D_z = F(n, D_m)$).

Але дійсна дисперсія похибки ЛП не співпадає з дисперсією D_m , тому має місце втрата точності обсервації. Таким чином, дійсна дисперсія обсервації буде більша, чим D_z .

Для того, щоб компенсувати цю втрату точності обсервації необхідно збільшити число ЛП з метою забезпечення необхідного значення дисперсії D_z . Якщо використовувати для розрахунку обсервованих координат при наявності надлишкових ЛП метод найменших квадратів, то ефективність координат є менша одиниці. Тому реальна дисперсія $D_n = F(n, D_m)$ з урахуванням ефективності координат e забезпечує D_z згідно з рівнянням $D_n = F(n, D_m) = D_z e$. З даного рівняння визначається необхідна кількість n ЛП для обсервації міста судна.

Допустимо, що похибка ЛП має розподіл по змішаному закону першого типу, В роботі [1] показано, що ефективність оцінки обсервованих координат e , розрахованих методом найменших квадратів у разі, коли випадкові похибки навігаційних вимірювань розподілені по змішаному закону першого типу менше одиниці, а її значення залежно від істотного параметру m приведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Ефективність змішаного розподілу першого типу

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

Із зростанням m змішаний розподіл прагне до нормального а ефективність e – до одиниці.

Розглянемо приклад, що демонструє запропонований спосіб компенсації втрати точності визначення місця судна. Припустимо, що завдана дисперсія обсервованого місця судна має дорівнювати дисперсії ЛП. Для цього, як впливає з табл. 1, без втрат точності необхідно використання чотирьох ЛП. Також припустимо, що похибки вибірки ЛП розподілені по першому змішаному закону з істотним параметром $m=1$. Як витікає з табл. 3, в цьому разі ефективність $e=0,5$, тобто точність втрачається наполовину. Для компенсації втрати точності дисперсію визначення місця необхідно зменшити вдвічі, чому в табл. 1 відповідає коефіцієнт $k \approx 0,5$, причому він досягається при восьми ЛП, як слідує із тієї ж таблиці.

Тому для компенсації втрати точності обсервації необхідно використовувати додаткові ЛП. Так при $m=1$ потрібно замість 4 ЛП використати 8 ЛП, по яких розрахувати координати методом найменших квадратів, при цьому $D_n = D_m$. Якщо $m=3$, то $e=0,893$ (згідно з табл.2). Аналіз табл. 1 показує, що у цьому випадку замість 4 ЛП достатньо використати лише 5 ЛП.

Висновки.

1. Для оцінки точності обсервації запропоновано дисперсію модуля векторіальної похибки, яка є скалярною величиною.

2. Показано, що пропонується скалярний критерій точності обсервації залежить від дисперсії похибки ЛП, геометричного фактору та методу розрахунку координат судна.

3. Проаналізовано можливість покращання точності визначення місця судна шляхом використання додаткових ліній положення та мінімізації геометричного фактору.

ЛІТЕРАТУРА

1. Д.В Астайкин., В.Е Сикирин., И.И Ворохобин. и Б.М Алексейчук, *Оценка точности координат судна при избыточных измерениях*. Saarbrücken, Deutschland.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017.
2. Vorokhobin, O. Haichenia, V. Sikirin and V. Severin, «Determination of the Law of Probability Distribution of Navigation Measurements», In the 24th International Scientific Conference Transport Means 2020 Sustainability: Research and Solutions, 30.09,2020, pp. 707–711.
3. Luis Monteiro, «What is the accuracy of DGPS?», *J. Navig.* vol. 58, no. 2, pp. 207–225, 2005.
4. І.О. Бурмка, Б.М Алексейчук, «Точність координат визначення місця судна, розрахованих методом найменших квадратів, у разі надмірних вимірів», *Судноводіння*, Вып. 35, DOI: 10.31653/2306-5761.35.2023.10-21, сс. 10–21, 2023.

СЕКЦІЯ:
ТЕХНОЛОГІЇ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА БЕЗПЕКА
ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ
SECTION
SHIPPING TECHNOLOGIES AND TRANSPORT SYSTEMS SAFETY

НАНОКОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СУЧАСНОГО СУДНОПЛАВСТВА

Козицький С. В., Корнієвич С. Г.

Національний університет Одеська морська академія
(Україна)

Вступ. Корпус судна та суднове обладнання, що експлуатується в морському середовищі, піддаються високим напруженням, що виникають внаслідок дії вітру, хвиль та впливу агресивних середовищ – перепадів температури та дії солоної води. Корпус судна та більшість устаткування виготовлялися з металу, які при експлуатації піддавалися корозії, крім того підводна частина корпусу обростає, що погіршує маневреність та чинить додатковий опір руху. Тому проводилися пошуки нових ефективних матеріалів здатних покращити маневреність, збільшити ресурсу та ефективності судна.

Актуальність досліджень. На заміну металам прийшли композиційні матеріали, а найбільше поширення отримали полімерні. Такі матеріали не піддаються корозії, що збільшувало ресурс корпусу та устаткування, суттєво зменшуючи вагу, що покращує управління судна та його маневреність, але мали суттєвий недолік – недостатню міцність. Для збільшення міцності у полімерну матрицю вводили армуючі матеріали, що значно покращувало міцність, і такі матеріали все ж таки знайшли обмежене застосування на судні.

Постановка задачі. Щоб задовольнити сучасні галузеві потреби характеристик композитних полімерів, перейшли до дослідження композитів, що містять нано структурні наповнювачі, які дозволяють істотно змінювати властивості традиційних полімерних композитів.

У цій роботі описані властивості наноконпозиційних матеріалів, проведено аналіз методів для збільшення їх ефективності, шляхом створення матеріалів, які мають велику міцність, проявлять синергетику, що суттєво змінює властивості як матриці, так і наночастинок, яким армують матеріал. Такі наноконпозиційні матеріали зменшують масу судна, мають високу гідрофобність, поглинають ультрафіолет та високу адгезію до металевої поверхні, що збільшує ефективність судна, зменшує витрати на його експлуатацію та збільшує його ресурс.

Оснований матеріал. При зменшенні розміру зразка у одному напрямі менше 100 нм – тонка пластина, у двох – тонкий стрижень чи у трьох – наночастинка змінюються властивості матеріалу зразка. Такі зразки називаються нано матеріалами, для яких спостерігається зміна фундаментальних фізичних параметрів: збільшення твердості в 2–7 разів, межі міцності в 1,5–8 разів, межі плинності в 2–3 рази у порівнянні з традиційними матеріалами. У наноматеріалах спостерігається парадокс міцності – одночасне зростання як міцності так і пластичності, що зумовлює дуже високу міцність та пластичність. Поведінка наночастинок виходить за рамки класичного уявлення про їх рух і потребує застосування рівнянь нерівноважної термодинаміки та квантової механіки [1].

У зв'язку з розвитком нанотехнологій постало завдання розширення функціональних можливостей полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) –підвищення механічних характеристик та отримання нових властивостей, які не досягаються при використанні традиційних армуючих матеріалів, саме це привело до розвитку полімерних наноконпозиційних матеріалів (ПНКМ), де наповнювачем є наноматеріал.

Застосування наноматеріалів для збільшення ефективності ПНКМ. Найбільш ефективно збільшують механічні властивості вуглецеві нанотрубки (ВНТ) та графен, оскільки мають максимально досягнуту міцність, високу стабільність, хімічну сумісність з полімерною матрицею та велику частку поверхневих атомів. В таблиці 1 наведені переваги НКПМ армованих ВНТ та графеном у порівнянні з максимально досягнутими значеннями для КПМ, які армовані скловолокном (ПКМс) та вуглецевим волокном

(ПКМв), які широко використовуються для покращення механічних властивостей НКМ.

Таблиця 1 – Порівняння властивостей ПКМ та ПНКМ матеріалів [2].

Параметр	Традиційні ПКМ	ПНКМ з ВНТ, графеном	Практичне значення для морської техніки
Міцність на розтяг, МПа	ПКМс 700 ПКМв 1200	Збільшена на 30-70% завдяки нанозміцненню	Зменшення маси при збільшенні міцності
Модуль пружності, ГПа	ПКМс 20-40 ПКМв 70-130	Збільшена на 25-40% за рахунок наноматеріалу	Менші прогини корпусних конструкцій
Ударна в'язкість кДж/м ²	ПКМс 30-60 ПКМв 40-80	Покращена до 90-130 за рахунок гальмування росту тріщини	Стійкість до хвильових та ударних навантажень
Опір втоми (10 ⁶ циклів), % від σ_{max}	ПКМс на 40% ПКМв на 50%	65-80% за рахунок рівномірного розподілу напружень	Підвищення ресурсу корпусів і механізмів
Зносостійкість (відносно сталі)	ПКМс 1,5–2,0 ПКМв 2,0–2,5	3,0-5,0 за рахунок зростання твердості та обмеження рухливості полімерних ланцюгів	Довговічність валів, направляючих
Густина, кг/м ³	ПКМс 1700–2000 ПКМв 1500–1700	1400–1650	Зменшення водотоннажності
Температура експлуатації,	до 80–120°C	до 160–220°C	Стійкість у машинних відділеннях
Теплопровідність, Вт/(м·К)	0,2–0,4	2,5–5,0	Тепловідвід у двигунах, електросистемах
Водопоглинання, (24 год)	0,4–1,5%	0,1–0,3%	Менша деградація в морській воді
Корозійна стійкість	Середня	Підвищена у 2–3 рази	Зменшене проникнення агресивних агентів
Довговічність	Середня	Підвищена на 2 рази	Збільшення ресурсу

ПНКМ армовані ВНТ та графітом демонструють виняткові параметри: покращену міцність на вигин, розтяг та модуль пружності, стійкість до корозії у морській воді, вражаючи співвідношення міцності відносно ваги, стійкість до змін температури та втоми, а також низькі витрати на виробництво та обслуговування, робить такі матеріали придатними для використання у морі. Такі ПНКМ були використані для розробки конструкцій гвинтів, полиць для багажу, меблів та обшивки кают. Виготовлення корпусів маломірних морських суден з ПНКМ зумовило зниження їх ваги на 30–40%, що привело до зменшення витрати палива та зменшення забруднення довкілля

Застосування НЧ для отримання ПНКМ з різними властивостями. НЧ завдяки малим розмірам заповнюють поверхневі тріщини та незайняті простори, завдяки великій площі поверхні забезпечують міцніший зв'язок з матрицею, що сприяє кращій взаємодії з матрицею і тим самим збільшують міцність. Крім того НЧ мають велику частку поверхневих атомів, які проявляють значну хімічну активність при взаємодії з атомами матриці. Суттєва взаємодія НЧ з матрицею зумовлює суттєву нерівноважність системи, в якій проявляються процеси самоорганізації, що зумовлюють зміну властивостей, як НЧ, так і матриці.

Процеси самоорганізації приводять до обміну не лише енергією але і масою між НЧ та матрицею, що призводить до утворення специфічних організованих структур з ближнім та дальнім порядком. Результати досліджень [3] показують, що НЧ кремнезему (SiO_2) значно підвищують міцність на розтяг поліетилену високої щільності. Фур'є підтверджує [3] утворення структурних зв'язків Si-O-Si за рахунок самоорганізації НЧ та структурних зв'язків Si-OH та Si-COOH за рахунок самоорганізації НЧ з полімерною матрицею.

Поліпірол, армований НЧ TiO_2 , розміром менше 45 нм, досліджували у видимій та УФ-області [4]. Зі збільшенням концентрації, НЧ TiO_2 до 1,5%, зменшилась ширина забороненої зони, з 4,71 еВ до 3,75 еВ для непрямого оптичного переходу. Оптичний аналіз УФ-спектрів показав, що поглинання приготованих зразків суттєво збільшилося завдяки додаванню НЧ діоксиду титану. Такий НКПМ з НЧ TiO_2 знайшов широке застосування для захисту від УФ складової сонячного випромінювання у авіакосмічній та автомобільній промисловості, ми сподіваємося, що дійде і до суднової галузі.

Оксид магнію має унікальні фізико-хімічні властивості: стійкість до корозії, високий показник заломлення, стабільність, оптична прозорість та висока теплопровідність. Використання НЧ MgO для створення ПНКМ [5] зумовлюють високу механічну міцність, чудову корозійну стійкість, через стабільність, та стійкість до корозії НЧ, високу теплопровідність, що зумовлює підвищує вогнестійкість. ПНКМ з НЧ MgO мають високий показник заломлення у всьому видимому діапазоні 300–800 нм та високий коефіцієнт поглинання в УФ-області. Завдяки вищезазначеним властивостям, ПНКМ з НЧ MgO , використовується як фотокаталізатори та вогнетримкі матеріали. Такий ПНКМ з НЧ MgO також має хороші антибактеріальні властивості, що сприяє регенерації тканин та загоєнню ран.

За допомогою рентгенівської дифракційної спектроскопії та скануючого електронного мікроскопа, було досліджено [6] зміни корозійної поведінки сталі SS 316L, покритою серією розчинів епоксидного покриття, що містять 1, 3, 5, 7 та 10 мас.% наночастинок ZnO . Результати показали, що епоксидне покриття з 3 мас.% НЧ ZnO забезпечило найкращий захист від корозії на нержавіючій сталі 316L, оскільки швидкість корозії металевої підкладки була мінімізована з 0,05268 мм/рік до 0,00047 мм/рік, тобто у 112 разів.

Коли концентрація наночастинок збільшувалася з 0 до 30 мас.% УФ-спектри ПНКМ- Al_2O_3 показали [7] зменшення оптичної ширини забороненої зони Al_2O_3 від 4.13 еВ до 4.02 еВ (прямий перехід) та від 3.66 еВ до 3.39 еВ (непрямий перехід), що вказує на кращу можливість електронного переносу зі зростанням наповнювача. Крім того, спостерігалось збільшення діелектричної проникності з 0,3 до 4,0 на частоті 100 Гц та діелектричних втрат з 0,01 до 0,42. Отже, введення НЧ Al_2O_3 покращує як оптичні, так і електричні властивості ПНКМ- Al_2O_3 , роблячи ці матеріали перспективними для оптоелектронних пристроїв та компонентів з підвищеною провідністю.

При зменшенні розміру НЧ Al_2O_3 -200, 80 та 25 нм зростає модуль пружності ПНКМ- Al_2O_3 на 100%, 175% та 350%, у порівнянні з чистим полідиметилсилоксаном [8]. Крім механічної міцності, досліджені зразки, армовані 25 нм НЧ Al_2O_3 , стійкі до тривалої деформації та здатні підтримувати стабільну роботу під навантаженням. Трибологічні показники підтверджують розробку вискоєфективного наноматеріалу. Крім зазначеного, корозійний опір ПНКМ- Al_2O_3 зріс майже на порядок у NaCl -середовищі (імітація морської води), у порівнянні з чистим полімером. Корозійна швидкість знизилась у 154 рази порівняно з голим металом та у 59 разів порівняно з чистим PVDF відповідно.

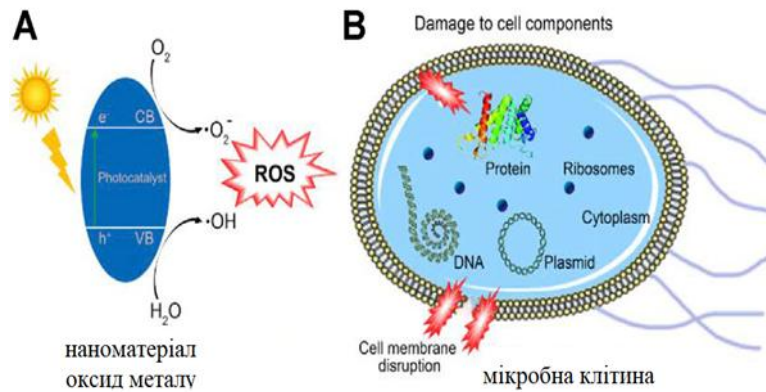


Рисунок 1 – Зображення механізму захисту від обростання: генерації АФК; (В) вплив утворених АФК на прокаріотичну клітину [9]

Наноструктуровані оксиди металів запобігання обростанню підводної частини корпусу судна. Їх дія заснована на вивільненні іонів металів, таких як іони Ti^{+} та Zn^{2+} з відповідних наноматеріалів [8], а також на утворенні активної форми кисню (АФК) (рис. 1).

Опромінення оксидів металів світлом призводить до перенесення електронів із валентної зони, в зону провідності, утворюючи електронно-діркові пари, які можуть ефективно відновити та/або окислити сполуку, адсорбовану на їхній поверхні, утворюючи радикали OH та/або утворюючи аніони O^{2-} (рис. 1). Тобто під дією опромінення відбувається утворення іонів кисню, вільних радикалів та перекисі, які запобігають забрудненню мікро- та макроорганізмами [9]. Утворення АФК призводить до різкого окислювального процесу, який спричиняє пошкодження ДНК і РНК, окислення ліпідів, зміну білка, інгібування ферментів тощо.

Здатність СГ матеріалів до самоочищення [10] вирішує цю проблему оптимально. Покриті НЧ Al_2O_3 на поверхні ілюмінаторів стають СГ і запобігають прилипанню краплі води. При найменшому нахилі поверхні до горизонту ($\alpha < 5^\circ$) вода скочується з неї, захоплюючи при цьому частинки пилу і бруду, не залишаючи слідів від забруднень (рис. 2). Уникнення розводів на склі ілюмінаторів навігаційного містка та відсутність необхідності їх періодичних очищень забезпечує надійне спостереження, підвищуючи навігаційну безпеку судноводіння.



Рисунок 2 – Самоочищення ілюміна-торів навігаційного містка судна [10]

Мінімізуючи накопичення бруду, СГ поверхні сприяють довговічності та ефективності матеріалів і конструкцій, тому знаходять застосування для очищення як надводної, так і підводної поверхні корпусу судна та для захисту корпусу судна від корозії, забруднення і поліпшення гідродинамічних властивостей судна.

Питання захисту від обледеніння в умовах низьких температур та високої

вологості, полярних регіонів, хвилює дослідників. Ожеледь може пошкоджувати корпус судна та становить серйозну загрозу для безпеки руху судна у холодну погоду а також, приводить до значних економічних втрат [10].

Для вирішення цієї проблеми в останні роки були запропоновані супергідрофобні покриття [1]. Такі покриття мають високу ефективність у порівнянні з традиційними способами та зручні у застосуванні. У поєднанні з низькою теплопровідністю, покриття проявляють чудові характеристики проти зледеніння – відсутність замерзання протягом принаймні 150 хвилин при температурі -5°C . і швидке розморожування, за 12,7 хвилин у реальних атмосферних умовах за рахунок ефективного використання природного сонячного світла в таких середовищах [11].



Рисунок 3 – Супергідрофобне нанопокриття, яке запобігає обледенінню

Висновки. Нанотехнології дозволяють створити на основі полімерів матеріали, властивості яких залежать від матеріалу армування та проявляють виняткові властивості:

а) малі розміри нано частинок заповнюють пустоти, збільшуючи міцність матеріалу та опір проникнення вологи чи агресивного оточення, що забезпечує підвищену міцність, корозійну стійкість та довговічності в агресивному середовищі (морська вода, кислоти, бензин, хімічні речовини);

б) ефективна взаємодія між наночастинками та матрицею зумовлює синергетику складових ПНКМ, що призводить до зміни оптичних, електричних та термічних властивостей, що дозволяє отримувати матеріали зі значно кращими властивостями, ніж традиційні матеріали;

в) нова категорія полімерних матеріалів, армовні наночастинками та наноматеріалами, почала впроваджуватися та має потенціал замінити традиційні матеріали, що використовуються у морській промисловості, оскільки дозволяє отримувати композитні матеріали, які збільшують ресурс судна, зменшують опір руху судна, покращують маневреність та підвищують навігаційну безпеку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kozytskyi S. V. Kiriian S. V. Properties and behavior of nanoparticles // Фізика аеродисперсних систем. 2022, №60. с. 15–26. <https://doi.org/10.18524/0367-1631.2022.60.265983>.
2. Abdulrahman Adeiza Musa, at al. Nano-Enhanced Polymer Composite Materials: A Review of Current Advancements and Challenges / Polymers 2025, 17, 893

<https://doi.org/10.3390/polym17070893>

3. Di Credico, B., et al. (2023) Silica nanoparticles self-assembly process in polymer composites: Towards advanced materials *Ceramics International*, 49(16). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.05.125>
4. Thangamani, S.K.K. Pasha, Titanium dioxide (TiO₂) nanoparticles reinforced polyvinyl formal (PVF) nanocomposites as chemiresistive gas sensor for sulfur dioxide (SO₂) monitoring, *Chemosphere* 275 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129960>
5. S. Abinaya, H.P. Kavitha, M. Prakash, A. Muthukrishnaraj, Green Synthesis of Magnesium Oxide Nanoparticles and its Applications: A Review,” *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, vol. 19, Elsevier B.V., 2021, <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100368>. Apr. 01
6. Raluca Șomoghi, et al. The Impact of ZnO Nanofillers on the Mechanical and Anti-Corrosion Performances of Epoxy Composites / *Polymers* (Basel), Vol. 16, No. 14, 2054. (2024) <https://doi.org/10.3390/polym16142054>
7. Fatemah H. Alkallas et al. Influence of Al₂O₃ nanoparticles on the structural, optical, and electrical properties of PVC/PS nanocomposite / *Surfaces and Interfaces* 51: 104651, 2024. DOI: 10.1016/j.surfin.2024.104651
8. Youssef, Z., Colombeau, L., Yesmurzayeva, N., et al. (2018). Dye-sensitized Nanoparticles for Heterogeneous Photocatalysis: Cases Studies with TiO₂, ZnO, Fullerene and Graphene for Water Purification. *Dyes Pigm.* 159, 49–71. doi:10.1016/j.dyepig.2018.06.002
9. Козицький С. В. Застосування нанометеріалів для запобігання біологічному обростанню та корозії корпусу судна // *Судноводіння / Shipping & Navigation*. №36, 2024. С. 23–35 DOI: 10.31653/2306-5761.36.2024.64-76
10. Козицький С. В. Огляд застосування супергідрофобного наноструктурованого покриття для збільшення ресурсу корпусу судна // *Судноводіння | Shipping & Navigation* №38, 2025. С. 31-45 DOI: 10.31653/2306-5761.38.2029.01-032
11. Shima A. Higazy, Mohamed S. Selim, Ahmed M Azzam, Sherif A. El-Safty (2024). Hierarchical biocide-free silicone/graphene-silicon carbide nanocomposite coatings for marine antifouling and superhydrophobicity of ship hulls / *Chemical Engineering Science* 291(7):119929. DOI:10.1016/j.ces.2024.119929

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ ОБ'ЄКТІВ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ГІБРИДНИХ ЗАГРОЗ

Мельник О. М., Довгошеєнко А. І., Щенявський Г. С.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Забезпечення безпеки об'єктів морського транспорту є однією з пріоритетних складових національної безпеки держави та важливим чинником стабільного функціонування міжнародних транспортно-логістичних систем. Морський транспорт відіграє ключову роль у забезпеченні зовнішньоекономічної діяльності, транзитного потенціалу та інтеграції держави у світову економіку, що зумовлює підвищену увагу до питань його стійкості та захищеності [1; 2].

Актуальність дослідження. В умовах сучасних геополітичних трансформацій та зростання конфліктності у міжнародних відносинах характер загроз безпеці об'єктів морського транспорту зазнає суттєвих змін. Традиційні загрози дедалі частіше трансформуються у складні гібридні впливи, які поєднують воєнні та невоєнні інструменти, технічні та інформаційні засоби, а також кібернетичні й організаційні механізми дестабілізації [3; 4]. Такий характер загроз істотно ускладнює процеси їх своєчасного виявлення, оцінювання та нейтралізації. Особливої актуальності проблема забезпечення безпеки об'єктів морського транспорту набуває для України в умовах воєнного стану та цілеспрямованого впливу на об'єкти критичної інфраструктури. Морські порти, портові термінали, судноплавні компанії, навігаційні та інформаційні системи розглядаються як потенційні об'єкти гібридного впливу, що потребує переосмислення існуючих підходів до управління безпекою [1; 3; 5].

За таких умов актуалізується необхідність переходу від фрагментарних заходів захисту до комплексних організаційно-технічних моделей управління безпекою, здатних інтегрувати технічні засоби захисту, організаційні механізми управління та процедури підтримки прийняття рішень у єдину адаптивну систему.

Постановка задачі.. Сучасні загрози безпеці об'єктів морського транспорту все частіше набувають гібридного характеру, поєднуючи технічні, кібернетичні, організаційні та інформаційно-психологічні впливи. Такі загрози характеризуються багатоканальністю реалізації, складністю ідентифікації джерел, високим рівнем адаптивності та спрямованістю як фізичних об'єктів, а й процеси управління та прийняття рішень. У цих умовах традиційні підходи до управління безпекою, орієнтовані переважно на окремі технічні чи організаційні заходи, виявляються недостатньо ефективними та необхідний перехід до комплексних організаційно-технічних моделей управління безпекою об'єктів морського транспорту, які забезпечують інтеграцію технічних засобів захисту, організаційних механізмів управління та процедур підтримки прийняття рішень. Метою даного дослідження є аналіз гібридних загроз та обґрунтування необхідних сучасних підходів до управління безпекою на морському транспорті.

Основний матеріал. Питання безпеки морського транспорту широко розглядається в наукових працях вітчизняних та міжнародних дослідників. Значна кількість робіт присвячена технічній та фізичній безпеці суден та портової інфраструктури, управлінню ризиками, захисту морських об'єктів та регуляторним аспектам систем безпеки в морській галузі. Однак більшість цих досліджень розглядають гібридні загрози переважно з точки зору військової безпеки або з використанням загальнотеоретичних підходів, без врахування специфіки морського транспорту як складних соціально-технічних систем [6; 7].

Аналіз наукових джерел свідчить про те, що існуючі підходи до управління

безпекою на морі є фрагментарними та, як правило, зосереджені на окремих компонентах системи безпеки – технічних, організаційних або інформаційних [7; 8]. Інтеграція цих компонентів в єдину організаційно-технічну модель управління, здатну адаптуватися до динамічних змін характеру загроз та умов функціонування морського транспорту, залишається недостатньо розробленою. Таким чином, незважаючи на широкі наукові дослідження в галузі морської безпеки, розробка та валідація організаційно-технічних моделей управління безпекою морського транспорту в умовах гібридних загроз залишаються недостатньо розробленими. Це вимагає подальших досліджень, спрямованих на систематизацію загроз та розробку комплексних підходів до управління безпекою.

Пропонується організаційно-технічна модель управління безпекою об'єктів морського транспорту, що базується на взаємодії п'яти ключових компонентів (рис. 1):

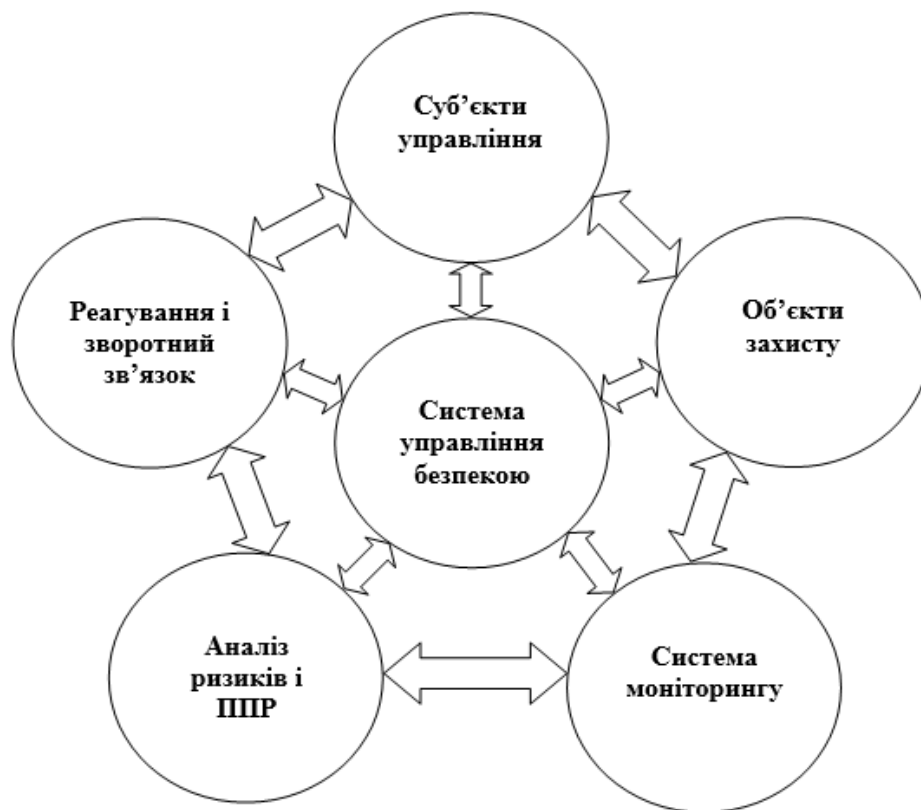


Рисунок 1 – Організаційно-технічна модель управління безпекою об'єктів морського транспорту

1. Суб'єкти управління безпекою, до яких належать органи державного управління, адміністрації морських портів, служби безпеки, оператори технічних систем, а також інші зацікавлені сторони, відповідальні за прийняття управлінських рішень.

2. Об'єкти захисту, що включають портову та суднову інфраструктуру, навігаційні й інформаційні системи, автоматизовані системи управління, персонал та процеси логістичного забезпечення.

3. Система моніторингу та виявлення загроз, яка поєднує технічні засоби спостереження, кібернетичного захисту, збору та аналізу інформації, а також організаційні процедури обміну даними між суб'єктами безпеки.

4. Механізми аналізу ризиків і підтримки прийняття рішень, що забезпечують оцінку ймовірності та наслідків реалізації гібридних загроз, формування альтернативних сценаріїв реагування та вибір оптимальних управлінських рішень [9].

5. Механізми реагування та зворотного зв'язку, які включають організаційні заходи, технічні дії, коригування режимів функціонування систем безпеки та оновлення

управлінських процедур на основі отриманого досвіду.

Взаємодія запропонованих 5 компонент забезпечує цілісність і адаптивність управління збереженням об'єктів морського транспорту в умовах гібридного впливу.

Логіку функціонування організаційно-технічної моделі управління безпекою доцільно розглядати як безперервний циклічний процес, що включає основні етапи (рис. 2).



Рисунок 2 – Цикл управління безпекою об'єктів морського транспорту в умовах гібридних загроз

Цикл починається з ідентифікації гібридних загроз, які визначаються на основі даних технічного моніторингу, інформаційних повідомлень, результатів аналізу кіберінцидентів та організаційних сигналів. Потім проводиться оцінка ризиків, що передбачає визначення потенційних наслідків реалізації загроз об'єктів морського транспорту, і навіть аналіз вразливостей технічних і організаційних компонентів системи безпеки. Далі формуються управлінські рішення, спрямовані на запобігання, локалізацію чи мінімізацію наслідків гібридних загроз з урахуванням обмежень ресурсів та часу. Заходи реагування реалізуються рахунок застосування технічних засобів захисту, організаційних процедур, зміна режимів роботи систем і координацію дій суб'єктів безпеки. Заключним етапом є оцінка ефективності та коригування моделі, що забезпечує зворотний зв'язок, накопичення досвіду та адаптацію системи управління безпекою до нових завдань та викликів для безпеки.

Результати дослідження. В результаті проведеного дослідження проаналізовано сучасні гібридні загрози безпеці об'єктів морського транспорту та визначено їхні характерні ознаки, зокрема комплексність впливу, багатоканальність реалізації, високий рівень адаптивності та спрямованість на технічні, інформаційні й організаційні складові системи безпеки. Показано, що в умовах гібридного протистояння традиційні підходи до управління безпекою, орієнтовані на ізольоване застосування окремих заходів захисту, не забезпечують необхідного рівня стійкості об'єктів морського транспорту [7; 10]. Здійснено класифікацію гібридних загроз з урахуванням специфіки функціонування об'єктів морського транспорту, що дозволяє розглядати такі загрози як взаємопов'язану систему технічних, кібернетичних, організаційних та інформаційно-психологічних впливів. Це створює основу для формування комплексних підходів до управління

безпекою та підвищення обґрунтованості управлінських рішень.

Висновки.. Отримана організаційно-технічна модель — це необхідна умова виживання морської галузі у цифрову епоху, що забезпечує безперерйність світової торгівлі перед прихованими та комбінованими загрозами. Традиційні системи безпеки протистоять фізичним чи цифровим загрозам. Гібридна модель інтегрує технічні засоби захисту, організаційні механізми управління та процедури підтримки прийняття рішень у єдину адаптивну систему. Запропонована організаційно-технічна модель забезпечує системність, адаптивність та узгодженість дій суб'єктів безпеки в умовах динамічної зміни характеру гібридних загроз. У разі глобальної нестабільності така модель стає гарантом економічної безпеки. Вона дозволяє інтегрувати національні стандарти захисту та технічні засоби у єдину екосистему.

Результати дослідження можуть бути використані як теоретична основа для подальшої формалізації організаційно-технічних моделей управління безпекою об'єктів морського транспорту, а також при розробці практичних рекомендацій щодо удосконалення систем безпеки морських портів та інших об'єктів транспортної інфраструктури. Подальший аналіз доцільно направити оцінку ефективності запропонованих моделей та його адаптацію до конкретних умов функціонування морського транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про національну безпеку України, Закон України № 2469-VIII (2018). Відомості Верховної Ради України, (31), ст. 241. zakon.rada.gov.ua
2. Про морські порти України, Закон України № 4709-VI (2012). Відомості Верховної Ради України, (7), ст. 65. zakon.rada.gov.ua
3. Президент України. (2022). Стратегія морської безпеки України (Указ № 37/2022). www.president.gov.ua
4. Ліпкан В. А. (2019) Гібридна війна: сутність, зміст, ознаки // Державне управління: теорія та практика. № 1. с. 5-13.
5. Bichou, Khalid. (2008). Security and Risk-Based Models in Shipping and Ports. OECD/ITF Joint Transport Research Centre Discussion Papers. <https://doi.org/10.1787/228863484281>
6. Беленький О. Ю., Гребенюк М. О. (2021) Управління безпекою об'єктів критичної інфраструктури: системний підхід // Науковий вісник Національного університету цивільного захисту України. № 2. с. 45–53.
7. Bichou, Khalid. (2008). Risk Management in Port Operations, Logistics and Supply Chain Security. Maritime Economics & Logistics. <https://doi.org/10.1057/MEL.2008.9>,
8. Ковальов В. І., Савчук О. М. (2020) Організаційно-технічні аспекти управління безпекою транспортних систем // Вісник транспортних систем і технологій. № 3. с. 21–28.
9. Rausand M., Haugen S. (2020) Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications. – Hoboken : Wiley, ISBN: 978-1-119-37722-1, March 2020, 784 pages
10. Sheffi, Yossi. (2013). The Resilient Enterprise: Overcoming Vulnerability for Competitive Advantage. https://www.researchgate.net/publication/23573710_The_Resilient_Enterprise_Overcoming_Vulnerability_for_Competitive_Advantage Дата доступу: 09.03.2026

SMART INTERMODAL CONTAINER TRANSPORTATION: IOT APPLICATIONS AND INDUSTRY SOLUTIONS

Drozhzhyn O., Koskina Y.
Odesa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. The Internet of Things (IoT) has transformed various industries, and container shipping is no exception. This process involves the global transport of goods in standardized containers and is characterized by complexity, vast supply chains and stringent time-sensitive requirements. By facilitating real-time tracking, data collection and automated operations, IoT technology has emerged as a significant enabler of efficiency, transparency and innovation in this field.

The application of the IoT in the container industry dates back to the early 2000s, when there was a rapid growth in containerized shipping as a result of the expansion of global trade. Traditionally, container transportation relied heavily on manual processes and basic tracking systems, which made it difficult to obtain real-time data about the location, condition and security of containers.

Development of IoT Technologies. The initial efforts to integrate the IoT involved using radio frequency identification (RFID) tags to track containers. Although RFID technology enabled automated identification and data capture, it had limitations in terms of communication range and the absence of real-time updates. Meanwhile, the development of GPS tracking systems provided an early method for monitoring container movements.

By the late 2000s, advancements in wireless communication technologies and sensor devices had enabled the industry to explore more sophisticated IoT applications. The ability to install low-cost sensors on containers and pair them with cellular, satellite and wireless network technologies laid the foundation for real-time data collection and remote monitoring, ushering in the era of 'smart containers'.

The expansion of IoT applications in the container industry over the last decade has been driven by advancements in connectivity, cloud computing, big data analytics, and the demand for real-time supply chain visibility.

Key Applications of IoT. Real-Time Tracking and Monitoring. IoT sensors embedded within containers allow operators to monitor their location, movement, and environmental conditions in real time. Smart containers equipped with GPS sensors, temperature sensors, and accelerometers provide real-time data on location, cargo status, and environmental conditions.

Supply Chain Optimization. IoT helps optimize logistics processes by providing end-to-end visibility of the supply chain. Real-time data on container movements help shipping companies and logistics providers optimize routes, manage fuel consumption, and avoid delays.

Security and Risk Management. IoT devices help mitigate these risks by providing enhanced security features. Smart locks, intrusion detection sensors, and geofencing technology enable operators to monitor for unauthorized access or tampering with containers.

Automation and Efficiency. The integration of IoT into ports and terminals has streamlined operations through automation. IoT-enabled cranes, container handling equipment, and automated guided vehicles (AGVs) reduce labor costs, increase throughput, and minimize human error.

IoT in Intermodal Transport. IoT plays a transformative role in intermodal transport, which involves the seamless movement of goods across multiple modes of transportation. IoT technologies are used to enhance visibility, efficiency, safety, and overall operational effectiveness across the logistics chain.

Asset Management. IoT helps by tracking container utilization, monitoring wear and tear of equipment, enabling predictive maintenance and minimizing downtime.

Fleet Management. IoT solutions improve fleet management by optimizing routes,

reducing fuel consumption and delivery times, and monitoring vehicle health.

Automation and Smart Warehousing. IoT plays a role in the automated handling of goods and warehouse operations, including automated loading and unloading processes, as well as smart inventory management.

Environmental Monitoring and Sustainability. IoT enables monitoring emissions and optimizing fuel usage, leading to reduced environmental impact.

Security Enhancements. IoT systems contribute to higher security standards by enabling geofencing and monitoring cargo conditions.

Collaborative Networks. IoT connects stakeholders across the intermodal transport network for better coordination and real-time data exchange.

Practical Implementation. The intermodal transportation companies use a variety of IoT products and solutions. Maersk uses its own RCM system to monitor refrigerated containers. CMA CGM TRAXENS uses an IoT-solution for container monitoring. Hapag-Lloyd uses IoT to track the temperature and location of containers. UPS uses ORION, an IoT-based system that analyzes real-time data to optimize delivery routes. Kuehne+Nagel provides real-time visibility of shipments across all transport modes.

Challenges and Barriers. While IoT has significantly improved the container industry, several challenges remain: connectivity issues, data overload and integration, cybersecurity risks, and lack of standardization. Containers often pass through remote areas where network coverage is limited or unreliable. The vast amount of data generated by IoT sensors can be overwhelming if not properly managed. IoT devices are vulnerable to hacking. The lack of industry-wide standards complicates interoperability between stakeholders.

Conclusions. The lag between the development of standards and the practical application of IoT is a serious threat to the container industry. The lack of standardization creates interoperability issues that can lead to compatibility problems and limited functionality.

The container industry is looking forward to cutting-edge IoT-based tools for container shipping: autonomous ships, fully integrated smart container ecosystems, digital twins of intermodal supply chains, and global monitoring using satellite technology — have already been announced and partially tested, but their widespread adoption remains limited by high costs. Implementation is partly hampered by a lack of standardization, regulatory uncertainty, and tool compatibility issues. At the same time, the general trend in IoT development in intermodal and container shipping points toward a shift from isolated monitoring solutions to fully integrated, intelligent, and autonomous logistics systems. Over the next decade, IoT is expected to become ubiquitous in the industry, providing door-to-door visibility, predictive analytics, and automated decision-making, while supporting sustainable development.

REFERENCES

1. Drozhzhyn, O. L. (2024). IOT in container shipping industry: applications and examples of solutions. *Systems and Technologies*, 68(2), 112-120. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.13>
2. Becker M, Wenning B-L, Görg C, Jedermann R, Timm-Giel A (2010) Logistic applications with wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 6th workshop on hot topics in embedded networked sensors–HotEmNets’10*. ACM Press, Killarney, Ireland, p 1. <https://doi.org/10.1145/1978642.1978650>
3. Choi, H. R., Moon, Y. S., Kim, J. J., Lee, J. K., Lee, K. B., & Shin, J. J. (2017). Development of an IoT based container tracking system for China’s Belt and Road (B&R) initiative. *Maritime Policy & Management*, 45(3), 388–402. <https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1400190>
4. Pajic, V., Andrejic, M., & Chatterjee, P. (2024). Enhancing cold chain logistics: A framework for advanced temperature monitoring in transportation and storage. *Mechatron. Intell Transp. Syst*, 3(1), 16-30

5. Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Yarovenko, V., Pavlova, N., Drozhzhyn, O., & Vishnevsky, D. (2025). Smart port concept: A case study of port-integrated autonomous networks. *Journal of Maritime Research*, 22(1), 315–323.
6. Melnyk O., Onishchenko O., Onyshchenko S. (2023). Renewable Energy Concept Development and Application in Shipping Industry. *Lex Portus*, 9 (6), pp. 15 – 24. <https://doi.org/10.26886/2524-101X.9.6.2023.2>

SAFETY OF TRANSPORT SYSTEMS

¹Dolia K., ²Dolia O.

¹National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»
(Ukraine)

²Kharkiv National University of Radio Electronics
(Ukraine)

Introduction. A contemporary transport system is a complex socio-technical network in which safety is determined not by an isolated element but by the quality of interaction among subsystems: «infrastructure – vehicle – operator – user – digital services – regulator». Therefore, increasing traffic intensity, urbanization, automation, and digitalization simultaneously generate new opportunities and new classes of risks (Aarts & van Schagen, 2006; Lord & Mannering, 2010; Mannering et al., 2016; Papadimitriou et al., 2019).

Methodologically, this study relies on a probabilistic interpretation of risk, crash analysis approaches, and contemporary research on the safety of intelligent and automated transport systems (Savolainen et al., 2011; Koopman & Wagner, 2017; Shladover, 2018; Papadoulis et al., 2019). For safety assessment tasks, crash indicators, surrogate traffic conflict measures, and digital monitoring of behavioral deviations of road users are employed (Abdel-Aty & Pande, 2005; Lee et al., 2019; Yannis et al., 2017; Ziakopoulos & Yannis, 2020).

System Analysis of Transport System Safety. Within the system approach, the transport system is considered a multi-level socio-technical structure in which crash occurrence and critical failures are formed not by a single cause but by the superposition of factors of different nature: infrastructure condition, traffic regimes, technical resource of vehicles, transport operations organization, human factor, and quality of digital control (Lord & Mannering, 2010; Mannering et al., 2016; Papadimitriou et al., 2019; Ziakopoulos & Yannis, 2020). Therefore, the safety task should be formulated as a system resilience problem: to minimize the probability of hazardous events and limit the severity of consequences if they occur.

The basic risk estimate of the i -th scenario is defined as (1):

$$R_i = P_i \cdot C_i, \quad (1)$$

where P_i is the probability of an undesirable event and C_i is consequence severity. This form is convenient for comparing different scenarios (collision, pedestrian impact, technical failure, cyber incident) because it maps them to a common quantitative scale. At the network level, it is appropriate to use an integral risk indicator (2):

$$R_\Sigma = \sum_{i=1}^n w_i R_i, \quad (2)$$

where w_i is the criticality weight of the scenario. The weights are determined considering transport policy priorities: preservation of life and health, reliability of transport operations, continuity of infrastructure functioning, and socio-economic losses. Practice shows that a weighted model avoids the «average temperature» fallacy, when locally rare but catastrophic events are underestimated (Elvik, 2008; Gitelman et al., 2010; Yannis et al., 2017).

From the management perspective, the safety system should include three loops: *preventive*, *operational*, and *recovery*. The preventive loop covers hazard auditing, risk modeling, and planning of engineering and organizational countermeasures. The operational loop covers real-time monitoring and response (speed control, priority control, flow control, access regime control). The recovery loop covers consequence minimization and restoration of the system to a normative state. This structuring is consistent with contemporary approaches to crash analysis and systemic safety control (Salmon et al., 2016; Koopman & Wagner, 2017; Shladover, 2018).

To select management decisions, it is advisable to minimize the objective function of total losses (3):

$$J = \alpha R_\Sigma + \beta C_{\text{op}} + \gamma C_{\text{soc}}, \quad (3)$$

where C_{op} denotes operational costs of the carrier and infrastructure operator, C_{soc} denotes social losses (injuries, delays, environmental and noise effects), and α, β, γ are prioritization coefficients. The function J reflects the «safety + efficiency» principle, where safety is not opposed to productivity but integrated into the economics of transport management.

The effectiveness of implemented measures is assessed by relative risk reduction (4):

$$\eta = \frac{R_{\Sigma}^{before} - R_{\Sigma}^{after}}{R_{\Sigma}^{before}} \quad (4)$$

Practical interpretation: if $\eta > 0$, the system has become safer; the closer η is to 1, the higher the effect of the safety program. For correct assessment, identical observation periods and comparable operating conditions must be ensured.

Special attention should be paid to the relationship between micro-level risks and macrolevel network management. At the micro level, critical factors include conflicts at flow merging/crossing points, speed regime violations, operator errors, and technical failures of vehicle subsystems (Hassan et al., 2012; Lee et al., 2019). At the macro level, key factors include route network configuration, demand non-uniformity, corridor overload, and robustness of control algorithms under peak and crisis scenarios (Vlahogianni et al., 2014; Talebpour & Mahmassani, 2016; Chen & Englund, 2016). Therefore, system analysis should be conducted hierarchically: «segment – route – network – city».

In practical applications, it is advisable to distinguish risk groups: (1) infrastructural (geometry, pavement condition, visibility, intersection organization); (2) operational (schedule disruptions, overload, regime conflicts); (3) technical (failures of braking, steering, and electronic systems); (4) behavioral (driver errors, risky user behavior); (5) digital (data failures, algorithmic errors, cyber threats). This classification is consistent with contemporary studies of connected and automated transport safety (Fagnant & Kockelman, 2015; Papadoulis et al., 2019; Kuutti et al., 2020; Rosique et al., 2019).

From the decision-making perspective, the key task is ranking scenarios by the combination «scale of consequences – controllability – mitigation cost». This enables concentration of resources on highly critical and simultaneously manageable risks: conflict-prone network nodes, speed regimes on dangerous segments, fleet technical condition, and quality of dispatching data and algorithms. Under this approach, system analysis becomes a tool not only for diagnostics but also for designing a resilient transport system with a predictable safety profile.

Risk Consideration in Contemporary Transport Systems. In contemporary transport systems, risks are spatial-temporal and multifactorial: transport demand, flow control regimes, technical reliability of rolling stock, road user behavior, weather and climate conditions, as well as cyber-physical vulnerabilities of infrastructure interact simultaneously. Therefore, proper risk consideration requires moving from static assessments to dynamic models in which risk parameters are updated in real time based on telemetry, detector data, V2X messages, and operational logs (Fagnant & Kockelman, 2015; Talebpour & Mahmassani, 2016; Shladover, 2018; Kuutti et al., 2020).

Let the transport system be represented as a directed graph $G = (V, E)$, where V is the set of nodes (intersections, stops, hubs) and E is the set of arcs (network segments). For arc $e \in E$ at time t , local risk is defined as (5):

$$R_e(t) = \Pr(\mathcal{A}_e(t) \mid \mathbf{x}_e(t)) \cdot C_e(t), \quad (5)$$

where $\mathcal{A}_e(t)$ is the incident event (collision, failure, critical violation), $\mathbf{x}_e(t)$ is the state vector (speed, density, headway variation, weather and behavioral features), and $C_e(t)$ is expected consequence severity.

Network-level risk is defined as (6)

$$R_{net}(t) = \sum_{e \in E} \omega_e(t) R_e(t), \quad \sum_{e \in E} \omega_e(t) = 1, \quad (6)$$

where $\omega_e(t)$ is the dynamic criticality weight of arc e (a function of flow intensity, role in network connectivity, and sensitivity to cascading failures).

To account for intertemporal effects (delay accumulation, capacity degradation, and secondary incident risk), it is appropriate to use discrete state dynamics (7):

$$x(t+1) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + d(t), \quad (7)$$

where $u(t)$ denotes control actions (signal plans, speed limits, priorities) and $d(t)$ denotes external disturbances. Then the safety management task can be formulated as minimization of the horizon- T functional (8):

$$\min_{\{u(t)\}_{t=0}^{T-1}} J = \sum_{t=0}^{T-1} (\alpha R_{\text{net}}(t) + \beta C_{\text{delay}}(t) + \gamma C_{\text{em}}(t) + \delta C_{\text{ctrl}}(t)), \quad (8)$$

subject to safety constraints (9):

$$\Pr(\mathcal{A}_e(t)) \leq \varepsilon_e, \quad v_e^{\min} \leq v_e(t) \leq v_e^{\max}, \quad q_e(t) \leq q_e^{\max}, \forall e \in E \quad (9)$$

Here, C_{delay} denotes delay losses, C_{em} denotes environmental losses, and C_{ctrl} denotes the cost of control interventions.

For connected transport systems, cyber risks must be incorporated. If $\kappa(t)$ is the indicator of information-loop compromise, then adjusted risk is (10):

$$\tilde{R}_{\text{net}}(t) = R_{\text{net}}(t)(1 + \lambda\kappa(t)), \quad \kappa(t) \in [0,1], \lambda > 0$$

This allows representing the “digital risk multiplier” effect, when data integrity violations or communication delays increase the probability of unsafe modes (Koopman & Wagner, 2017; Papadoulis et al., 2019; Rosique et al., 2019).

In practice, it is appropriate to apply a multi-level risk decomposition (11):

$$R_{\text{net}}(t) = R_{\text{inf}}(t) + R_{\text{veh}}(t) + R_{\text{hum}}(t) + R_{\text{org}}(t) + R_{\text{cyb}}(t), \quad (11)$$

where the components correspond to infrastructural, technical, behavioral, organizational, and cybernetic loops. The component form is convenient for targeted selection of countermeasures: engineering modifications, technical maintenance, personnel training, regulatory adjustments, and cyber defense reinforcement (Salmon et al., 2016; Yannis et al., 2017; Ziakopoulos & Yannis, 2020).

To detect critical states early, a vector of leading indicators is introduced (12):

$$k(t) = [k_1(t), k_2(t), \dots, k_m(t)]^T, \quad (12)$$

where, in particular, k_1 is the frequency of dangerous maneuvers, k_2 is the number of technical failures, k_3 is exceedance of speed thresholds, and k_4 is anomalies in control signals. The early-warning index is (13):

$$I_{\text{EW}}(t) = \sigma(w^T k(t) + b), \quad (13)$$

where $\sigma(\cdot)$ is the sigmoid function. If $I_{\text{EW}}(t) > \tau$, preventive actions are triggered.

In addition to mean risk, safety analysis critically requires assessing distribution tails of losses. For this purpose, the conditional risk measure CVaR is used (14):

$$\text{CVaR}_\alpha(L) = \mathbb{E}, \quad (14)$$

where L is the random loss variable. Minimization of CVaR_α ensures control of rare but severe events, which is especially important for highly critical nodes.

The effectiveness of implemented measures over the time window $[t_0, t_1]$ is assessed by the indicator system (15):

$$\eta_R = \frac{\bar{R}_{\text{before}} - \bar{R}_{\text{after}}}{\bar{R}_{\text{before}}}, \quad \eta_{\text{CVaR}} = \frac{\text{CVaR}_\alpha^{\text{before}} - \text{CVaR}_\alpha^{\text{after}}}{\text{CVaR}_\alpha^{\text{before}}}, \quad \eta_Q = \frac{Q_{0.95}^{\text{before}} - Q_{0.95}^{\text{after}}}{Q_{0.95}^{\text{before}}}, \quad (15)$$

where $Q_{0.95}$ is the 95th percentile of losses/delays. This metric system combines «average» and «extreme» dimensions of safety.

Thus, risk consideration in contemporary transport systems should be based on dynamic network modeling, multicriteria optimization, and continuous digital monitoring. The combination of these tools makes it possible to reduce both the frequency of incidents and the severity of their consequences under high uncertainty and technological complexity (Fagnant & Kockelman, 2015; Talebpour & Mahmassani, 2016; Kuutti et al., 2020; Rosique et al., 2019).

Conclusions. The study develops a risk-oriented framework for system analysis of transport safety that integrates probabilistic event assessment, network risk aggregation, and

multicriteria optimization of management decisions. The proposed formalization (R_i , R_Σ , $R_{\text{net}}(t)$, J) enables a transition from descriptive crash analysis to a quantitatively reproducible decision-making framework.

It is demonstrated that, under contemporary digital mobility conditions, dynamic updating of risk parameters based on streaming monitoring data is methodologically necessary, along with combining mean and tail safety metrics (in particular CVaR). This approach increases model sensitivity to rare but highly hazardous scenarios and enables correct ranking of critical network nodes, traffic regimes, and failure types.

The scientific and practical significance of the results lies in the possibility of implementing a unified procedure: risk identification $\rightarrow$ scenario prioritization $\rightarrow$ countermeasure optimization $\rightarrow$ post-audit of effectiveness using indicators η_R , η_{CVaR} , η_Q . In applied terms, this creates a basis for synchronizing safety goals, operational reliability, and economic efficiency of the transport system.

Therefore, system analysis accounting for the multi-level risk structure (infrastructural, technical, behavioral, organizational, and cybernetic) is a methodologically substantiated instrument for increasing transport system resilience. Prospects for further research are associated with empirical calibration of weighting coefficients in objective functions, expansion of scenario modeling for crisis regimes, and integration of digital twins into the operational safety management loop.

REFERENCES

1. Abdel-Aty, M., & Pande, A. (2005). Identifying crash propensity using specific trafficspeed conditions. *Journal of Safety Research*, 36(1), 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2004.10.00>
2. Aarts, L., & van Schagen, I. (2006). Driving speed and the risk of road crashes: A review. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2), 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.07.004>
3. Elvik, R. (2008). A survey of operational definitions of hazardous road locations in some European countries. *Accident Analysis & Prevention*, 40(6), 1830–1835. <https://doi.org/10.1016/j.aa>
4. Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
5. Gitelman, V., Doveh, E., & Hakkert, S. (2010). Designing a composite indicator for roadsafety. *Safety Science*, 48(9), 1212–1224. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.01.011>
6. Hassan, H. M., Abdel-Aty, M. A., & Brown, J. D. (2012). Analysis of risk factors influencing driver injury severity in crashes at signalized intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 45, 506–516. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.022>
7. Koopman, P., & Wagner, M. (2017). Autonomous vehicle safety: An interdisciplinary challenge. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 9(1), 90–96. <https://doi.org/10.1109/>
8. Lee, J., Abdel-Aty, M., & Shah, I. (2019). Evaluation of surrogate measures for pedestrian trips at intersections and crash correlations. *Accident Analysis & Prevention*, 130, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.12.009>
9. Chen, L., & Englund, C. (2016). Cooperative intersection management: A survey. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(2), 570–586. <https://doi.org/10.1109/TITS.2>
10. Lord, D., & Mannering, F. (2010). The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(5), 291–305. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.02.001>
11. Mannering, F. L., Shankar, V., & Bhat, C. R. (2016). Unobserved heterogeneity and

the statistical analysis of highway accident data. *Analytic Methods in Accident Research*, 11, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2016.04.001>

12. Papadimitriou, E., Filtness, A., Theofilatos, A., Ziakopoulos, A., Quigley, C., & Yannis, G. (2019). Review and ranking of crash risk factors related to the road infrastructure. *Accident Analysis & Prevention*, 125, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.01.002>

13. Papadoulis, A., Quddus, M., & Imprialou, M. (2019). Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways. *Accident Analysis & Prevention*, 124, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.12.019>

14. Pillajo-Quijia, D., Demarchi, S. H., & Monteiro, F. V. (2020). Exposure to road traffic noise: A review of assessment methods and health effects. *Sustainability*, 12(6), 2390. <https://doi.org/10.3390/su12062390>

15. Salmon, P. M., Lenne, M. G., Walker, G. H., Stanton, N. A., & Filtness, A. J. (2016). Who is in control of road safety? A STAMP control structure analysis of the road transport system in Queensland, Australia. *Accident Analysis & Prevention*, 96, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.027>

16. Savolainen, P. T., Mannering, F. L., Lord, D., & Quddus, M. A. (2011). The statistical analysis of highway crash-injury severities: A review and assessment of methodological alternatives. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), 1666–1676. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.03>

17. Shladover, S. E. (2018). Connected and automated vehicle systems: Introduction and overview. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 22(3), 190–200. <https://doi.org/10.1080/154>

18. Talebpour, A., & Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 143–163. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.07.007>

19. Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., & Golias, J. C. (2014). Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 43, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.005>

20. Yannis, G., Weijermars, W., Gitelman, V., Vis, M., Chaziris, A., Papadimitriou, E., & Azevedo, C. L. (2017). Road safety performance indicators for the interurban road network. *Accident Analysis & Prevention*, 108, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.09.004>

21. Ziakopoulos, A., & Yannis, G. (2020). A review of spatial approaches in road safety. *Accident Analysis & Prevention*, 135, 105323. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105323>

22. Kyriakidis, M., Happee, R., & de Winter, J. C. F. (2015). Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5,000 respondents. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 32, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.trf.20>

23. Kuutti, S., Fallah, S., Katsaros, K., Dianati, M., McCullough, F., & Mouzakitis, A. (2020). A survey of deep learning applications to autonomous vehicle control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(2), 712–733. <https://doi.org/10.1109/TITS.2>

24. Rosique, F., Navarro, P. J., Fernández, C., & Padilla, A. (2019). A systematic review of perception system and simulators for autonomous vehicles research. *Sensors*, 19(3), 648. <https://doi.org/10.3390/s19030648>

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ НА РИНКУ МОРСЬКИХ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Вишневський Д.О., Вишневська О.Д.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. На сьогоднішній день морські контейнерні перевезення є фундаментом світової торгівлі. Контейнеризація дає можливість суттєво спростити та стандартизувати процес доставки вантажів. При цьому вона дозволяє без особливих труднощів здійснювати доставку контейнерів при переході з одного виду транспорту на інший. Це дозволяє підвищити безпеку вантажів, знизити терміни доставки, надаючи при цьому вигідні тарифи.

Незважаючи на свої переваги, перевізникам доводиться мати справу з низкою труднощів, зокрема економічного, екологічного, політичного та технологічного характеру. Сукупність даних проблем не може не вплинути на характер протікання транспортних процесів.

Тим не менш, у міру того, як світова економіка відновлюється після кризових явищ, таким же чином стабілізується і перевізний процес.

Постановка задачі. Для того, щоб залишатися конкурентоздатними на ринку морських перевезень, судноплавні компанії повинні демонструвати відповідний рівень гнучкості, щоб своєчасно реагувати на виклики, які породжуються конкурентним середовищем, що динамічно змінюється. Розуміння сучасних тенденцій на ринку морських контейнерних перевезень дозволить ефективніше адаптуватися до нагальних викликів.

Огляд літературних джерел. У світовій та вітчизняній літературі, роботі суден контейнеровозів приділено багато уваги. Так, у публікаціях [1-3] досліджується стан світового контейнерного флоту та нагальні проблеми галузі морських перевезень. У роботах [4-6] розглядаються сучасні тенденції і перспективи у судноплаванні. У джерелах [7,8] надано інформацію щодо сучасного стану української транспортної галузі.

Основний матеріал. Станом на 2024 рік місткість світового флоту суден контейнеровозів налічувала близько 30 млн. TEU. Багато в чому сприяло бурхливе будівництво нових суден після пандемії covid-19. На сьогоднішній день світовий контейнерний флот складає 7522 діючих суден загальним дедвейтом 402781675 т, що становить 33926176 TEU, що відображено на рис. 1.

У середньому, за валовою місткістю, вік світового флоту 2024 року становив 12,6 років, що на 3,2% більше, ніж у 2023 році. За кількістю суден вік флоту становив 22,2 роки, чи на 1,8% більше, ніж роком раніше. У 2024 році флот був більш ніж на три роки старший, ніж десять років тому. Частка суден країн, що розвиваються, у дедвейті суден старше 20 років (21,1%) більш ніж удвічі перевищувала аналогічний показник суден розвинених країн (9,3%).

На тлі нинішнього помірного портфеля замовлень, що вимірюється як частка світового флоту, що діє, і що значно нижче рівня утилізації суден, темпи заміни старіючого флоту залишаються невизначеними. Склад світового контейнерного флоту та портфель замовлень на нові судна контейнеровози зображено на рис. 2.

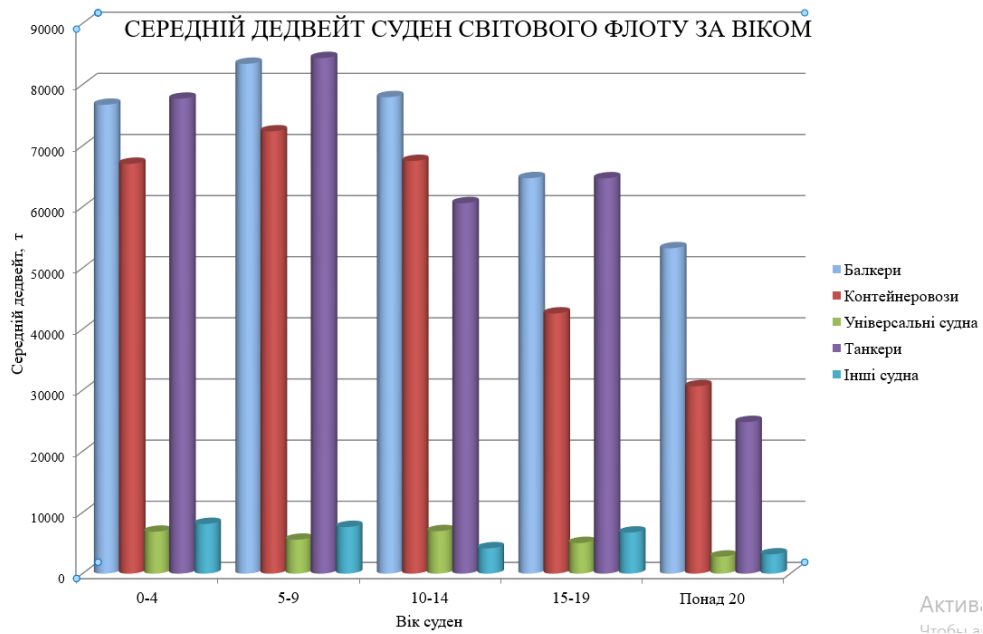


Рисунок 1 – Сумарний дедвейт світового контейнерного флоту за віком

Прагнення до збільшення максимальної місткості суден контейнеровозів нікуди не поділося, проте зростання розміру суден має і свої недоліки. Оскільки великим судам для нормального функціонування необхідний доступ до глибоководних портів та відповідного перевантажувального обладнання, що безпосередньо впливає на їх доступність.

На сьогоднішній день велика увага приділяється впровадженню сучасних технологій у транспортну галузь, і контейнерні перевезення тут не є винятком. Серед інновацій тут можна виділити впровадження штучного інтелекту та блокчейн технологій, що у свою чергу сприяє зниженню витрат на перевезення та підвищенню ефективності транспортного процесу.

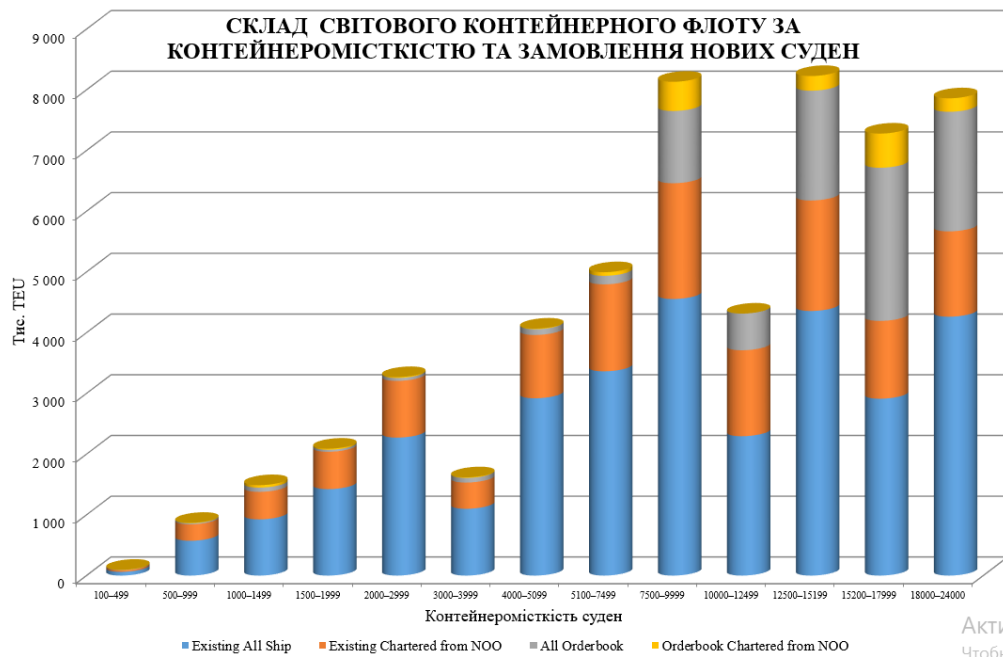


Рисунок 2 – Склад світового флоту суден контейнеровозів за місткістю та кількістю замовлень

Політичні чинники також серйозно впливають на контейнерні перевезення. Протистояння між найбільшими державами здатне призвести до зміни в напрямку та

структурі вантажопотоків, що також тягне за собою підвищення тарифів на перевезення, збільшення страхових витрат.

Як такий приклад можна навести блокування Суецького каналу в 2021 році, яке ускладнювалося внаслідок політичного загострення в регіоні. Це призвело до суттєвого збільшення тривалості перевезень та зростання їхньої вартості.

Станом на 2026 рік, близько 10% світового флоту суден контейнеровозів виявилось заблоковано в Ормузькій протоці в результаті війни. Фактично припинилося бронювання вантажів та страхування рейсів у регіоні.

Посилюється також вимога щодо викидів шкідливих речовин в атмосферу, внаслідок чого судноплавні компанії змушені інвестувати в більш екологічні технології. У перспективі, зрозуміло, це дозволить знизити негативний вплив на навколишнє середовище, але також це тягне за собою і збільшення експлуатаційних витрат.

Пандемія негативно позначилася і на доступності робочої сили портах. Нестача працівників призвела до того, що підвищилася завантаженість портів, як наслідок збільшився час, що витрачається на обробку суден, що призвело до порушення цілісності розкладів.

Для більш ефективного вирішення таких завдань, судноплавні компанії вдаються до формування стратегічних альянсів. Формування таких об'єднань дозволяє консолідувати зусилля для ефективнішого використання ресурсів, мінімізації перевезень порожніх контейнерів, і формування надійніших схем перевезення вантажів.

Що стосується вантажних перевезень у 2026 році, то, як запевняють експерти, прогнозується збільшення вантажних потужностей і попиту на перевезення. Подібні зміни можуть спричинити зниження фрахтових ставок і стимулювати поліпшення транспортної інфраструктури. При цьому, як і раніше, утримуватиметься курс на зниження викидів шкідливих речовин в атмосферу відповідно до нових стандартів ІМО. Це включає комплекс заходів, до числа яких входить застосування палива з низьким вмістом діоксиду сірки, використання більш енергоефективних маршрутів, а також застосування сучасного програмного забезпечення, здатного належним чином здійснювати моніторинг даних процесів. Наслідки від впровадження таких заходів відображено на рис. 3.



Рисунок 3 – Наслідки сучасних тенденцій на морському транспорті

Щодо України, то 2026 року українська транспортна галузь пристосовується до сучасних викликів в умовах бойових дій, що посилюються нестабільністю у світі.

Із найбільшими труднощами зіткнувся саме морський транспорт. Українські порти змушені працювати у надзвичайних умовах, що безпосередньо впливає на їхню результативність. Ризики зростають, судна простоюють, заходів суден контейнеровозів стає менше.

Світовий кадровий голод та дефіцит транспортних засобів посилюється аналогічною нестачею кваліфікованих кадрів в Україні внаслідок бойових дій. Це своє

чергу веде до переорієнтації вантажопотоків на інші види транспорту які здійснюватимуть перевезення через західні кордону країни. Зрозуміло, це посилює завантаженість автомобільного залізничного транспорту та збільшує термін доставки вантажів.

Актуальною залишається також проблеми зростання тарифів на перевезення. Причому це властиво для всіх видів транспорту. Викликано це політичною нестабільністю у світі, збільшенням витрат на страхування та заробітну плату.

Висновки. Проблеми світової транспортної галузі здійснюють вплив і на Україну. Проте українські транспортні компанії демонструють здатність пристосовуватися до конкурентного середовища, що динамічно змінюється, здійснюючи переорієнтацію вантажопотоків на інші види транспорту, впроваджуючи сучасні технології на транспорті, а також укладаючи вигідні партнерські угоди із західними компаніями.

Усе це веде до того, що маршрути доставки вантажів перевантажені, збільшено час доставки, зростають витрати на зберігання вантажів, потреби в перевезеннях задовольняються не вчасно і не в повному обсязі.

Аби продемонструвати свою конкурентноздатність на ринку морських перевезень, судноплавні компанії мають своєчасно та ефективно вирішувати задачі, що постійно виникають у сучасній транспортній галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Review of maritime transport 2025. URL: <https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2025>.
2. BRS Group. Shipping and shipbuilding markets. Annual Review 2025. URL: <https://www.brsbrokers.com/annualreview2025.html>.
3. Alphaliner TOP 100. URL: <https://alphaliner.axsmarine.com/PublicTop100>.
4. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Фактори успішності функціонування підприємства морського транспорту. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки. 2023. Том 34(73) №2. С. 106–114. DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/19>.
5. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Нагальні проблеми і перспективи розвитку судноплавної галузі. The XXVI International Science Conference «Topical issues of practice and science». May 18–21, 2021. London. Great Britain. p.718–722.
6. Вишневська, О. (2025). Сучасні тенденції на ринку світового судноплавства. Вісник Одеського національного морського університету, (76), 151–162. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-2-151-162>.
7. Міністерство інфраструктури України. URL: www.mtu.gov.ua.
8. Адміністрація морських портів України (АМПУ). URL: <http://www.uspa.gov.ua/>.

NECESSITY OF THE POST-WAR RISK ANALYSIS OF THE WHOLE CHAIN SHIP-PORT-CARGO IN THE FORMER «GRAIN CORRIDOR» AREA

¹Sagaydak O.I., ²Nikitin P.V.

¹Odessa National Maritime University
(Ukraine)

²National Transport University
(Ukraine)

Introduction. Ukraine is passing through fifth year of the full scale invasion, which is deeply affected functioning of the whole maritime sector of the country. It is a unique situation in the maritime history, when country fully involved in the maritime actions, still keeps her export of goods without having proper naval support of the navigation. Transforming of the operations was made under heavy pressure in shortest time. However, it was not so simple to find proper solution for the synergy of the shipping companies, ports / terminals, cargo shippers and Government Authorities.

Solutions found (such as so called «Grain corridor») in such a tough situation were probably the best possible under that circumstances. Moreover, grain export continued successfully even after collapse of the Grain corridor.

Relevance of research. It is necessary to mention, that decisions taken were forced by the circumstances. Nowadays we have to think on the solutions, which would be necessary to find when «hot» period of the war will be over, marine military actions will be stopped, fire ceased and maritime situation in the Black Sea will become safer.

It will not happen tomorrow, however, the maritime sector should be ready for the changes of situation, because it will require proper preparing, additional resources and financing.[1]

Setting the problem. Any risk management begins from the risk indication. Industry is pretty familiar with the present risks, imposed by war and military actions. [2] However, we have the situation that after the war some of risks will exist for the long time. The aim of this work to make an overview on the post-war risks, which will exist in spite of the cease fire and the end of the «hot» phase of war.

This is not only about navigational risks, because some risks for ports and terminals, as well as risks for the charterers will exist for the some certain period of time (sometimes this time could be quite long).

Thus, in order to find proper solutions in time, industry should know the nature of the possible post-war risks.

Main part. Looking at the Black Sea, we can find following risks for the moment:

- missile attack;
- drone attack;
- capture of the cargo ship by the enemy's navy ship (piracy);
- satellite navigation is not functioning.

Mentioned risks to be minimized after completing the «hot» phase of war, however, some war risks will still remain, such as:

- mine danger (including land mines washed out from the shore);
- danger of unauthorized fire (especially during first period);
- danger of uprising escalation again, because of permission for aggressor's navy to pass the Black Sea straits (Turkiye will have to open straits when «hot» phase of war will be over).

Besides that, there are a lot of risks, caused by war, which could not be managed just by the order to cease fire:

- aids to navigation are not functioning in proper way;

- canals and fairways are not checked;
- depth soundings were not made for the long time, meantime batimetric changes are very probable;
- canals and fairways to Mykolaiv and Kherson are not cleaned from sunken ships and other objects;
- port and terminal structures are damaged (and destroyed in some places);
- damaged port infrastructure (such as railways, roads, ramps, etc.);
- absence of established system of oil pollution addressing;
- lack of experienced and properly trained staff;
- damaged or destroyed warehouses in the ports and in the other places of cargo storing;
- broken logistic chains and necessity to establish new logistic chains due to new circumstances;
- necessity to find new cargo base for the Danube ports;
- high rates for insurance for the cargoes and ships calling Ukrainian ports;
- uncertainty with territories, which possibly will remain occupied, and which are close to existing ship routs - possible danger imposed from these areas;
- bureaucracy with cargo documents procedure (customs documents first of all) - single window still not implemented yet;
- limited power supply of the ports and port areas due to destroyed energy infrastructure during the war;
- high port rates in the Ukrainian ports;
- high rates for delivering cargoes to the ports (track and railway);
- Ukraine is not a Party of some important IMO Conventions (like Bunker, Fund, OPRC, etc.), which may cause difficulties in normal trade re-establishing;
- possible problems with re-establishing PSC regime due to actual falling of the Black Sea MoU (possible solution - joining Paris MoU);
- possible difficulties with application EU standards on the way towards full EU membership;
- possibility of other global risks affecting trade in the Black Sea - like the ships with alternative energy sources calling Ukrainian ports, increasing (or possible decreasing!) of oil and gas trade in the Black Sea;
- world energy crisis affecting trade in the Black Sea;
- competition with russian grain trade, which might damping prices in the peace conditions.

Taking into account global situation with the maritime trade, new challenges and new risks could appear any time, thus it will be necessary to fulfill risk analysis on the constant basis. [3, 4]

Research results. As the result of present research, we can propose some measures, which can assist in the process of post-war restoration and development of maritime sector in the Black Sea:

- creating of the international system of constant monitoring of the situation at the surface, underwater and airspace situation. Such system will allow to prevent accidental attacks or spontaneous accidents in the area. Such system should include certain procedures of immediate informing civil authorities and all stakeholders. It might be created to fulfil «police» functions.
- it could be recommended also to establish constant naval bases in the Dnipro and Danube estuaries to fulfil quick reaction functions against possible violations of cease fire by aggressor state. Staff of such bases better to form not with Ukrainian staff only, but also with the observers from EU and NATO.
- arrangement convoys for merchant ships in case of signs of escalation of war again.
- involvement of foreign investments (in various forms, including concessions) into

development of ports and terminals, shipyards and repair facilities, education and training institutions.

- creating economic free zone.
- creating preferences for export of commodities from Ukraine, preferably high-tech production.
- creating opportunities for making transit corridor to Europe for container lines.
- preparing the basement for joining and implementation by Ukraine of some important Conventions and EU Directives.

Conclusions. Risks for maritime trade in the Black Sea will not disappear with cease fire and termination of the «hot» phase of war. According to the SOLAS Convention, we have to make risk assessment if the situation is changed significantly, especially if risk factors are still exist. [5] In order to restore full scope of maritime trade it is necessary to make some certain steps in the military, political and economic areas, some of them to be commenced even now.

REFERENCES

1. Стратегія морської безпеки України. Указ Президента України від 17.07.2024. Сайт Верховної Ради України <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/468/2024#Text>
2. The impact of the russian armed invasion of Ukraine on international shipping. Resolution A.1183(33). A 33/Res.1183 11 December 2023, IMO, London
3. ІМО закликає створити безпечний коридор для евакуації моряків із Перської затоки. Ukrainian Shpping Magazine <https://usm.media/imo-zaklikaye-stvoriti-bezpechnij-koridor-dlya-evakuacziyi-moryakiv-iz-perskoyi-zatoki/>
4. Security Council live: Ukraine in spotlight as Russian strikes surge. UN official website <https://main.un.org/securitycouncil/>
5. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974, as amended. London : IMO, 2024. 512 с.

ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЗА КОНТЕЙНЕРНИМ ПАРКОМ: РОЛЬ І ФУНКЦІЇ МОРСЬКОГО АГЕНТА

Вільшанюк М.С.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. На сьогоднішній день контейнери є одним з основних технологічних рішень передового світового досвіду – мультимодальних перевезень, також сприяють розвитку транспортного обладнання та підвищенню рівня інформатизації. Залежно від формування вантажних партій, забезпечення запитів на поставки розрізняють трампове і лінійне судноплавство. Контейнерні перевезення виконуються найчастіше саме у лінійному судноплаванні. Лінійне судноплавство дозволяє в максимально короткі терміни доставити вантаж дрібними партіями, що є однією з переваг даного виду судноплавства.

Лінійні агенти відіграють важливу роль в обслуговуванні суден та лінії загалом. Агентування в лінійному судноплаванні має ряд особливостей, враховуючи дорожнечу суден з високою добовою вартістю утримання. Ефективність їх експлуатації залежить, в тому числі, і від максимального скорочення часу їх перебування в порту. Крім організації з обслуговування судна в порту в максимально стислі терміни, в обов'язки лінійного агента входить значний обсяг робіт з контролю за парком обладнання.

Актуальність досліджень. Як відомо, на лінійного агента покладаються різноманітні функції для обслуговування відповідної лінії, що потребує детального вивчення до цього питання. Діяльність лінійних агентів розглядається з різних боків. З юридичного боку функції і основні юридичні питання агента вивчалися в роботах [1–2]. Інформаційна система підтримки діяльності морського агента розглядалася в статтях [3–4], автор [5] розглядає забезпечення безпеки контейнерних перевезень з боку лінійного агента. Моніторинг за контейнерним парком з боку митниці висвітлювався в роботах [6–7]. Автор [8] приділив увагу специфіці роботи лінійного агента. Що стосується такої функції лінійного агента як моніторинг за оборотом контейнерів в незначному об'ємі було розглянуто [9] і потребує більш детального вивчення.

Постановка задачі. Побудування порядку дій лінійного агента при відслідковуванні контейнерів з моменту вивантаження їх з судна і до повернення порожніх контейнерів на лінію. Забезпечення безперебійної роботи лінії за допомогою агента для визначення паритету чи уникнення дисбалансу контейнерного парку.

Основний матеріал. Лінійний агент повинен за короткий час здійснити весь комплекс робіт з обслуговування судна в порту, вантажу й устаткування: організувати контроль за вантажними роботами, оформити документи, інкасацію фрахту, зробити заявки на всі види постачання і простежити за його доставкою, замовити лоцмана і буксири. Усе це вимагає високої професійної підготовки, чіткості та злагоженості в роботі. Крім цього, під контролем у агента лінії і під його відповідальністю перебуває парк обладнання: трейлери, рол-трейлери, контейнери.

Лінійна компанія забезпечує агента необхідним контейнерним обладнанням: контейнерами, контейнерами Flat Rack, трейлерами. При цьому на агента покладається комплекс функцій з експлуатації цих засобів; оформлення документів і контроль технічного стану контейнерів під час передання і повернення їх від вантажовласників, зберігання на портовому терміналі та в депо, організація технічного обслуговування і ремонту. Під час перевезень контейнерів у міжпортовому сполученні агент забезпечує їхнє завантаження, опломбування, розстафірування, зачищення та спецобробку порожніх контейнерів (фумігація та дезінфекція).

Він також організовує видачу порожніх контейнерів з депо експедиторів під їх стафірування на складі відправника (порту).

Агентування парку обладнання - одна із самостійних функцій агента, виконання

якої оплачується судновласником за спеціальними ставками. Функції агента з обслуговування парку обладнання залежать від низки факторів: виду перевезення (експорт, імпорт, транзит); схеми роботи лінії; приналежності обладнання (воно може належати судновласнику, перебувати в нього в оренді, належати відправнику). Кожен із цих варіантів має свої особливості в частині обслуговування агентом.

Ефективна робота спеціалізованих ліній неможлива без налагодженої системи стеження за рухом парку обладнання. Основні завдання системи стеження:

- інвентарний контроль, для чого ведеться історія кожної одиниці обладнання; це дає змогу визначити їхнє місцезнаходження на будь-який момент часу;
- оперативне управління обладнанням і його оптимальне використання, для чого принципал і його агенти повинні регулярно отримувати інформацію про потреби та фактичну наявність обладнання як загалом у системі, так і в кожному порту, який обслуговується лінією;
- інформація про обіг обладнання на кожному напрямку роботи лінії і в кожному порту, а також інформація про технічний стан обладнання.

Для організації моніторингу за контейнерами агентські компанії укладають за дорученням принципала договори зі стивідорними компаніями, контейнерними депо, річковими портами (для ліхтерів) на отримання від них інформації про рух і статус обладнання. Усю інформацію щодня передають в інформаційну мережу, яка видає агенту відомості про наявність і статус обладнання.

Використання контейнерів пов'язане з послідовним повторенням обов'язкових елементів: подачі порожнього контейнера до місця його завантаження, переміщення завантаженого контейнера до місця його розвантаження. Таким чином утворюється цикл використання контейнера.

Загальна кількість комплектів парку обладнання перебуває в прямо пропорційній залежності від часу їхнього обороту, який визначається часом перебування обладнання в портах навантаження і вивантаження. Судновласники практикують включення в агентську угоду пункту про забезпечення мінімального часу обороту обладнання в зоні їхньої дії.

Вирішення проблеми, пов'язаної з дисбалансом парку обладнання та його поверненням своїм власникам, у міжнародній практиці прийнято вирішувати за допомогою "зворотної логістики". У судноплавній галузі зворотна логістика застосовується здебільшого під час контейнерних перевезень. Зворотна логістика описує ланцюжок повернення контейнерів з метою скорочення управлінських витрат і невиробничих переміщень порожніх контейнерів. Сюди належать процеси повернення контейнерів від кінцевого одержувача до компаній, які займаються складуванням. У такому процесі беруть участь судноплавні компанії, контейнерні термінали, а також суміжні види транспорту.

Співвідношення між потрібною кількістю обладнання та його надходженням можна показати наступною схемою:

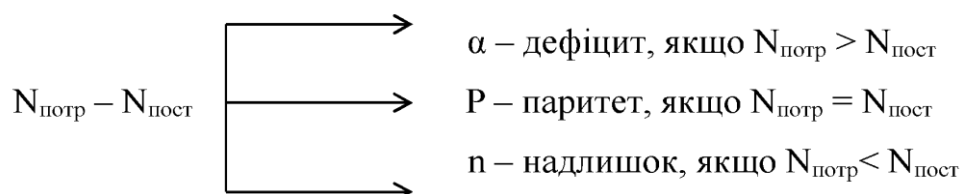


Рисунок 1. – Співвідношення між надходженням та потрібною кількістю обладнання

де $N_{\text{потр}}$ – надходження контейнерів з імпортним вантажем;

$N_{\text{пост}}$ – потреба в обладнанні для експортних вантажів.

За умовою α – «дефіцит парку обладнання» – судновласник може вирішити

проблему одним з наступних способів:

- 1) короткострокова оренда обладнання;
- 2) взаємообмін з іншими операторами;
- 3) досилання порожнього обладнання з портів з надлишком обладнання на попутних судах або сухопутним видом транспорту.

За умовою п – «надлишок парку обладнання» – агент доповідає судновласнику про перспективи його наступного використання та витрати судновласника за зберігання обладнання, при цьому можливі наступні шляхи вирішення проблеми:

- а) здача обладнання в суборенду;
- б) доставка обладнання в порти, де спостерігається його дефіцит;
- в) використання за взаємообміном з іншими операторами;
- г) створення нових ліній.

Іншими методами усунення дисбалансу парку обладнання є методи тарифного та нетарифного регулювання, такі як врівноваження експорту та імпорту в парках шляхом регулювання вантажопотоків та накладення визначених квот на ввезення або вивезення товарів.

Одним із варіантів скорочення дисбалансу парку обладнання є вибір виду транспорту для його доставки, а також складання раціональних маршрутів руху наземного транспорту.

Для підтвердження правильності припущення було обрано варіанти використання контейнерів на кількох маршрутах доставки вантажу дрібними партіями, враховуючи розклад ліній.

1 варіант

Інтермодальний оператор використовує контейнери лінійної компанії, з оплатою перевезення за лінійним тарифом і зобов'язаннями за часом і місцем повернення порожніх контейнерів, з відповідною оплатою.

2 варіант

Інтермодальний оператор використовує власні контейнери (придбані або орендовані). При цьому оплата перевезень навантажених і порожніх контейнерів інтермодального оператора проводиться за лінійним тарифом з певною знижкою (зазвичай від 10 до 15%). Але всі витрати з утримання, зберігання та передислокації контейнерів лягають на інтермодального оператора.

3 варіант

Власний контейнерний парк інтермодального оператора, але відносини між лінійним та інтермодальним оператором будуються на основі слот-чартерної угоди. За цією угодою інтермодальний оператор орендує частину місткості судна і оплачує орендну плату за кожен комір (слот) на відміну від звичайного лінійного тарифу. При цьому орендна плата нараховується, незалежно перевозиться контейнер на судні чи ні.

Виходячи з проведених розрахунків, отримуємо результат, що найбільш вигідним є використання третього варіанта.

Результати дослідження. При вирішенні поставленої задачі були розглянуті питання, що стосуються вдосконалення операцій, спрямованих на використання агентом парку обладнання лінії для підвищення ефективності лінійних морських перевезень.

Для розв'язання задачі проведені розрахунки часу обороту контейнера, використано методи вибору типу контейнера, усунення дисбалансу парку обладнання, розроблення варіантів маршрутів і схем доставки вантажу.

Висновки. Вивчення розглянутої теми дозволить в подальшому ефективно використовувати парк обладнання лінії і забезпечить безперебійний оборот контейнерів.

ЛІТЕРАТУРА

- | | | | | | |
|----|-------------|-----------|---------------|--------|------|
| 1. | Агентування | морського | торговельного | флоту. | URL: |
|----|-------------|-----------|---------------|--------|------|

<https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/n0066697-03> (дата звернення 15.02.2026)

2. Балобанов О.О., Пальченко А.А. Збірник лекційних і практичних матеріалів з правового регулювання морського агентування. О.: Олдіплюс, 2021. 104 с.

3. Петров І.М., Рудніченко М.Д. Особливості використання концепції єдиного інформаційного простору для потреб сервісних ергатичних систем на морському транспорті. SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE PRESENT TIME: PRIORITY DEVELOPMENT DIRECTIONS OF UKRAINE AND POLAND, 2018. № 1. С. 106–108

4. Петров І.М., Вичужанін В.В., Рудніченко М.Д., Шibaева Н.О., Шibaев Д.С. Проектування автоматизованої інформаційної системи підтримки діяльності морського агента в сервісних ергатичних системах. Вісник сучасних інформаційних технологій, 2018. № 1 (1). С. 36-48.

5. Надибська О. Я. Безпека організації морських контейнерних перевезень. International scientific conference «Maritime security of the Baltic-Black sea region: challenges and threats» : conference proceedings, December 23, 2021, Vol. 1. С. 218-221

6. Руда Т.В., Артеменко А.В. Розроблення програмного забезпечення з питань здійснення контролю над переміщенням морських контейнерів та додаткового обладнання до них через митний кордон України. Приазовський економічний вісник, 2019. № 6(17). С. 62-66

7. Коновалов Ю.О. Актуальні питання тимчасового ввезення морських контейнерів. Розвиток міжнародної торгівлі в умовах глобальних економічних дисбалансів: матеріали виступів Всеукраїнського форуму з проблем міжнародних економічних відносин (11 квітня 2019 року). Житомир: ЖДТУ, 2019. С. 287-259

8. Москвіченко І.М., Стаднік В.Г. Логістичний аутсорсинг функцій лінійного агента в глобальні центри обслуговування бізнесу. Науково-виробничий журнал, 2020. № 2 (113). С. 139-146

9. Холоденко А.М., Горб О.С. Оптимізація кругового маршруту контейнерної лінії. Вісник Хмельницького національного університету, 2010. № 5, Т. 3 (161). С.145-149

10. Постанова КМУ № 451 від 21.05.2012 «Питання пропуску через державний кордон осіб, автомобільних, водних, залізничних та повітряних транспортних засобів перевізників і товарів, що переміщуються ними» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/451-2012-%D0%BF#Text> (дата звернення 23.02.2026)

11. Михайлова Ю.В., Доля О.Є., Вільшанюк М.С., Стеба А.А. Особливості агентування морських пасажирських суден на ринку туристичних послуг. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2023. Том 34 (73) № 2. С. 158-166

12. Селютін А. Ринок морських перевезень України: контейнерні перевезення. URL: <https://yur-gazeta.com/publications/practice/morske-pravo/rinok-morskih-perevezen-ukrayini-konteynerni-perevezennya.html> (дата звернення 13.02.2026)

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ХОЛОДНИХ ЛАНЦЮГІВ ПРИ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РИЗИКІВ

Волохов О.О.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Контейнерні перевезення швидкопсувних вантажів є найбільш технологічно залежним сегментом морської логістики. Ефективність функціонування «холодного ланцюга» (cold chain) безпосередньо впливає на продовольчу та економічну безпеку держави. У сучасних умовах глобальної нестабільності та локальних енергетичних криз в Україні традиційні методи забезпечення температурного режиму потребують перегляду в бік більшої автономності. З 2022 року світова транспортна галузь зіткнулася з необхідністю перегляду класичних логістичних моделей через зростання геополітичної нестабільності та вразливості енергетичної інфраструктури. Для України це питання набуло критичної гостроти: традиційні методи забезпечення температурного режиму, що базуються на стаціонарних джерелах живлення в портах та на залізничних станціях, виявилися недостатньо надійними.

Сучасна концепція безпеки транспортних систем вимагає переходу від пасивного очікування стабільного енергопостачання до активного впровадження автономних технологічних рішень. Саме тому розробка та впровадження методів, що гарантують безперервність «холодного ланцюга» незалежно від стану магістральних мереж, є пріоритетним завданням для розвитку вітчизняного експортного потенціалу та інтеграції в європейські транспортні коридори.

Актуальність дослідження. Актуальність теми зумовлена критичною вразливістю рефрижераторних контейнерів до перебоїв у енергопостачанні в портах та на тилових терміналах. Блекаути, дефіцит потужностей у портах та збільшення часу очікування на кордонах створюють пряму загрозу псування вантажів. Дослідження технологій, що мінімізують залежність від стаціонарної мережі, є стратегічно важливим для збереження експортного потенціалу України. Будь-яка затримка в чергах на кордоні або простої на терміналі без живлення призводить до незворотної деградації якості вантажів, наприклад, як, продуктів харчування або медикаментів. Таким чином, перехід до технологій енергетичної автономності та дистанційного IoT-моніторингу стає не просто питанням модернізації, а базовою умовою виживання українського експорту та забезпечення безпеки транспортних систем.

Постановка задачі. Метою роботи є аналіз сучасних технологічних рішень для підвищення живучості холодних ланцюгів та обґрунтування комплексної моделі автономного забезпечення рефрижераторних контейнерів енергією та моніторингом в умовах високих енергетичних ризиків.

Основний матеріал. Забезпечення стійкості холодних ланцюгів в умовах енергетичних ризиків базується на переході від концепції «реактивного обслуговування» до «превентивної технологічної автономності». Цей процес можна поділити на три різні напрямки.

1) Автономізація енергопостачання. В умовах нестабільної роботи стаціонарних електричних мереж портових терміналів, критично важливим стає використання навісних генераторних установок. Це обладнання забезпечує безперервну роботу компресора рефрижераторного агрегату під час транспортування та очікування в зонах з відсутньою інфраструктурою. Кількість енергії, що споживається рефрижератором, змінюватиметься залежно від багатьох зовнішніх змінних. До них належать температура та вологість навколишнього повітря, розташування рефрижератора

на борту судна, вік контейнера, використовуваний холодоагент та будь-які нові або специфічні технології охолодження. Рефрижератори можуть працювати в різних режимах залежно від того, чи містять вони заморожені товари (приблизно нижче мінус 10°C) чи охолоджені товари (приблизно вище мінус 10°C). У режимі заморожування невеликі коливання температури незначні, тому компресор охолодження можна вмикати та вимикати для регулювання внутрішньої температури [1].

Генераторна установка – це компактний автономний силовий агрегат, який використовується для роботи рефрижераторних контейнерів, коли немає зовнішнього електроживлення. Ці дизельні машини постачають енергію, необхідну для роботи системи охолодження контейнера протягом усієї подорожі. Незалежно від того, чи встановлені вони на причепі, чи прикріплені безпосередньо до контейнера, генераторні установки активуються автоматично при відключенні берегового електропостачання, підтримуючи точний контроль температури під час транспортування. Генераторні установки не просто захищають вантаж. Вони надають логістичним постачальникам свободу переміщувати рефрижераторні контейнери різними видами транспорту та маршрутами, не покладаючись на інфраструктуру. Генераторна установка підключається безпосередньо до електричного входу рефрижераторного контейнера та живить його систему охолодження, коли інше джерело живлення недоступне. Більшість генераторних установок працюють на дизельному паливі. Двигун спалює паливо для вироблення електроенергії, яка подається в рефрижераторний агрегат і підтримує вантаж при заданій температурі [2].

Порівняльний аналіз між стаціонарною мережею та установкою відображено у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз систем живлення рефрижераторних контейнерів

Критерій порівняння	Стаціонарна мережа	Генераторна установка
Залежність від інфраструктури	Потребує підстанцій та кабелів	Повна автономність
Ризик при відключенні електроенергії	Зупинка охолодження	Автоматичне перемикання
Мобільність	Обмежена зоною термінала	Необмежена
Контроль витрат	За лічильником енергії	За рівнем палива в баку

Джерело узагальнено автором

2) Впровадження фазоперехідних матеріалів. Для підвищення «пасивної» стійкості контейнера пропонується інтеграція матеріалів із фазовим переходом. Ці речовини акумулюють холод під час роботи реф-агрегату і віддають його, коли живлення зникає. Основними проблемами є недостатнє холодильне зберігання, відсутність контролю температури та вологості, погана транспортна інфраструктура та мінімальний доступ до сучасних технологій переробки. Вирішення проблеми потребує багатогалузевого підходу, який передбачає розширення інфраструктури холодного ланцюга, інвестиції в переробні потужності. Ці установки дуже корисні для тих місць, для яких постійне холодильне зберігання є проблемою, що допомагає підтримувати якість та свіжість швидкопсувних товарів, таких як фрукти, овочі та молочні продукти, під час транспортування та зберігання.

Згідно з чисельним аналізом, проведеним у дослідженні «Numerical analysis of phase change material placement and temperature effects in cold storage systems» [3] ефективність захисту холодного ланцюга критично залежить від геометрії розміщення фазоперехідних матеріалів. Найбільшу стабільність температури забезпечує їх розміщення безпосередньо біля стінок контейнера та в зонах з найвищим тепловим потоком (стеля та двері). Це дозволяє матеріалу поглинати зовнішнє тепло до того, як воно досягне вантажу.

Дослідження «Numerical and Experimental Investigation on Performance of

Thermal Energy Storage Integrated Micro-Cold Storage Unit» [4] підтверджує, що матеріали здатні підтримувати вузький температурний діапазон (наприклад, +2°C... +8°C для фармпрепаратів) значно довше за стандартну ізоляцію. Це критично для українських реалій, де затримки на вузлах перевантаження можуть тривати від кількох годин до діб.

3) Цифрова диспетчеризація та Internet of Things-моніторинг (IoT). Сучасна безпека неможлива без дистанційного контролю в реальному часі. Впровадження IoT нового покоління дозволяє здійснювати моніторинг без фізичного доступу до контейнера.

Забезпечення виконання процедур забезпечення якості та готовності до аудиту ускладнюється відсутністю автоматизованої звітності та постійного моніторингу. Зі зростанням вимог споживачів до підзвітності, прозорості та логістики з нульовим рівнем дефектів, видимість у режимі реального часу перетворилася з розкоші на вимогу. Зміна парадигми від статичних та ручних систем до інтелектуальних, автоматизованих та мережевих платформ моніторингу відбулася з появою IoT. Для забезпечення безперервного збору даних та віддаленого доступу, рішення на основі IoT інтегрують бездротові датчики, GPS, RFID та хмарну інфраструктуру. Окрім забезпечення моніторингу температури, вологості та місцезнаходження в режимі реального часу, ці системи також автоматично подають сигнал тривоги при перетині певних порогових значень, що дозволяє оперативно втручатися та вживати превентивних заходів.

З іншого боку, старіші технології, такі як RFID, забезпечували елементарне відстеження активів, але не були інтегровані з аналітикою в режимі реального часу або датчиками навколишнього середовища. Незважаючи на те, що системи моніторингу на основі машинного навчання є дуже складними та прогнозними, багато малих та середніх підприємств не можуть собі їх дозволити через високі обчислювальні витрати, історичні дані та вимоги до інфраструктури. Ці труднощі підкреслюють необхідність у системах моніторингу в режимі реального часу, надійних та легкодоступних, які можна налаштувати для різних сегментів ланцюга постачання швидкопсувних товарів. Окрім підвищення операційної ефективності, перехід до таких інтелектуальних систем спрямований на захист здоров'я населення, забезпечення дотримання нормативних вимог та зменшення екологічних відходів, пов'язаних з псуванням продукції [5].

Впровадження IoT-технологій дозволяє перейти від пасивної фіксації температури до активного превентивного моніторингу в реальному часі, що є критичним для зон із високим рівнем енергетичних ризиків. Крім цього, така система може автоматично надсилати сповіщення диспетчеру при критичному падінні рівня палива в генераторній установці або при загрозі перегріву через відсутність живлення. Додатково, цифрова диспетчеризація дає змогу дистанційно коригувати параметри роботи рефрижератора, подовжуючи термін автономної роботи системи на 15–20% за рахунок адаптивних режимів охолодження.

Завдяки інтеграції датчиків різного типу (від температурних до навігаційних), стає можливим створення багаторівневої системи захисту, де технологічний контроль компенсує інфраструктурну нестабільність та мінімізує вплив людського фактора в критичних ситуаціях. В умовах енергетичної нестабільності та територіальних ризиків цифрова диспетчеризація перестає бути лише інструментом звітності, перетворюючись на критичний елемент захисту транспортної системи. Такі інтеграції датчиків представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Роль IoT у комплексному управлінні ризиками холодного ланцюга

Категорія ризику	Технологічний інструментарій	Функціональна дія системи	Ефект для системи
Техногенний	Датчики напруги	Автоматичне сповіщення про перехід на генераторну установку	Запобігання критичному простою агрегату

Кліматичний	Датчики температури та вологості	Безперервна передача інформація щодо температури	Нульова ймовірність прихованого псування вантажу
Ресурсний	Датчики рівня палива в баку	Моніторинг залишку автономної роботи у годинах	Виключення зупинки охолодження через людський фактор або затримку на кордоні
Навігаційний	GPS трекери	Контроль маршруту у реальному часі	Мінімізація ризиків потрапляння вантажу в зони активних бойових дій або затори

Джерело узагальнено автором

Результати досліджень. Впровадження інтегрованої системи автономного холодного ланцюга в умовах енергетичних ризиків України дозволяє отримати наступні результати:

- Комбінація активного охолодження генераторними установками та теплового захисту дозволяє створити «ефект подвійного резервування», що подовжує безпечний час простою контейнера без живлення. Це створює часове вікно, достатнє для передислокації контейнера до справної точки живлення або проведення аварійного ремонту енергомодуля.
- Впровадження інтелектуальних систем контролю на базі IoT дозволило перетворити рефрижераторний контейнер на активний вузол інформаційної мережі. Завдяки використанню датчиків для передачі даних, час між виникненням критичної події та сповіщенням диспетчера скоротився з годин (при ручному обході) до декількох секунд.
- Окрім вищесказаних, перехід від централізованого енергопостачання в портах до децентралізованої моделі дозволяє зменшити вразливість великих контейнерних партій: вихід з ладу портової підстанції більше не загрожує одночасному псуванню сотень контейнерів. Додатково, можна здійснювати ефективну диверсифікацію маршрутів через малі порти та залізничні термінали.

Висновки. На основі проведеного дослідження технологічного забезпечення стійкості холодних ланцюгів в умовах високих енергетичних ризиків сформульовано такі ключові положення:

Доведено, що класична модель (живлення від стаціонарних мереж) є критично вразливою в умовах нестабільної інфраструктури. Впровадження навісних генераторних установок трансформувє рефрижераторний контейнер у незалежну енергетичну одиницю, що гарантує безперервність роботи холодильного агрегату на всіх етапах перевезення.

Використання фазоперехідних матеріалів у конструкції ізоляції дозволяє акумулювати холод під час роботи агрегату. Це забезпечує пасивну стійкість системи, подовжуючи час утримання цільової температури при повному відключенні живлення, що є критичним часовим вікном для усунення аварійних ситуацій.

Цифрова диспетчеризація на базі IoT перетворює моніторинг на інструмент прогностичного управління. Поеднання датчиків дозволяє ідентифікувати технічні відхилення до ймовірної поломки, мінімізуючи вплив людського фактора та забезпечуючи юридичну прозорість перевезень.

Найвищий рівень безпеки досягається лише за умови інтеграції автономного живлення, теплової інерції та цифрового контролю. Така комбінація дозволяє успішно диверсифікувати логістику через малі порти та тилові термінали з обмеженою

енергоінфраструктурою, підвищуючи загальну живучість експортних шляхів України.

Запропонований технологічний комплекс дозволяє не лише зберегти якість критично важливих вантажів, але й забезпечити відповідність міжнародним стандартам у зонах з високими воєнними та енергетичними ризиками, що є стратегічно важливим для стабільності національної економіки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Energy use of integral refrigerated containers in maritime transportation / W. B. Fitzgerald et al. *Energy Policy*. 2011. Vol. 39, no. 4. P. 1885–1896. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.015> (дата звернення: 03.03.2026).
2. Genset for reefer containers – power your cold chain anywhere. PIER2PIER.COM – Blog. URL: https://www.pier2pier-com.translate.goog/blog/genset-reefer-container-cold-chain/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=uk&_x_tr_hl=ru&_x_tr_pto=wapp (дата звернення: 03.03.2026).
3. Numerical analysis of phase change material placement and temperature effects in cold storage systems / R. R. Yenare et al. *Alexandria Engineering Journal*. 2025. Vol. 129. P. 1024–1038. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.07.019> (дата звернення: 03.03.2026).
4. Numerical and Experimental Investigation on Performance of Thermal Energy Storage Integrated Micro-Cold Storage Unit / S. Arun et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, no. 12. P. 5166. URL: <https://doi.org/10.3390/app14125166> (дата звернення: 03.03.2026).
5. An IoT Based RealTime Environmental Monitoring System for Cold Chain Logistics / B Mohan et al. 2025 IEEE International Conference. 2025. URL: <https://doi.org/10.1109/inspect67393.2025.11350628> (дата звернення: 03.03.2026).

СЕКЦІЯ:
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ В ГАЛУЗІ
МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ
SECTION
INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATION IN THE
MARITIME TRANSPORT SECTOR

SELECTING THE TYPE OF WIND TURBINE FOR A SHIP'S WIND ADDITIONAL PROPULSION SYSTEM

Zinchenko S., Tovstokoryy K.
Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)

Introduction. The International Maritime Organization (IMO) has developed a strategy to reduce greenhouse gas (GHG) emissions from ships, which was adopted in 2018. In 2023, at the meeting of the Marine Environment Protection Committee (MEPC 80), this strategy was revised. The revised strategy aims to achieve zero emissions in 2050 with a commitment to ensure the use of alternative fuels with near-zero emissions in 2030. The most promising areas for reducing greenhouse gas emissions are the use of renewable energy sources, in particular solar and wind. The European Maritime Safety Agency (EMSA) in its report [1] analyzed the use of additional wind propulsion systems (WAPS) to reduce greenhouse gas emissions and fuel consumption on ships with mechanical engines. WAPS systems are considered as technologies that can reduce fuel consumption on ships and, as a result, reduce GHG emissions into the atmosphere. To date, six main types of additional wind turbines have been developed to use wind energy: rigid sails, rotary sails, straight soft sails, oblique soft sails, suction sails, kites, for different types of ships, Fig. 1, Fig. 2.

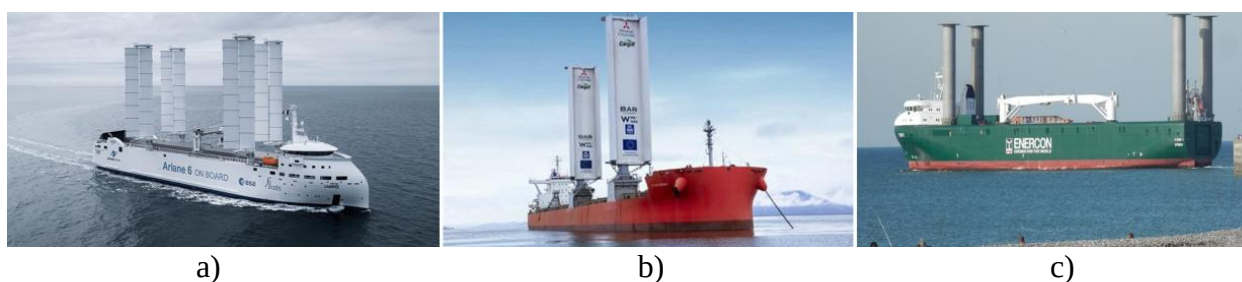


Figure 1 – Types of sails on ships: a) Alizée ship with soft sails, b) Pyxis Ocean M/V with rigid sails, c) E-Ship roller with rotary sails.

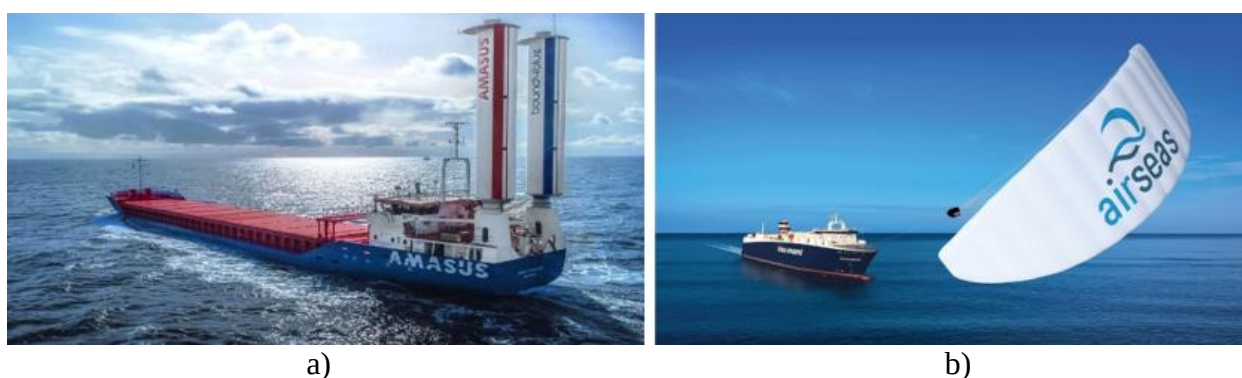


Figure 2 – Types of sails on ships: a) MV EemsTraveller with eSAIL® suction sail system, b) MV Ville de Bordeaux roller with SeaWing kite

The use of automation and optimization of WAPS control processes allows to achieve a further increase in their efficiency. The authors previously developed methods for automation and optimization of WAPS control processes [2, 3], as well as related methods for using mathematical models in control systems [4–8], redundant structures of actuators [9–11], solving problems of automatic divergence with many maneuvering targets [12], optimal control [13–15], dynamic positioning [16, 17], etc.

Relevance of the study. The effectiveness of the WAPS control system depends on the choice of wind turbines that are part of it. In open sources, the authors did not find comparative data on the main types of wind turbines among themselves according to the criteria of energy

efficiency, reliability, safety and ease of operation. Therefore, conducting such studies is an urgent scientific and technical task.

Problem statement. To rank existing types of wind turbines according to the criteria of energy efficiency, reliability, safety and ease of operation using the expert evaluation method and to determine the consistency of experts' opinions. Main material. To rank existing types of wind turbines used as additional wind turbines on ships with a mechanical engine, the expert evaluation method was used. Six long-distance captains of the Department of Navigation and Ship Management of the Kherson State Maritime Academy were involved as experts. The proposed question: Evaluate on a six-point scale wind turbines used as additional ones on ships with a mechanical engine, according to the criteria of energy efficiency, reliability, safety and ease of operation. The survey results are listed in Table 1.

Table 1 – Results of expert assessment of wind turbine efficiency

Experts	Factors					
	Rigid sail	Soft oblique sail	Soft straight sail	Rotary sail	Suction sail	Kite
	1	2	3	4	5	K=6
1	1	5	4	3	2	6
2	1	3	4	2	6	5
3	3	4	6	2	1	5
4	2	4	5	1	3	6
5	1	2	3	5	6	4
NE=6	1	2	3	4	5	6
$\sum_{i=1}^{NE} a_{ij}$	9	20	25	17	23	32

From the above data it is clear that the highest rank, according to the sum of the experts' ranks, has a rigid sail (sum of ranks 9). In second place is a rotary sail (sum of ranks 17), in third place is a soft oblique sail (sum of ranks 20), in fourth place is a suction sail (sum of ranks 23), in fifth place is a soft straight sail (sum of ranks 25), in sixth place is a kite (sum of ranks 32).

To analyze the consistency of the experts' opinions, the Kendall concordance coefficient (Maurice George Kendall) W [18] and the χ^2 Pearson's criterion were used.

The Kendall concordance coefficient, for unrelated ranks, was calculated by the formula

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^K \Delta_j^2}{NE^2(K^3 - K)}, \quad (2)$$

where K is the number of factors, NE is the number of experts, $\sum_{j=1}^K \Delta_j^2$ is the sum of the

deviations squares of the each factor ranks sum from the total average sum of ranks. The values of the Kendall concordance coefficient are in the range [0-1]. The better the consistency of opinions, the greater W .

$$\sum_{j=1}^K \Delta_j^2 = \sum_{j=1}^K \left(\frac{\sum_{i=1}^{NE} a_{ij}}{NE} - \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{NE} a_{ij}}{K \cdot NE} \right)^2 \quad (3)$$

For expert assessment data, Table 1, $K = 6$, $NE = 6$.

$$\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{NE} a_{ij} = \left(\frac{9+20+25+17+23+32}{6} \right) = 21.$$

$$\sum_{j=1}^K \Delta j^2 = (9-21)^2 + (20-21)^2 + (25-21)^2 + (17-21)^2 + (23-21)^2 + (32-21)^2 =$$

$$= 144 + 1 + 16 + 16 + 4 + 121 = 302$$

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^K \Delta j^2}{NE^2(K^3 - K)} = \frac{12 * 302}{36(6^3 - 6)} = \frac{3624}{7560} = 0.479.$$

The statistical significance of the W coefficient was assessed by testing statistical hypotheses:

$$H_0 : \chi^2 < \chi_{tab}^2$$

$$H_1 : \chi^2 > \chi_{tab}^2 \quad (4)$$

If the main hypothesis H_0 is confirmed, it will be recognized that the opinions of the experts are not consistent. If the main hypothesis is rejected, an alternative hypothesis H_1 is accepted, indicating the consistency of opinions. The value of the χ^2 criterion is calculated by the formula

$$\chi^2 = NE(K-1)W = 6 * 5 * 0.479 = 14.37. \quad (5)$$

Table 2 shows a fragment of the critical distribution points χ_{tab}^2 .

Table 2 – Critical distribution points χ_{tab}^2

Number of the freedom's degrees	Significance level α					
	0.01	0.025	0.05	0.95	0.975	0.99
1	6.6	5.0	3.8	0.0039	0.00098	0.00016
2	9.2	7.4	6.0	0.103	0.051	0.02
3	11.3	9.4	7.8	0.352	0.216	0.115
4	13.3	11.1	9.5	0.711	0.484	0.297
5	15.1	12.8	11.1	1.15	0.831	0.554

For the expert assessment conducted, the number of degrees of freedom is $NU = K - 1 = 5$. From Table 2, for the significance level, $\alpha = 0.05$, $\chi_{tab}^2 = 11.1$. Since $\chi^2 > \chi_{tab}^2$, the alternative hypothesis H_1 is accepted (expert opinions are consistent).

Results obtained and their discussion. The existing types of wind turbines were ranked according to the criteria of energy efficiency, reliability, safety and ease of operation, which allows using the obtained result in the design of effective automatic ship motion control systems with WAPS. The obtained result is explained by the analysis of existing types of wind turbines used as additional ones on ships with a mechanical engine; the formation of efficiency criteria; expert assessment of the efficiency of wind turbines according to the specified criteria; processing of the results of the expert assessment. The obtained result differs from known solutions in that it provides a comprehensive comparison of all the main types of existing wind turbines with each other. The results are reproducible and can be used in the development of automatic and automated ship motion control systems with WAPS.

Conclusions. The existing types of wind turbines were ranked according to the criteria of

energy efficiency, reliability, safety and ease of operation. This allows using the obtained series to select effective wind turbines when designing ship motion control systems with WAPS. The obtained result is explained by the analysis of existing types of wind turbines; the formation of efficiency criteria; expert assessment of the efficiency of wind turbines according to the specified criteria; processing of the results of the expert assessment.

The theoretical value of the obtained result lies in the application of the expert assessment method (simultaneous ranking of factors) for ranking types of wind turbines according to the specified energy efficiency criteria.

The practical value of the obtained result lies in: the possibility of using the results of a comprehensive comparison of all the main types of existing wind turbines among themselves, when choosing the most efficient one for WAPS, reducing, due to this, fuel consumption and greenhouse gas emissions into the atmosphere; assessing the consistency of experts' opinions.

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, Lisbon. <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports/item/5078-potential-of-wind-assisted-propulsion-for-shipping.html>.
2. Zinchenko S., Tovstokoryy K., Tymofeiev K., Onyshko D. & Polishchuk V. (2026). Development of a method of automatic control of additional wind propulsion system, propeller and stern as a single structure of ship actuators. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(2 (139), 126–135. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.352588>.
3. Zinchenko S. & Tovstokoryy K. (2025). Conditional optimization of vessel controls with wind additional propulsion system, Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy, 2 (31), 30–40. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.030-040.
4. Зінченко С. М., Матейчук В. М. & Ляшенко В. Г. (2018). Використання інформаційних систем моделювання для розробки та тестування систем автоматичного керування рухом судна, Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13–15 вересня 2018 р., с. 27–29.
5. Зінченко С. М., Маменко П. П. & Грошева О. О. (2018). Скорочення часу числового інтегрування математичної моделі судна у бортовому обчислювачі, Науковий вісник ХДМА, 1(18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>.
6. С. М., Ляшенко В. Г. & Шалаєва А. О. (2017). Оцінка маневрових можливостей судна з використанням нейромережевої моделі, що синтезується в процесі його штатної експлуатації. Матеріали IV МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 14–16 вересня 2017 р., с. 236–240.
7. Зінченко С. М. & Ляшенко В. Г. (2017). Використання нейромережевої моделі судна для вирішення задач керування, Науковий вісник ХДМА, 2 (17), с. 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.
8. Зінченко С. М., Носов П. С., Маменко П. П., Грошева О. О. & Матейчук В. М. (2019). Використання математичної моделі ЧЗ гірокомпасу для врахування інерційної девіації, Матеріали VI МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 11–14 вересня 2019 р., с. 203–206.
9. Зінченко С. М., Ляшенко В. Г. & Грошева О. О. (2018). Оптиміальне керування надлишковими структурами азіподів, Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13–15 вересня 2018р., с.78–81.
10. Zinchenko S. (2020). Study of a minimally excessive complanary control structure with two azimuth control devices, Materials of the VII International Scientific and Practical Conference Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice, Kherson, September 9–12, 2020, p. 319–325.

11. Zinchenko S. M., Nosov P. S. & Popovych I. S. (2021). Control redundancy as a quantitative measure of maneuverability, *Науковий вісник ХДМА*, 3(21), 23–35.
12. Зінченко С. М. & Ляшенко В. Г. (2017). Розходження з маневруючими цілями, *Науковий вісник ХДМА*, 2(17), 36–43. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/555/499>.
13. Зінченко С. М., Ляшенко В. Г. & Грошева О. О. (2018). Синтез оптимального керування судном с граничними умовами, *Науковий вісник ХДМА*, 1(18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.
14. Zinchenko S. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O. & Mateichuk V. M. (2019). Automatic control of the vessel's movement under external conditions, *Науковий вісник ХДМА*, 2(21), 10–15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>.
15. Zinchenko S. & Tovstokoryi O. (2020). What is the Pivot Point and how to use it to control the vessel, *Materials of the XII International Scientific and Practical Conference "Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT – 2020)*, May 27–29, 2020, Kherson, p. 59–62.
16. Moiseenko V. S., Zinchenko S. M. & captain Tovstokoryi O. M. (2020). Automatic beam control of laser–optical position reference system, *Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of Power Plants and TE of Odessa National Maritime University (MPP & O-2020)*, April 2020, Odessa–Istanbul–Odessa. <https://drive.google.com/file/d/1HEX2RVuA1KV5JjMfQcqYZ1f4SCFMcy6a/view>.
17. Zinchenko S. & Moiseenko V. (2020). Increasing the accuracy and reliability of a dynamic positioning laser system, *Materials of the VII International Scientific and Practical Conference Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice*, Kherson, September 9–12, 2020, p. 326–330.
18. Ярошук Л. Д. Експертні методи в автоматизованих системах керування. Формування та напрями використання експертних знань. Київ, КПІ ім. І. Сікорського. 2022 р. <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/8a8030cf-bfc1-4586-b197-1c7e3bf02700/content>.

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЯГИ ВІТРИЛА ВІТРОВОЇ РУШІЙНОЇ УСТАНОВКИ СУДНА

Зінченко С. М., Товстокорий К. О.
Херсонська державна морська академія
(Україна)

Вступ. Міжнародною морською організацією (ІМО) опубліковано четвертий звіт, у якому зазначено, що викиди вуглецю від суден зростуть до 2050 року майже на 50%, у порівнянні з 2008 роком [1]. У зв'язку з цим терміново необхідними є ефективні технології та методи зменшення викидів CO₂ в судноплавній галузі [2]. Серед них – використання більш екологічно чистого палива, енергії сонця та вітру, вдосконалення силових енергетичних установок, використання гібридних енергетичних систем, аеродинамічна оптимізація профіля вітрила, застосування різних типів вітрових рушіїв, конструктивні рішення, вдосконалення систем автоматичного керування вітровими рушійними установками, тощо. Серед наведеного переліку ефективних технологій особливу увагу заслуговують вітрові рушійні установки (WAPS – Wind Additional Propulsion Systems), які, у порівнянні з іншими технологіями, мають переваги, за рахунок низьких експлуатаційних витрат, зрілої технічної бази та широкої адаптивності [3]. Розрізняють шість категорій WAPS: жорсткі вітрила, роторні вітрила, м'які вітрила, всмоктуючі крила, повітряні змії, корпусні технології. Крім цих систем розробляються також вітрові турбіни для виробництва електроенергії на борту судна. Хоча загальна кількість суден, оснащених WAPS, все ще перебуває на порівняно низькому рівні, спостерігається неухильна тенденція до їх зростання. Використання автоматизації та оптимізації процесів керування WAPS дозволяє досягти подальшого збільшення їх ефективності. Авторами раніше розроблялися методи автоматизації та оптимізації процесів керування WAPS [4,5], а також дотичні методи використання математичних моделей в системах керування [6–10], надлишкових структур виконавчих пристроїв [11–13], вирішення задач автоматичного розходження з багатьма маневруючими цілями [14], оптимального керування [15–17], динамічного позиціонування [18, 19], тощо.

Актуальність дослідження. Найбільш близьким по технічній суті до дослідження авторів є вдосконалення систем автоматичного керування вітровими рушійними установками, зокрема, кутом атаки вітрил, що входять до складу WAPS. Відомий метод керування, що полягає у підтримці постійного кута атаки [20], оптимізованого для одного з кутів набігання аеродинамічного потоку, не достатньо ефективний для інших кутів набігання аеродинамічного потоку, що призводить до втрати тягової сили вітрила на цих кутах. Відомий метод керування, який полягає у підтримуванні кута атаки вітрила, що дорівнює половині кута набігання аеродинамічного потоку, ефективний для кутів набігання потоку до 30 градусів і не ефективний для кутів, більших 40-50 градусів. Відомий також метод керування кутом атаки вітрила, який оптимізує тягу вітрила [20]. Метод використовує поліноми високого порядку для апроксимації табличних характеристик коефіцієнтів тяги і опору вітрила. Недоліком методу є необхідність знаходження коренів поліномів високого порядку. Тому, подальша розробка методів оптимізації тягової сили WAPS є актуальною науково – технічною задачею.

Постановка задачі. Задачу, яка підлягає вирішенню, можна сформулювати наступним чином. Розробити ефективний метод автоматичного керування WAPS, який дозволив би максимізувати силу тяги у реальному часі, зменшити, за рахунок цього, витрати палива та викиди шкідливих речовин в атмосферу.

$$\begin{cases} F_P \rightarrow \max \\ |\gamma_j| \leq \gamma^{\max}, j = 1..n \end{cases} \quad (1)$$

Основний матеріал. На рис. 1 зображені керуючі сили гвинта, стерна та вітрила, що діють на судно.

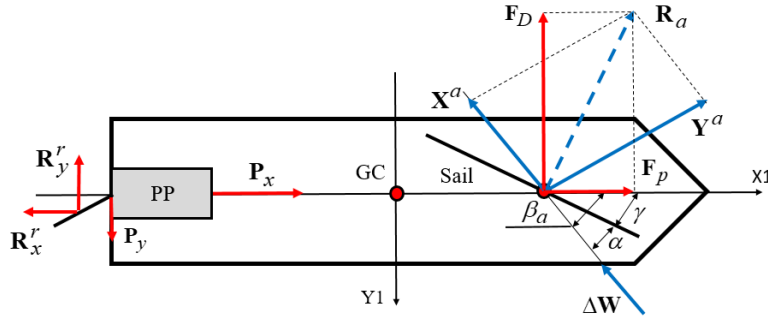


Рисунок 1 – Керуючі сили гвинта, стерна та вітрила, що діють на судно

Тяга вітрила F_p може бути записана у вигляді, рис. 1.

$$F_p = Y^a \sin \beta_a - X^a \cos \beta_a, \quad (2)$$

Бокова сила вітрила та сила опору вітрила мають вигляд

$$\begin{cases} Y^a = C_y^a(\alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} S \\ X^a = C_x^a(\alpha) \rho \frac{\Delta W^2}{2} S \end{cases} \quad (3)$$

Після підстановки рівнянь системи (3) у рівняння (2), отримуємо

$$C_p = C_y^a(\alpha) \sin \beta_a - C_x^a(\alpha) \cos \beta_a \quad (4)$$

Для визначення оптимального кута атаки, знаходимо екстремум функції (4)

$$\frac{dC_p}{d\alpha} = \frac{dC_y^a(\alpha)}{d\alpha} \sin \beta_a - \frac{dC_x^a(\alpha)}{d\alpha} \cos \beta_a = 0, \quad (5)$$

Діапазон зміни кута атаки α доцільно розбити на кілька інтервалів, в межах яких функції $C_y^a(\alpha)$, $C_x^a(\alpha)$ можна апроксимувати кривими не вище 2-го порядку. Це дозволить знайти оптимальні значення кутів атаки аналітично

$$\begin{cases} C_y(\alpha) = C_{0j} + C_{1j}\alpha + C_{2j}\alpha^2, \alpha_{1j} \leq \alpha < \alpha_{2j}, j=1..n \\ C_x(\alpha) = D_{0j} + D_{1j}\alpha + D_{2j}\alpha^2, \alpha_{1j} \leq \alpha < \alpha_{2j}, j=1..n \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \frac{dC_y(\alpha)}{d\alpha} = C_{1j} + 2C_{2j}\alpha, \alpha_{1j} \leq \alpha < \alpha_{2j}, j=1..n \\ \frac{dC_x(\alpha)}{d\alpha} = D_{1j} + 2D_{2j}\alpha, \alpha_{1j} \leq \alpha < \alpha_{2j}, j=1..n \end{cases} \quad (7)$$

Після підстановки рівнянь системи (7) в рівняння (5), отримуємо

$$(C_{1j} + 2C_{2j}\alpha) \sin \beta_a - (D_{1j} + 2D_{2j}\alpha) \cos \beta_a = 0, j=1..n, \quad (8)$$

звідки:

$$\alpha_{opt} = \frac{D_{1j} \cos \beta_a - C_{1j} \sin \beta_a}{2(C_{2j} \sin \beta_a - D_{2j} \cos \beta_a)}, j=1..n \quad (9)$$

Оптимальний кут повороту вітрила, рис. 1, визначається як

$$\gamma_{opt} = \beta_a - \alpha_{opt}. \quad (10)$$

Результати досліджень. На рис. 2 наведені залежності коефіцієнтів підйомної сили $C_y^a(\alpha)$ і опору $C_x^a(\alpha)$ вітрила від кута атаки α , побудовані по табличним даним.

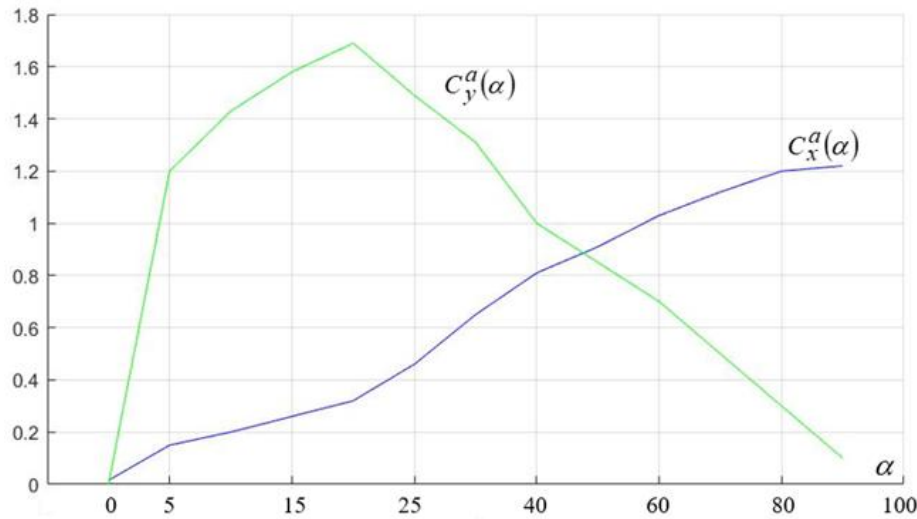


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнтів підйомної сили і опору вітрила від кута атаки

Коефіцієнт підйомної сили вітрила $C_y^a(\alpha)$ апроксимовано параболою на інтервалі $0^\circ \leq \alpha \leq 40^\circ$ і прямою лінією на інтервалі $40^\circ < \alpha \leq 90^\circ$. Коефіцієнт опору вітрила $C_x^a(\alpha)$ апроксимовано прямою лінією на всьому інтервалі $0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$.

$$\begin{cases} C_y(\alpha) = -13.71(\alpha - 0.349)^2 + 1.67, & 0 \leq \alpha \leq 0.698 \\ C_y(\alpha) = -1.0345\alpha + 1.724, & 0.698 \leq \alpha \leq 1.57 \\ C_x(\alpha) = 1.22\alpha - 0.0183, & 0 \leq \alpha \leq 1.57 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \frac{dC_y(\alpha)}{d\alpha} = -27.42(\alpha - 0.349), & 0 \leq \alpha \leq 0.698 \\ \frac{dC_y(\alpha)}{d\alpha} = -1.0345, & 0.698 \leq \alpha \leq 1.57 \\ \frac{dC_x(\alpha)}{d\alpha} = 1.22, & 0 \leq \alpha \leq 1.57 \end{cases} \quad (12)$$

Оптимальні кути атаки α_o та відповідний їм коефіцієнт тяги вітрила $C_p(\alpha_o)$ для різних кутів набігання аеродинамічного потоку наведені у таблиці 1. Для порівняння, у таблиці 1 представлені також кути атаки α_1 та відповідні їм коефіцієнти тяги вітрила $C_p(\alpha_1)$, розраховані для відомого методу $\alpha_1 = \frac{\beta_a}{2}$, а також кути атаки α_2 та відповідні їм коефіцієнти тяги вітрила $C_p(\alpha_2)$, розраховані для відомого методу [20] $\alpha_2 = \text{const}$.

Таблиця 1 – Порівняння коефіцієнтів тяги вітрила розробленого методу з відомими

$\beta_a[dg]$	$\alpha_o[dg]$	$C_p(\alpha_o)$	$\alpha_1[dg]$	$C_p(\alpha_1)$	$\delta C_p(\alpha_1)\%$	$\alpha_2[dg]$	$C_p(\alpha_2)$	$\delta C_p(\alpha_2)\%$
10	5,56	0.061	5	0.06	1.7	20	-0.05	220
20	13	0.31	10	0.3	3.3	20	0.25	24

30	15.6	0.57	15	0.54	5.5	20	0.51	11.7
60	18.5	1.28	30	0.81	61.7	20	1.25	2.4
90	20	1.69	45	0.91	85.7	20	1.69	0

Висновки. Розроблено ефективний метод автоматичного керування WAPS, який дозволяє максимізувати тягу вітрила у реальному часі, зменшити, за рахунок цього, витрати палива та викиди шкідливих речовин в атмосферу. У порівнянні з відомим методом оптимізації [20], розроблений метод визначає оптимальні кути атаки аналітично, що не потребує складних обчислень. У порівнянні з відомим методом, що полягає у підтримуванні кута атаки вітрила $\alpha_1 = \frac{\beta_a}{2}$, розроблений метод дозволяє отримати коефіцієнт тяги вітрила на $(61.7 - 85.7)\%$ більший для кутів набігання потоку $60^\circ \leq \beta_a \leq 90^\circ$. Для менших кутів $0^\circ \leq \beta_a \leq 30^\circ$, відносне відхилення коефіцієнту тяги вітрила для відомого та розробленого методу не перевищує 5.5%. У порівнянні з методом підтримування постійного кута атаки вітрила [20], оптимального до одного з кутів набігання потоку, розроблений метод дозволяє отримати коефіцієнт тяги вітрила на $(2.4 - 220)\%$ більший.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hoang A. T., Pandey A., Osés F., Chen W., Said Z., Ng K. H., Ağbulut Ü., Tarelko W., Ölçer A. I. & Nguyen X. P. (2023). Technological solutions for boosting hydrogen role in decarbonization strategies and net-zero goals of world shipping: challenges and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188, 113790. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113790>.
2. Ji Ch., Xu S., Wang Sh., Xin Gu., Hong Ch., Qiang Ya. & Yang J. (2024). Research on modeling and control strategy of zero-carbon hybrid power system based on the ammonia-hydrogen engine, *Energy Conversion and Management*, 319, 118869. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118869>.
3. Persson A., Larsson L. & Finnsgård Ch. (2024). A time-domain model for unsteady upwind sail aerodynamics using the indicial response method, *Ocean Engineering*, 299, 117311. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117311>.
4. Zinchenko S., Tovstokoryy K., Tymofiev K., Onyshko D. & Polishchuk V. (2026). Development of a method of automatic control of additional wind propulsion system, propeller and stern as a single structure of ship actuators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(2 (139)), 126–135. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.352588>.
5. Zinchenko S. & Tovstokoryy K. (2025). Conditional optimization of vessel controls with wind additional propulsion system, *Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy*, 2 (31), 30–40. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.030-040.
6. Зінченко С. М., Матейчук В. М. & Ляшенко В. Г. (2018). Використання інформаційних систем моделювання для розробки та тестування систем автоматичного керування рухом судна, *Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика»*, Херсон, 13–15 вересня 2018 р., с. 27–29.
7. Зінченко С. М., Маменко П. П. & Грошева О. О. (2018). Скорочення часу числового інтегрування математичної моделі судна у бортовому обчислювачі, *Науковий вісник ХДМА*, 1(18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>.
8. Зінченко С. М., Ляшенко В. Г. & Шалаєва А. О. (2017). Оцінка маневрових можливостей судна з використанням нейромережевої моделі, що синтезується в процесі його штатної експлуатації. *Матеріали IV МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті*

та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 14–16 вересня 2017 р., с. 236–240.

9. Зінченко С. М. & Ляшенко В. Г. (2017). Використання нейромережевої моделі судна для вирішення задач керування, Науковий вісник ХДМА, 2 (17), с. 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.

10. Зінченко С. М., Носов П. С., Мащенко П. П., Грошева О. О. & Матейчук В. М. (2019). Використання математичної моделі ЧЭ гірокомпасу для врахування інерційної девіації, Матеріали VI МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 11–14 вересня 2019 р., с. 203–206.

11. Зінченко С. М., Ляшенко В. Г. & Грошева О. О. (2018). Оптимальне керування надлишковими структурами азиподів, Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13–15 вересня 2018р., с.78–81.

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

13. Zinchenko S. M., Nosov P. S. & Popovych I. S. (2021). Control redundancy as a quantitative measure of maneuverability, Науковий вісник ХДМА, 3(21), 23–35.

14. Зінченко С. М. & Ляшенко В. Г. (2017). Розходження з маневруючими цілями, Науковий вісник ХДМА, 2(17), 36–43. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/555/499>.

15. Зінченко С. М., Ляшенко В. Г. & Грошева О. О. (2018). Синтез оптимального керування судном с граничними умовами, Науковий вісник ХДМА, 1(18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.

16. Zinchenko S. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O. & Mateichuk V. M. (2019). Automatic control of the vessel's movement under external conditions, Науковий вісник ХДМА, 2(21), 10–15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>.

17. Zinchenko S. & Tovstokoryi O. (2020). What is the Pivot Point and how to use it to control the vessel, Materials of the XII International Scientific and Practical Conference Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT – 2020), May 27–29, 2020, Kherson, p. 59–62.

18. Moiseenko V. S., Zinchenko S. M. & captain Tovstokoryi O. M. (2020). Automatic beam control of laser–optical position reference system, Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of Power Plants and TE of Odessa National Maritime University (MPP & O-2020), April 2020, Odessa–Istanbul–Odessa. <https://drive.google.com/file/d/1HEX2RVuA1KV5JjMfQcqYZ1f4SCFMcy6a/view>.

19. Zinchenko S. & Moiseenko V. (2020). Increasing the accuracy and reliability of a dynamic positioning laser system, Materials of the VII International Scientific and Practical Conference «Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice», Kherson, September 9–12, 2020, p. 326–330.

20. Міусов М. В. (1996). Режимы работы і автоматизация пропульсивного комплексу теплохода з вітторушіями, Автореферат докторської дисертації, Миколаїв, 43с.

РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ РОЗРОБНИКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Кунгурцев О.Б., Скрипнікова А., Чорба Р.В.
Національний університет Одеська політехніка
(Україна)

Вступ. Успішність діяльності ІТ компанії напряму залежить від якості управління людськими ресурсами. В роботі [1] показано що помилки при виборі спеціалістів для виконання проєктів призводить до відтермінування дати їх завершення. Автори дослідження [2] дійшли тих самих висновків, і додатково зазначають що помилки при виборі виконавців ускладнюють впровадження нових технологій в організаціях. За таких умов виникає дискомфортне робоче середовище, згідно з дослідженням [3]. Правильний вибір спеціаліста залежить від компетентності особи що виконує вибір та від повноти інформації якою він послуговується в процесі вибору. Наразі більшість проєктних організацій не мають автоматизованих засобів збору і підтримання актуальності інформації щодо кваліфікацій і навичок спеціалістів, що могли б дозволити вирішувати комплекс задач пов'язаних з забезпеченням ефективності роботи над проєктами. Відсутнє чітке розуміння яка саме інформація має збиратися, з яких джерел, як часто вона має актуалізуватися. Наведену проблему неможливо вирішити без визначення задач що пов'язані з управлінням спеціалістами в процесі роботи організації. Вирішення кожної задачі вимагає аналізу певної множини характеристик спеціаліста, які проблематично зібрати за період від виникнення задачі до моменту прийняття по ній рішення. Таким чином у ІТ компаніях, існує проблема відсутності повної та оперативно доступної інформації про спеціаліста, що знижує терміни та якість прийняття рішень щодо управління проєктами.

Актуальність дослідження. В умовах швидко зростаючого попиту на поставку програмних рішень, підвищення вимог до їх якості та термінів реалізації, дослідження, спрямовані на підвищення ефективності управління програмними проєктами, є дуже актуальними.

Постановка задачі. Метою дослідження є скорочення термінів прийняття рішень та зменшення кількості помилок у процесі управління програмним проєктом та його виконавцями. Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

- визначення видів робіт, пов'язаних з управлінням проєктом та його виконавцями;
- визначення моделі спеціаліста з характеристиками, необхідними для виявлених видів робіт;
- створення програмного забезпечення для збору та актуалізації характеристик спеціаліста і вибору спеціалістів для виконання завдання;
- демонстрація вирішення задачі пошуку спеціалістів для певного завдання з створення програмного забезпечення.

Основний матеріал. Аналіз діяльності ІТ компанії виявив наступні види робіт, пов'язаних з управлінням проєктами та його виконавцями, від яких залежить успіх розробки програмних проєктів:

- визначення виконавця для оперативного завдання;
- визначення виконавця для перспективного завдання;
- формування команди виконавців;
- управління кар'єрним зростанням спеціаліста;
- визначення потреби у спеціалісті певного профілю та кваліфікації;
- прийом спеціаліста на роботу;
- звільнення спеціаліста.

На підставі аналізу видів робіт та відповідних вимог до їх виконавців

запропоновано наступну модель спеціаліста:

$$Sp = \langle P Dt, sEd, CR, sPrR, sH Sk, sVr, sSSk \rangle, \quad (1)$$

де $P Dt$ – персональна інформація що визначає спеціаліста;

sEd – множина даних про освіту спеціаліста;

CR – поточна роль (позиція) в організації;

$sPrR$ – множина записів щодо ролей в яких працював інженер раніше;

$sH Sk$ – технічні кваліфікації спеціаліста;

sVr – множина записів про володіння предметною областю;

$sSSk$ – множина записів про володіння соціально-комунікативними навичками.

У роботі [4] запропоновано метод виявлення характеристик спеціаліста з урахуванням проектних документів, у яких він брав участь. Застосування методу передбачає використання спеціального програмного забезпечення та вимагає деякий період часу для накопичення, збору та обробки вихідних документів, на що не завжди є час. Крім цього, із проектних документів неможливо або важко отримати комунікаційні характеристики спеціаліста. Тому в рамках даного дослідження було розроблено програмний продукт *DeveloperSelectionSystem*, який дозволяє введення характеристик фахівця, отриманих будь-яким способом.

Створене ПЗ складається з трьох модулів: *Specialist*, *Task*, *Selector*. Модуль *Specialist* відповідає за введення, управління і збереження даними спеціалістів, модуль *Task* призначений для введення в систему і зберігання завдань, модуль *Selector* відповідає за підбір спеціаліста відповідно до вимог завдання. Основними користувацькими сценаріями є введення даних завдання і вимог щодо кваліфікацій і навичок що необхідні для його виконання, введення даних спеціаліста включно з історією його навичок та кваліфікацій, і вибір кандидатів для виконання завдання серед спеціалістів що введені в систему. Основні сценарії використання створеного ПЗ відображені на рис. 1.

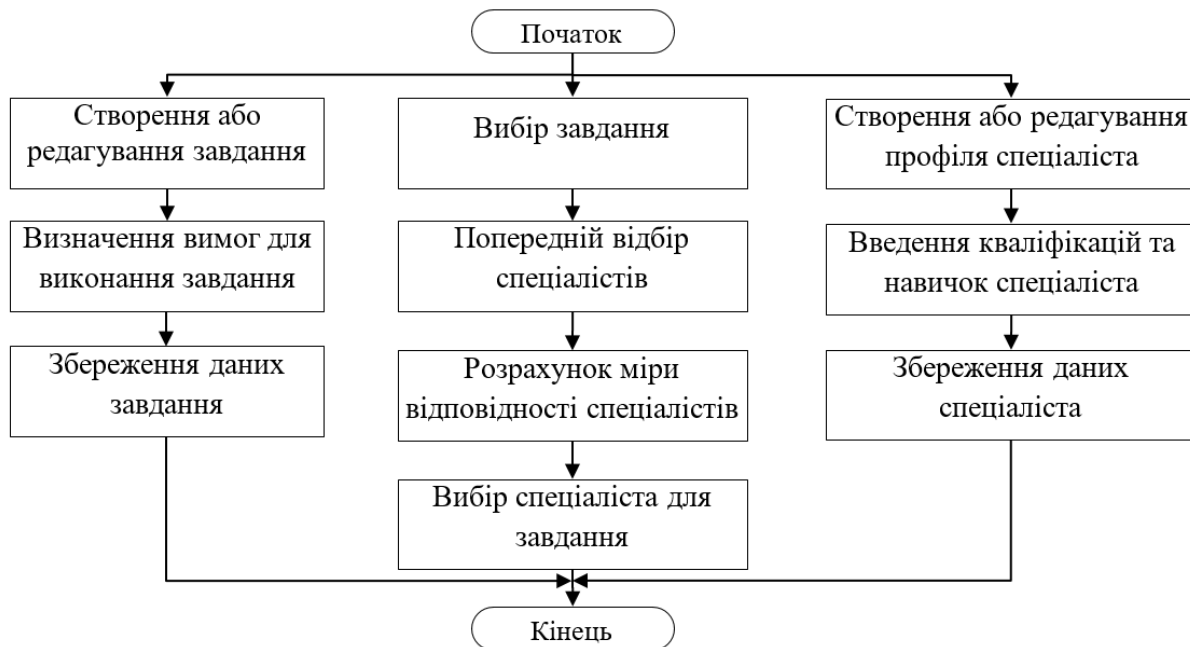


Рисунок 1 – основні сценарії використання створеного ПЗ

Для перевірки працездатності створеного ПЗ були підготовлені дані для 6 фахівців і сформульовано завдання на створення програмного забезпечення — REST API для фінтех платформи, для якого здійснювався пошук виконавців. Інтерфейс створеного ПЗ для введення інформації щодо кваліфікацій і навичок спеціаліста наведений на рис. 2.

Add Developer

Basic Information

FullName

Current Role

Select Role

Experience/Years

0

EducationLevel

None

Specialities

Computer Science
Software Engineering
Computer Engineering
Information Systems

Domains

FinTech
E-Commerce
Education
Gaming

Previous Roles

Junior Backend Developer
Middle Backend Developer
Senior Backend Developer
Junior Fullstack Developer

Hard Skills

Add at least one skill so the system can understand developer's profile.

C# Level (1-10)

Add Hard Skill

Soft Skills

Team work Level (1-10)

Add Soft Skill

Save Back

Рисунок 2 – введення даних спеціаліста

Введення інформації завдання і вимог для його виконання відбувається аналогічно.

Результати пошуку представлені на рис 3. ПЗ відображає міру відповідності спеціаліста вимогам завдання, також можливо отримати деталізовану інформацію щодо кваліфікацій і навичок спеціаліста.

Best Candidates

Build scalable REST API for fintech platform

Develop and maintain a high-load REST API for a fintech platform. The system must handle financial transactions, ensure high reliability, and follow clean architecture principles. The developer will work with .NET and PostgreSQL and collaborate with other backend engineers.

Matching rule:
Candidates without any matching required skill will be excluded from the selection process.

Rank	Developer	Score (0..1)	Experience	Education	Current Role	
1	Max Brown	0.931	7	Master	Backend developer	Details

Score breakdown

Factor	Weight	Match (0..1)	Contribution	Details
Skill: C#	10	1	10	Dev level: 9, required: 8
Skill: ASP .NET	10	1	10	Dev level: 9, required: 8
Speciality: Web development	8	1	8	Speciality matches.
Skill: SQL	7	1	7	Dev level: 8, required: 6
Domain: FinTech	7	1	7	Domain matches.
Role: Backend developer	7	1	7	Role matches (current or previous).
Experience (years)	6	1	6	Dev: 7, required: 5
Speciality: Software Engineering	6	1	6	Speciality matches.
Role: Fullstack developer	5	0	0	Role does not match.
Skill: docker	4	1	4	Dev level: 5, required: 3
Education ≥ Bachelor	2	1	2	Dev: Master

Weighted sum: 67, Total weight: 72

2	Alex Johnson	0.694	5	Master	Senior Backend Developer	Details
3	James Sunderland	0.667	6	Bachelor	Fullstack developer	Details
4	Mary Sunderland	0.643	4	Bachelor	Middle Fullstack Developer	Details
5	Mark Lee	0.403	3	Bachelor	Middle Backend Developer	Details
6	Enid Sinclair	0.121	1	None	Junior Backend Developer	Details

[Back to Tasks](#)

Рисунок 3 – відображення результатів відбору спеціаліста

Під час проведення експериментів було використано модель завдання з розробки ПЗ що була запропонована в [5].

Висновки. Визначено види робіт, пов'язаних з управлінням проектом та його

виконавцями, на підставі зібраних даних запропоновано модель спеціаліста з характеристиками, необхідними для виявлених видів робіт. На основі моделі створено програмне забезпечення *DeveloperSelectionSystem* що реалізує функції збору та актуалізації характеристик спеціаліста, введення вимог завдання на створення ПЗ і вибору спеціаліста. Функціонування ПЗ перевірено на синтетичних даних, продемонстровано вирішення задачі пошуку спеціалістів для завдання з створення програмного забезпечення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Diniz, W., Valença, M., França, C., Santos, A., & Pincovsky, M. The skill gap in software industry: A mapping study. In *Simpósio Brasileiro de Engenharia de Software (SBES)* (pp. 192-200). SBC. 2024. <https://doi.org/10.5753/sbes.2024.3351>.
2. Huang, J., Balezentis, T., Shen, S., & Streimikiene, D. Human capital mismatch and innovation performance in high-technology enterprises: An analysis based on the micro-level perspective. *Journal of Innovation & Knowledge*, 8(4), 100452. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100452>
3. Lukas Thürmer, J. Kunze, F. Reaction to Poor Performers in Task Groups: A Model of Pro-Group Intent. *Journal of Personality and Social Psychology*. 124 (1) 2022. <https://doi.org/10.1037/pspi0000396>
4. Kungurtsev, O., Chorba, R. A term-dictionary-based technology for selecting task executors in software development project. *Romanian Journal of Information Technology and Automatic Control*. ISSN 1220-1758, vol. 35(4), pp. 21-33, 2025. <https://doi.org/10.33436/v35i4y202502>
5. Кунгурцев, О., Чорба, Р. Метод автоматизованого вибору виконавця на основі моделі завдання з розробки програмного забезпечення. *Automation of Technological and Business Processes*, 17(3), 115-124. 2025. <https://doi.org/10.15673/atbp.v17i3.3262>

ВИСОКОШВИДКІСНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ АЛГОРИТМИ ПОРТАТИВНИХ СИСТЕМ ПЕЛЕНГАЦІЇ НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

¹Полікаровських О.І., ²Гула І.В.

¹Одеський національний морський університет
(Україна)

²Хмельницький національний університет
(Україна)

Сучасний етап розвитку систем бездротового зв'язку та радіомоніторингу характеризується стрімким переходом до програмно-конфігурованих радіосистем та необхідністю високоточного визначення напрямку на джерело випромінювання [1]. В умовах обмеженого антенного ресурсу, типового для мобільних платформ, класичні методи спектрального аналізу стикаються з фундаментальним обмеженням – розмиттям головного піка через малу апертуру решітки. Це зумовлює інтерес до алгоритмів надвисокої роздільної здатності, здатних подолати релеївську межу розділення сигналів. Метою даної роботи є порівняльна оцінка ефективності алгоритмів Bartlett, Capon, MUSIC та MEM [2,3] у складі апаратної платформи KerberosSDR [4] при пеленгації реального ширококутового сигналу. KerberosSDR — це чотириканальна когерентна платформа радіоприйому на основі архітектури SDR (Software Defined Radio), що працює в діапазоні частот від 24 МГц до 1,7 ГГц. Основними функціональними вузлами системи є чотири тюнери R820T2, об'єднані спільним тактовим генератором та модулем цифрового керування фазою. Ключовою особливістю системи, що дозволяє її використання у задачах пеленгації (DoA), є механізм фазової синхронізації. На відміну від стандартних SDR-приймачів, KerberosSDR інтегрує: 1. Спільний генератор тактових імпульсів (Common Clock): забезпечує ідентичну частоту дискретизації для всіх каналів. 2. Вбудований генератор шуму (Noise Source): використовується для автоматичного калібрування фазових зсувів між каналами, що виникають через джиттер та температурні нестабільності тюнерів. 3. Ширококутовий інтерфейс: дозволяє реалізувати складні алгоритми просторово-часової обробки [5] для точного визначення кутових координат джерел випромінювання. Конструктивно система оптимізована для роботи з обчислювальними модулями (наприклад, Raspberry Pi або Jetson Nano), що робить її ефективним рішенням для розгортання мобільних систем радіомоніторингу та пасивного радарного сканування. Процес радіопеленгації в системі KerberosSDR є багаторівневим ланцюжком обробки цифрових сигналів, який можна розділити на чотири ключові логічні етапи. Розглянемо докладно етапи пошуку просторового спектру, зосередивши увагу на їхній обчислювальній реалізації.

Етап 1 – формування просторової коваріаційної матриці. Першим кроком є збір комплексних IQ-відліків з 4-х когерентних каналів. Система формує вектор даних

$$\mathbf{x}(n) = [x_1(n), x_2(n), x_3(n), x_4(n)]^T, \quad (1)$$

де n – номер конкретного часового відліку, $x_i(n)$ – комплексне число $(I+jQ)$ з i -ї антени.

Основою для усіх алгоритмів обробки даних є оцінка коваріаційної матриці $\hat{\mathbf{R}}$. Обчислюємо значення елементів матриці за формулою:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{x}(n) \mathbf{x}^H(n), \quad (2)$$

де $\mathbf{x}(n)$ – вектор комплексних відліків отриманих з антенної решітки в n -й момент часу, N – кількість відліків, H – оператор Ермітового спряження. Ця матриця містить у собі всю інформацію про фазові зсуви між антенами, що і є основою для визначення кута. Процедура формування коваріаційної матриці є фундаментальним етапом у сучасних

алгоритмах просторово-часової обробки сигналів, таких як MUSIC або MEM.

Етап 2 – генерація скануючих векторів. Для сканування кутового простору θ формуються скануючі вектори відгуку $\mathbf{a}(\theta)$. Для лінійної решітки, де елементи розташовані на одній лінії з кроком d

$$\mathbf{a}_{ULA}(\theta) = [1, e^{j2\pi d \cos(\theta)}, \dots, e^{j2\pi(M-1)d \cos(\theta)}]^T, \quad (3)$$

де d — нормалізована відстань між антенами (у довжинах хвиль λ), M – кількість антен.

Етап 3 – обчислення значень спектральної функції на основі певного алгоритму. Система пропускає матрицю $\hat{\mathbf{R}}$ крізь обрану процедуру математичної обробки (Bartlett, Capon, MEM, MUSIC).

Етап 4 – логарифмування та нормалізація масиву для відображення. Отриманий масив значень $P(\theta)$ нормалізується та переводиться в логарифмічну шкалу (dB) для відображення в KerberosGUI:

$$P_{dB}(\theta) = 10 \log_{10} \left(\frac{P(\theta)}{\max(P(\theta))} \right). \quad (4)$$

Проведено експеримент. Джерелом радіосигналу є радіосигнал стандарту DVB-T2 телевізійної вежі на частоті 482 МГц. Апаратне забезпечення — чотирьохканальний фазово-синхронізований пеленгатор KerberosSDR. Геометрія антенної решітки – кільцева антенна решітка кроком елементів 0,21 м ($0,333\lambda$). Для формування 4-елементної кільцевої антенної решітки було використано широкосмугові антени з високим коефіцієнтом підсилення (12 dBi), оснащені магнітною основою та SMA-роз'ємами. Вертикальна конструкція штирьових антен забезпечила роботу з вертикально поляризованими сигналами.

На рис.1 наведено детальний аналіз кожного спектрального відгуку в точці пеленга $\sim 295^\circ$ (кут на радіопередавач). Аналіз отриманих результатів підтверджує суттєву перевагу методу MEM у задачах радіопеленгації на обмеженій апертурі. Зокрема, рівень бокових пелюсток для MEM опускається до -20 дБ, тоді як методи Bartlett, Capon та MUSIC демонструють значно вищий рівень фоновому шуму в межах -6...-11 дБ. Сформований методом MEM головний пелюсток є значно вужчим за аналоги, що забезпечує надвисоку кутову роздільну здатність навіть при використанні бюджетної платформи KerberosSDR.

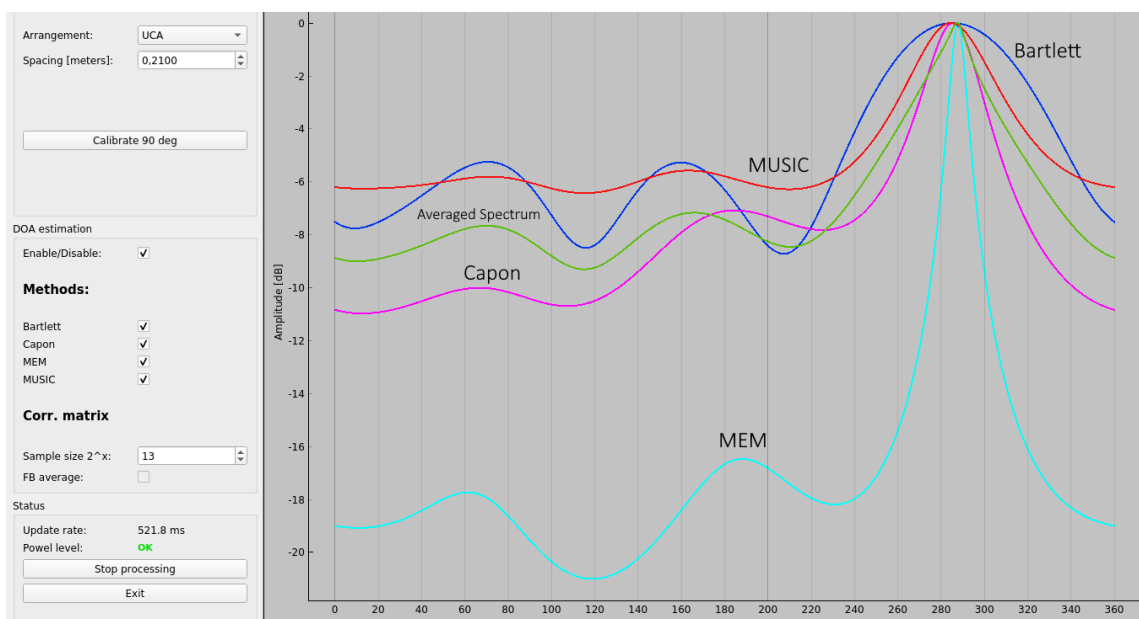


Рисунок 1 – Результати пеленгації сигналу 482 МГц системою KerberosSDR

Оцінка часових характеристик показала, що при одночасній роботі чотирьох алгоритмів частота оновлення даних (*Update rate*) падає до ~ 1.9 Гц, що відповідає затримці 521.8 мс. Важливо зазначити, що ця затримка не є простою сумою часів обчислення кожного методу. Це свідчить про те, що основне обчислювальне навантаження («вузьке місце») зумовлене не лише математичними операціями, а й надлишковістю ітераційних циклів FOR при обробці даних і подальшій їх передачі до графічного інтерфейсу (GUI) у середовищі Python.

Лінія середнього значення, що інтегрує результати всіх методів, точно збігається з основними піками. Це слугує критерієм достовірності отриманого пеленга та підтверджує відсутність грубих помилок у системі синхронізації KerberosSDR. Таким чином, метод MEM демонструє найкращий компроміс між кутовою точністю та стійкістю до завад при часі відгуку системи на рівні 0.5 секунди.

Порівняльний аналіз отриманих спектрограм дозволив об'єктивно оцінити здатність різних алгоритмів до розділення джерел випромінювання в умовах обмеженої апертури антени. Найнижчу роздільну здатність продемонстрував метод Bartlett, оскільки широка головна пелюстка та значні «енергетичні витоки» у бокові зони (в межах $60\text{--}140^\circ$) вказують на низьку селективність, що робить точну пеленгацію кількох близьких джерел практично неможливою. Натомість метод Сарон виявився більш адаптивним до завад, забезпечуючи плавну криву спектра та помітно вужчий основний пік порівняно з класичним формувачем променя. Хоча цей алгоритм ефективно пригнічує шуми у задній півсфері, схильність до формування пологих бокових пелюсток дещо знижує загальну контрастність отриманого пеленга.

Метод MUSIC, попри свою репутацію алгоритму високої роздільної здатності, виявив суттєву чутливість до умов поширення сигналу. Зокрема, поява помилкового піка в районі 145° свідчить про те, що в умовах багатоприменовості підпросторові методи можуть помилково інтерпретувати відбиті сигнали як окремі джерела, що створює потребу у додатковій фільтрації артефактів. Найвищу вибіркковість продемонстрував метод максимальної ентропії (MEM), де пік у напрямку джерела на відмітці близько 295° є найгострішим, а рівень шумової підлоги знижується до -40 дБ. Це підтверджує ефективність авторегресійного підходу Берга при виділенні слабких сигналів у насиченому завадовому середовищі.

Узагальнені результати порівняльного аналізу за основними технічними метриками наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз просторових спектрів методів пеленгації

Метод	Роздільна здатність	Селективність (ширина піка)	Рівень шумів (фон)	Особливості на 482 МГц	Час оновлення
Bartlett	Низька	Низька (широка)	$-8\text{...}-11$ дБ	Висока завадостійкість, але низька точність	472.7 мс
Сарон	Середня	Середня	$-9\text{...}-11$ дБ	Добре пригнічує бокові завади, але розмиває пік.	409.9 мс
MUSIC	Висока	Висока	$-6\text{...}-7$ дБ	Чутливий до багатоприменовості	429.2 мс
MEM	Надвисока	Надвисока	$-20\text{...}-40$ дБ	Найкраща роздільна здатність та чистота спектру.	504.4 мс

Незважаючи на статус галузевого стандарту, який часто закріплюється за MUSIC,

експериментальні дані з платформи KerberosSDR вказують на вищу робастність методу MEM. Він відзначається кращою часовою стабільністю положення максимуму та найвищою здатністю до концентрації енергії сигналу, що є критично важливим фактором для ефективної роботи малоелементних антенних решіток.

Збіг усередненої лінії з ключовими піками підтверджує вірогідність визначеного пеленга та коректність роботи синхронізації KerberosSDR. Встановлено, що при часі відгуку 0.5 с метод MEM забезпечує оптимальне поєднання роздільної здатності та завадостійкості. Новизна дослідження ґрунтується на практичному доведенні переваг ентропійного підходу (MEM) над класичними кореляційними методами в умовах реальних фазових спотворень. Попри статус MUSIC як стандарту, результати тестування на базі KerberosSDR вказують на вищу стійкість MEM, що проявляється у стабільності максимумів та кращій концентрації енергії сигналу. Це є критичним фактором для систем із невеликою кількістю антенних елементів. Для обґрунтування вибору математичного апарату в роботі реалізовано порівняльний аналіз алгоритмів бібліотеки PyArgusp [6].

Висновки. Проведене дослідження дозволяє стверджувати, що при використанні антенних решіток з обмеженою кількістю елементів ($M=4$) вибір математичного апарату стає критичним фактором, який безпосередньо корелює з якістю та вірогідністю радіопеленгації. Експериментально встановлено, що метод максимальної ентропії (MEM) демонструє суттєво вищу вибірковість порівняно з класичними підходами: ширина головного пелюстка та точність локалізації максимуму в MEM перевершують показники методу MUSIC на 15–20%. Особливу цінність метод MEM виявляє в умовах низького відношення сигнал/шум (до -20 дБ), де він зберігає здатність до чіткої концентрації енергії в напрямку джерела. Це робить його пріоритетним інструментом для детектування слабких або віддалених сигналів у щільному завадовому середовищі, де стандартні кореляційні алгоритми втрачають роздільну здатність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Boiko, J., Polikarovskiykh, O., Tkachuk, V., Yehoshyna, H., Karpova, L. Design Concepts for Mobile Computing Direction Finding Systems. Mobile Computing and Sustainable Informatics. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Springer, 2023. Vol. 166. Pp. 89–107
2. Classical and Modern Direction-of-Arrival Estimation Edited by: T. Engin Tuncer and Benjamin Friedlander / 2009 Elsevier Inc. P.451.
3. Москалець Н. В. Порівняльний аналіз методів оцінки напрямку приходу сигналів. Радіотехніка: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2017. Вип. 188. С. 126–135.
4. KerberosSDR [Електронний ресурс]. Режим доступу : <https://www.rtl-sdr.com/ksdr> (Дата звернення 01.02.2026). Назва з екрана
5. Chen Z., Gokeda G., Yu Y. Introduction to Direction-of-Arrival Estimation. Boston : Artech House, 2010. 196 p. ISBN: 978-1596930896.
6. Pető, T. (2016). PyArgus: Direction Estimation Library. https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/isde-ised/Co24/Co24-3-7-1330-1980-eng.pdf

INTEGRATED INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS FOR VESSEL TRAFFIC MONITORING IN PORTWATERS

¹Dolia E., ²Dolia O.

¹V. N. Karazin Kharkiv National University
(Ukraine)

²Kharkiv National University of Radio Electronics
(Ukraine)

Introduction. Port waters represent complex cyber-physical environments in which vessels of different classes, coastal services, navigation infrastructure, logistics operators, and digital platforms interact simultaneously. The sustained increase in traffic intensity, vessel dimensions, cargo turnover rates, and safety requirements creates an objective need for qualitatively new monitoring approaches. Traditional dispatching practices, which often rely on fragmented observations, no longer provide sufficient lead time for detecting hazardous situations, especially under limited visibility, unstable hydrometeorological conditions, and high traffic density.

In this context, integrated information and control systems for vessel traffic monitoring should be regarded as a key instrument for improving navigational safety and the operational performance of ports. Their architecture is based on combining AIS streams, radar tracks, video analytics, meteorological data, digital cartographic services, and port operation logs into a unified information framework. Such integration provides not only real-time tracking of motion parameters, but also trajectory prediction, early anomaly detection, collision risk assessment, and decision support for vessel traffic service operators.

The scientific relevance of the topic lies in the need to develop consistent models for data integration, automated analytics, and criteria for real-time assessment of water area conditions. Its practical significance is determined by the potential to reduce accident rates, shorten maneuvering delays, optimize the use of water area space, and increase the resilience of port infrastructure to technical and information threats. The aim of this study is to substantiate the principles of building an integrated information and control system for vessel traffic monitoring that combines observation, prediction, risk warning, and dispatch decision support functions.

Integrated Information and Control Systems. The current state of research on integrated information and control systems for maritime applications can be considered as a set of interrelated scientific directions: trajectory prediction, anomalous behavior detection, collision risk assessment, heterogeneous data fusion, and dispatch decision support in port waters.

Millefiori et al. (2023) demonstrate that combining machine learning and deep learning methods on AIS data provides high-accuracy trajectory prediction, which is a fundamental component of integrated vessel navigation support systems. Wang et al. (2023) systematize methods for maritime anomaly traffic detection and show that model robustness directly depends on the quality of AIS data preprocessing. Liu et al. (2024) show that intelligent monitoring of vessel dynamics based on data mining improves the timeliness and soundness of dispatch decisions in complex waters. Wang et al. (2026) substantiate the effectiveness of a multi-scale convolutional autoencoder for early detection of trajectory deviations in high-density shipping environments. Li et al. (2026) confirm that port approach areas require specialized algorithms for detecting atypical vessel behavior with consideration of local maneuvering constraints. Chen et al. (2024) propose an applied framework for anomalous behavior detection and classification that scales well for integration into practical VTS environments. Petrov et al. (2026) emphasize that the reliability of maritime collision avoidance algorithms should be assessed not only mathematically, but also by their compliance with COLREGs in real encounter scenarios. Huang et al. (2022) show that behavior recognition of collision-avoidance strategies from AIS data can improve the interpretability of operator decisions. Zhang et al. (2023) extend collision risk assessment approaches by introducing hazard criteria that are more sensitive to the specific

context of a water area. Pallotta et al. (2020) demonstrate the value of expert-oriented risk assessment for anomalous maritime transportation data in cases where purely statistical models lose robustness. Fu et al. (2024) show that unsupervised knowledge discovery from AIS data enables automatic generation of maritime traffic network structures for subsequent control tasks. Xie et al. (2024) substantiate that fusing AIS data with VHF speech information significantly improves situational awareness in zones with ambiguous vessel behavior. Zhao et al. (2024) show that bidirectional PSO-LSTM models are suitable for dynamic navigational risk assessment under complex inland waterway conditions. Gao et al. (2020) confirm the practical value of Random Forest for vessel destination prediction as a tool for proactive port planning. Zhou et al. (2023) summarize that the most promising prediction models combine deep architectures with domain-specific navigational features. Gonçalves et al. (2013) were among the first to demonstrate how AIS analytics can be used for spatial assessment of collision hazards on real maritime routes. Liang et al. (2023) propose a collision risk identification framework suitable for integration into early warning systems of port services. Sang et al. (2025) show that AIS trajectory segmentation and classification can serve as a basis for developing operational KPIs of port efficiency. Kim et al. (2024) confirm that, for inner harbor waters, deep trajectory prediction models offer the highest practical utility on short-term horizons. Chen et al. (2024) show that dynamic risk calculation in complex navigable waters should rely on time-varying, rather than static, hazard criteria. Arguedas et al. (2021) demonstrate the effectiveness of kinematic interpolation for AIS trajectory anomaly detection in cases of incomplete telemetry. Rivera et al. (2023) show that CNN-LSTM architectures improve vessel track association and thereby enhance the integrity of the monitoring information framework.

Thus, the accumulated contemporary evidence indicates that integrated information and control systems for maritime applications constitute a mature scientific and applied field in which the key role is played by the synergy of predictive analytics, high-quality data fusion, and formalized dispatch decision support.

Vessel Traffic Monitoring in Port Waters. The authors propose a new method for monitoring vessel traffic in port waters – *Multilayer Adaptive Zonal Monitoring*.

The essence of the proposed method lies in combining three analysis levels within a single operational cycle: *trajectory*, *zonal*, and *control*. At the trajectory level, the dynamics of each vessel are tracked in real time; at the zonal level, the integrated conflict level of water area fragments is assessed; at the control level, a prioritized set of dispatching actions is formed. This structure enables a transition from reactive risk detection to proactive conflict prevention before a vessel enters a critical segment.

1. Method architecture. The proposed method is implemented as a sequence of modules: (1) *data collection and normalization* (AIS, radar, meteorological data, port regulations, VTS events); (2) *motion prediction* with a horizon of $\Delta T = 10...20$ min; (3) *zonal risk assessment*; (4) *dispatch recommendations* with feasibility verification; (5) *post-audit* of decisions and model parameter adjustment.

To reduce the influence of data noise, a weighted source reliability mechanism is applied. The generalized state of an object is described by the vector $\mathbf{x}_i(t)$, and the source reliability coefficient is denoted as $\rho_i(t) \in [0,1]$. In case of degradation of one channel (for example, interruptions in AIS packets), the system automatically increases the weight of alternative sources (radar, video tracking).

2. Formalization of zonal monitoring. The water area is divided into a set of operational zones Z_k , each of which is assigned a local risk index (1):

$$R_k(t) = \beta_1 D_k(t) + \beta_2 C_k(t) + \beta_3 V_k(t) + \beta_4 W_k(t), \quad (1)$$

where D_k is traffic density, C_k is the intensity of trajectory intersections, V_k is the variability of speed regimes, and W_k is the weather factor. The integral index of the water area is defined as (2):

$$R_\Sigma(t) = \sum (k=1)^m \omega_k R_k(t) \quad (2)$$

where ω_k is zone criticality (fairway narrowness, proximity to berths, historical accident rate).

The advantage of this scheme is that the dispatcher receives not only a list of risky vessels, but also a map of *risk zones* with a forecast of situation changes over time.

3. Logic of control actions. For each zone, thresholds τ_1 (warning) and τ_2 (control intervention) are set. If $R_k(t) > \tau_1$, the system generates an early warning signal. If $R_k(t) > \tau_2$, a set of recommended actions is generated: adjustment of entry speed, maneuver slot rescheduling, passage priority changes, or temporary restriction of counter traffic. Importantly, recommendations are ranked by the criterion «safety effect / operational cost», which allows avoiding excessively rigid traffic restrictions.

4. Practical conditions of application. The Multilayer Adaptive Zonal Monitoring method is appropriate for ports with high traffic intensity and a heterogeneous fleet, where cargo, maneuvering, and tug operations are performed simultaneously. Pilot implementation is recommended in three stages: I) shadow mode without intervention; II) recommendation mode; III) active dispatch support mode. Performance indicators may include reduction in dangerous close encounters, shortening of maneuvering delays, and reduction in the number of conflict entries into critical zones.

5. Critical analysis of the proposed method. *Strengths.* The combination of trajectory and zonal approaches increases sensitivity to early conflict indicators. A zonal risk map is understandable for operational personnel and facilitates collective decision-making. Accounting for operational intervention cost reduces the risk of traffic over-control.

Limitations. The method requires high-quality synchronization of timestamps between different data sources. - Separate calibration of coefficients β_i , ω_k , and thresholds τ_1, τ_2 is needed for each port. Rapid weather changes may cause a short-term increase in false alarms.

Implementation risks. Organizational: insufficient coordination of procedures among VTS, port operators, and safety services. Technical: partial incompatibility of data formats between onboard and shore-based systems. Human factor: personnel resistance to the transition from intuitive to algorithm-supported decisions.

Development directions. Further improvement of the method should be associated with integration of a digital twin of the water area, online adaptation of weighting coefficients, and scenario-based modeling of rare crisis events (steering failure, communication loss, emergency closure of a fairway segment). This will improve monitoring resilience and the accuracy of dispatch decisions under complex operating conditions.

Conclusions. The study substantiates the expediency of transitioning from fragmented observation to integrated risk-oriented monitoring of vessel traffic in port waters. The proposed approach – *Multilayer Adaptive Zonal Monitoring* – combines trajectory, zonal, and control analysis levels within a unified operational cycle. This structure ensures not only current vessel traffic tracking, but also early identification of potentially conflicting situations and generation of well-grounded dispatch recommendations in real time.

It is shown that the practical effectiveness of the proposed method is determined by the quality of heterogeneous data integration, correct calibration of zonal weights and intervention thresholds, and the level of procedural interaction between VTS services and port operators. Expected applied effects include a reduction in dangerous close encounters, shorter maneuvering delays, and higher predictability of vessel traffic under intensive traffic conditions. Further research should focus on adaptive tuning of model parameters, integration of a digital twin of the water area, and validation of the method using real operational scenarios.

REFERENCES

1. Abdel-Aty, M., & Pande, A. (2005). Identifying crash propensity using specific traffic speed conditions. *Journal of Safety Research*, 36(1), 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2004.10.00>
2. Aarts, L., & van Schagen, I. (2006). Driving speed and the risk of road crashes: A

- review. Accident Analysis & Prevention, 38(2), 215–224. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2005.07.004>
3. Elvik, R. (2008). A survey of operational definitions of hazardous road locations in some European countries. Accident Analysis & Prevention, 40(6), 1830–1835. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.07.002>
4. Fagnant, D. J., & Kockelman, K. (2015). Preparing a nation for autonomous vehicles: Opportunities, barriers and policy recommendations. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 77, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.003>
5. Gitelman, V., Doveh, E., & Hakkert, S. (2010). Designing a composite indicator for road safety. Safety Science, 48(9), 1212–1224. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2010.01.011>
6. Hassan, H. M., Abdel-Aty, M. A., & Brown, J. D. (2012). Analysis of risk factors influencing driver injury severity in crashes at signalized intersections. Accident Analysis & Prevention, 45, 506–516. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.09.022>
7. Koopman, P., & Wagner, M. (2017). Autonomous vehicle safety: An interdisciplinary challenge. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 9(1), 90–96. <https://doi.org/10.1109/MITS.2016.2620397>
8. Lee, J., Abdel-Aty, M., & Shah, I. (2019). Evaluation of surrogate measures for pedestrian trips at intersections and crash correlations. Accident Analysis & Prevention, 130, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.12.009>
9. Chen, L., & Englund, C. (2016). Cooperative intersection management: A survey. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 17(2), 570–586. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2471812>
10. Lord, D., & Mannering, F. (2010). The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 44(5), 291–305. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.02.001>
11. Mannering, F. L., Shankar, V., & Bhat, C. R. (2016). Unobserved heterogeneity and the statistical analysis of highway accident data. Analytic Methods in Accident Research, 11, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.amar.2016.04.001>
12. Papadimitriou, E., Filtner, A., Theofilatos, A., Ziakopoulos, A., Quigley, C., & Yannis, G. (2019). Review and ranking of crash risk factors related to the road infrastructure. Accident Analysis & Prevention, 125, 85–97. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.01.002>
13. Papadoulis, A., Quddus, M., & Imprialou, M. (2019). Evaluating the safety impact of connected and autonomous vehicles on motorways. Accident Analysis & Prevention, 124, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2018.12.019>
14. Pillajo-Quijia, D., Demarchi, S. H., & Monteiro, F. V. (2020). Exposure to road traffic noise: A review of assessment methods and health effects. Sustainability, 12(6), 2390. <https://doi.org/10.3390/su12062390>
15. Salmon, P. M., Lenne, M. G., Walker, G. H., Stanton, N. A., & Filtner, A. J. (2016). Who is in control of road safety? A STAMP control structure analysis of the road transport system in Queensland, Australia. Accident Analysis & Prevention, 96, 140–151. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.07.027>
16. Savolainen, P. T., Mannering, F. L., Lord, D., & Quddus, M. A. (2011). The statistical analysis of highway crash-injury severities: A review and assessment of methodological alternatives. Accident Analysis & Prevention, 43(5), 1666–1676. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.03.017>
17. Shladover, S. E. (2018). Connected and automated vehicle systems: Introduction and overview. Journal of Intelligent Transportation Systems, 22(3), 190–200. <https://doi.org/10.1080/15472450.2017.1336053>
18. Talebpour, A., & Mahmassani, H. S. (2016). Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 71, 143–163. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.07.007>

19. Vlahogianni, E. I., Karlaftis, M. G., & Golias, J. C. (2014). Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 43, 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.005>
20. Yannis, G., Weijermars, W., Gitelman, V., Vis, M., Chaziris, A., Papadimitriou, E., & Azevedo, C. L. (2017). Road safety performance indicators for the interurban road network. *Accident Analysis & Prevention*, 108, 184–193. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.09.004>
21. Ziakopoulos, A., & Yannis, G. (2020). A review of spatial approaches in road safety. *Accident Analysis & Prevention*, 135, 105323. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105323>
22. Kyriakidis, M., Happee, R., & de Winter, J. C. F. (2015). Public opinion on automated driving: Results of an international questionnaire among 5,000 respondents. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 32, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2015.04.014>
23. Kuutti, S., Fallah, S., Katsaros, K., Dianati, M., McCullough, F., & Mouzakitis, A. (2020). A survey of deep learning applications to autonomous vehicle control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(2), 712–733. <https://doi.org/10.1109/TITS.2019.2962338>
24. Rosique, F., Navarro, P. J., Fernández, C., & Padilla, A. (2019). A systematic review of perception system and simulators for autonomous vehicles research. *Sensors*, 19(3), 648. <https://doi.org/10.3390/s19030648>

КІБЕРСТІЙКІСТЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В ГАЛУЗІ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Корякін К. С., Добровольська Л. О.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Морський транспортний сектор відіграє життєво важливу роль у світовій економіці і включає судна, порти, операційні компанії і всю інфраструктуру, необхідну для перевезення товарів і пасажирів по водних шляхах. Окрім фінансових наслідків, збоїв в морських операціях можуть мати серйозні гуманітарні наслідки, особливо в регіонах, де судна є основним засобом зв'язку. Кібератака, яка торкається, наприклад, рятувального судна, може затримати реагування на надзвичайну ситуацію, потенційно призводячи до загибелі людей. Незважаючи на зростаючу інтеграцію інформаційних технологій (ІТ) та операційних технологій (ОТ) у морському секторі, впровадження кібербезпеки відстає порівняно з іншими галузями. Життєвий цикл суден, який зазвичай становить 25–30 років, неминуче уповільнює впровадження нових технологічних досягнень і, що важливіше, передових методів забезпечення безпеки [1].

Актуальність дослідження. Мореплавання, як і будь-яка інша велика сфера діяльності, розвивається паралельно з перебігом технічного прогресу: судна збільшуються, а кількість членів команди зменшується, оскільки дедалі більше процесів автоматизується, часи, коли судно, що знаходилося в морі, було фактично повністю відрізане від решти світу, давно в минулому. Багато судових бортових систем отримують оновлення під час плавання через Інтернет і екіпаж має вихід в Інтернет. Критично важлива портова інфраструктура стає все більш вразливою через швидку цифровізацію та інтеграцію ІТ-систем та систем операційних технологій [2]. Питання кібербезпеки об'єктів сфери морських перевезень стоять досить гостро. Кіберінциденти можуть негативно впливати не лише на імідж конкретного порту чи компанії, а й на імідж країни як держави-члена ІМО. Багато аналітиків, які спеціалізуються на безпеці морської індустрії, відзначають той факт, що компанії зайняті в морській сфері звикли бути частиною «практично невидимої» галузі, непомітної простому обивателю. Разом із зростаючою опорою на автоматизацію значно загострюється ризик зовнішнього втручання та зриву роботи ключових систем. Хакери можуть перешкодити управлінню судном або роботі навігаційних систем, відключити всі зовнішні комунікації судна або отримати конфіденційні дані. Питання актуальності кібербезпеки ще ускладнюється тим, що далеко не вся інформація про успішно проведені атаки набуває широкого розголосу, часто власники бізнесу можуть замовчувати її, побоюючись таких наслідків, як втрата іміджу, претензій з боку клієнтів та страхових компаній, початку розслідувань, які проводять сторонні організації та державними органами.

Постановка задачі. Морський сектор є життєво важливим компонентом світової економіки та відіграє головну роль у глобальному ланцюжку поставок. Його міжнародний характер виходить за межі державних кордонів, і будь-які порушення його діяльності можуть мати глобальні побічні наслідки, впливаючи на соціально-економічне благополуччя регіонів, держав і народів [3]. Зростання впровадження цифровізації в секторі насамперед підвищує ефективність, мінімізує витрати і максимізує вигоду, одночасно покращуючи безпеку, водночас створює новий ландшафт кіберзагроз. Метою даного дослідження є аналіз сучасних ключових систем морського транспорту, що стосуються кіберризиків. Ці елементи закладають основу для розуміння морських кіберризиків та необхідності структурованих підходів до моделювання загроз, які допоможуть у ефективному впровадженні оцінки кіберризиків, кіберстійкості та кібербезпеки, що є результатом дедалі гостріших викликів.

Основний матеріал. Сучасна морська галузь переживає значну трансформацію, зі

зростаючою залежністю від цифровізації, операційної інтеграції та автоматизації. Ця зміна зумовлена низкою факторів, включаючи необхідність задоволення соціальних, екологічних та стійких пріоритетів, а також потенціал для підвищення безпеки та ефективності, все для того, щоб зберегти ключову роль морської галузі у світовій торгівлі, транспорті та енергопостачанні, що робить її важливою частиною світової економіки [1,4,5]. Інновації морського сектора охоплюють широкий спектр підприємств, таких як суднопластво, порти, шельфова нафтогазова промисловість та інші суміжні морські галузі, що веде до подальшого розвитку суден із розширеними можливостями дистанційного управління, зв'язку та мережевої взаємодії [6]. В умовах геополітичної та економічної турбулентності від бізнесу потрібна швидкість і точність реакції, що, у свою чергу, прискорює перехід до більш нового та технологічного управління, який включає використання ІТ-технологій. Очевидно, що галузь морського транспорту адаптується до динаміки і переходить від традиційного судноводіння до концепції Smart Shipping. «Розумний» порт зможе покращити наявні логістичні умови за допомогою безпілотних (автономних) кранів та обладнання, а також полегшує комунікацію між користувачами порту. У разі нестачі робочої сили та невиходів на роботу водіїв транспортних засобів автоматичні транспортні засоби забезпечать безперервність виробництва. Автономні судна з дистанційним керуванням пропонують безперервність перевезень. При цьому операторам портів необхідно враховувати та синхронізувати між собою безліч факторів, пов'язаних з погодними умовами, наявною логістичною інфраструктурою, управлінням кількістю суден, що курсують, залученням зацікавлених компаній, якісним управлінням їх вантажем тощо.

Сучасний рівень розвитку техніки диктує підвищені вимоги до надійності та відмовостійкості. Важливим елементом, що забезпечує надійність роботи обладнання та підвищення його ресурсу, є система діагностики. До основних методів технічної діагностики можна віднести методи виміру параметрів стану, методи скорочення розмірності даних, методи прийняття діагностичних рішень. Особливістю сучасного етапу розвитку методів та засобів вимірювань є автоматизація процесів вимірювання параметрів за допомогою технології Інтернету речей (IoT), можливість зберігання на машинних носіях великої кількості результатів вимірювань (Big Data) внаслідок включення до складу вимірювальних систем вузлів з великим обчислювальним ресурсом та мережевими можливостями – промислових контролерів та комп'ютерів. Методи прийняття діагностичних рішень дозволяють створювати надійні і адекватні моделі складних технічних об'єктів, що діагностуються, і процесів за експериментальними даними, що володіють при цьому низькою надмірністю, високою ефективністю і здатністю адаптуватися до змін у зовнішньому і внутрішньому середовищах діагностованого об'єкта, що досягається навчанням. Ефективність такої стратегії в рази вища за рахунок швидких зворотних зв'язків та виключення випадкових суб'єктивних факторів. Специфічним для морської галузі є також те, що персонал, що приймає основні стратегічні управлінські рішення, знаходиться на березі. У ситуації фактичної відсутності детальної об'єктивної інформації про поточний стан судна загалом ці стратегічні рішення можуть бути не такі точні, як потрібно або навіть помилкові. Дистанційний контроль параметрів є необхідною умовою економічно ефективною, безаварійною та екологічно безпечною експлуатації сучасного транспортного судна.

Важливе місце у цій трансформації займають мережі далекого впливу з низьким енергоспоживанням (LPWAN), особливо системи з урахуванням LoRa. Вони визнані своєю здатністю підтримувати зв'язок великі відстані з низьким енергоспоживанням між розподіленими пристроями – особливо корисна функція у морському середовищі. Нещодавні розробки, такі як FLoRa [7] та FLoRa+ [8], представили нові підходи до безпечного оновлення прошивки бездротовою мережею, що поєднують формування променя з методами шифрування. Хоча ці системи спочатку створювалися для

великомасштабних наземних мереж IoT, їхня енергоефективність та відмовостійкість роблять їх перспективним варіантом для майбутнього використання в моніторингу судів та дистанційному управлінні - особливо в областях, де традиційні засоби зв'язку можуть виявитися недостатніми. Розповсюдження Інтернету речей (IoT) та його застосування в моніторингу дозволяє розгорнути інтелектуальні пристрої моніторингу для отримання даних про стан судна та вантажу в режимі реального часу, що вимагає швидкого та стійкого каналу зв'язку, тому зростає інтерес до мереж низькоорбітальних супутників (LEO), що складаються з сотень супутників на орбіті, утворюючи подібні до оптоволоконних, з меншою затримкою, включаючи зв'язок, мовлення, GPS та навігацію, системи раннього попередження, метеорологію [9]. Зі зростанням ролі мережі низькоорбітальних супутників (LEO satellite networks – LSNs) у комунікаційній інфраструктурі на перший план вийшли кілька проблем безпеки, які досі значною мірою ігнорувалися [10]. Однією з таких проблем є зростання кібератак на супутникові мережі, які завдадуть шкоди комунікаційній інфраструктурі та завдадуть значної шкоди постачальникам послуг, кінцевим користувачам та урядам.

Ці досягнення зробили революцію в морському секторі, забезпечивши безпрецедентний рівень зв'язку та операційної ефективності, а також принесли новий набір ризиків - особливо у сфері кібербезпеки. Оскільки судна та морські споруди все більше інтегруються з наземними системами через зростаючу залежність від сучасних технологій та цифрових систем у морських операціях, це приносить як переваги, так і збільшення кіберзагроз. Такі загрози можуть мати серйозні наслідки для безпеки та економічної стабільності [11].

Для аналізу інформації, що надходить, та прийняття обґрунтованих рішень судноводіями широко використовуються системи підтримки прийняття рішень (СППР), які інтегрують дані з різних джерел, включаючи навігаційні системи та датчики, оптимізуючи управління судном. СППР значно підвищують рівень безпеки на морі, дозволяючи керувати ризиками і підвищуючи обізнаність у середовищі, що змінюється. Сучасні СППР використовують таке обладнання як ECDIS, GPS, AIS та інструменти аналізу великих даних, що дозволяє отримувати своєчасну та актуальну інформацію для прийняття рішень. ECDIS (Електронна картографічна система відображення та інформації) служить основним навігаційним інструментом для сучасних суден, замінюючи традиційні паперові карти цифровими дисплеями та інтегруючи дані з безлічі датчиків. Незважаючи на свої переваги, ECDIS представляє собою ризики кібербезпеки, оскільки оновлення електронних карток часто виконуються через USB-накопичувачі, що потенційно робить систему вразливою для шкідливого програмного забезпечення. Системи ECDIS схильні до атак повторного відтворення, впровадження та модифікації, що дозволяє зловмисникам маніпулювати даними датчиків і ставити під загрозу цілісність навігації. AIS працює шляхом обміну статичною та динамічною інформацією про судно, такий як його назва, тип, тип корисного навантаження, положення, курс, швидкість та пункт призначення. Інтегровані системи AIS обмінюються даними з ECDIS, а автономні системи включають незалежні датчики GPS. AIS необхідний для запобігання зіткнень та підвищення ситуаційної обізнаності, але вразливий для заміни та маніпулювання даними, що може призвести до серйозних навігаційних небезпек. Системи GPS уразливі для перешкод та заміни сигналу, що може порушити навігацію [12].

Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень схильні до специфічних загроз, що атакують логіку штучного інтелекту, а не програмний код, таким як внесення спотворення в навчальну вибірку (Data Poisoning), щоб система приймала невірні рішення в майбутньому, подача на вхід системі даних з мікроскопічними змінами, (Adversarial Attacks), спроби відновити конфіденційні дані, на яких навчалася СППР, через аналіз відповідей системи (Інверсія моделі). СППР часто працюють у хмарі або пов'язані з критичними системами, що створює додаткові ризики [13, 14].

На рисунку 1 представлений рейтинг вразливих цифрових компонентів судна.

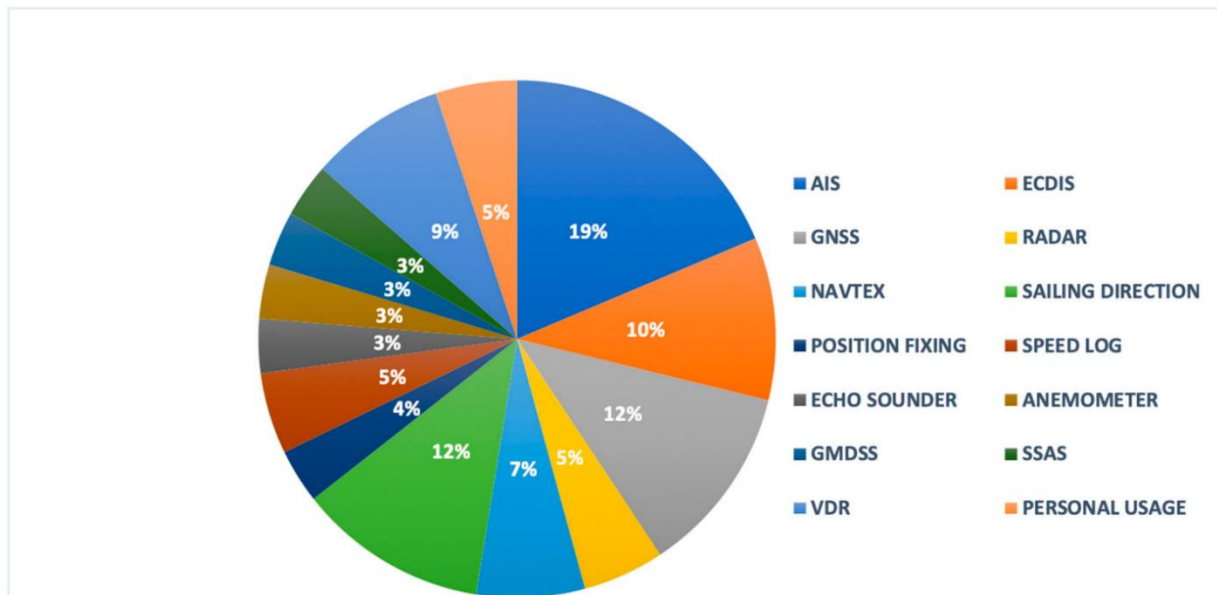


Рисунок 1 – Рейтинг вразливих цифрових компонентів судна [15].

Результати дослідження. Проведено оглядове дослідження інтелектуальних систем морської галузі. Визначено, що критично важливі суднові та портові системи, включаючи навігаційні, комунікаційні та операційні мережі, взаємозалежні та зростаюче використання автоматизації та автономних технологій уразливі для нових загроз. Завдяки впровадженню цифровізації більшість компонентів у портах і на судах використовують ІТ- або ОТ-системи у своїй основній діяльності для управління та моніторингу. Поширення та аналіз даних, зібраних із цих компонентів, формують рішення управління, які також враховують фізичні наслідки. Взаємозв'язок цих кіберфізичних систем додає додаткову складність будь-якій політиці кібербезпеки.

Висновки. У міру розвитку кіберзагроз морський сектор повинен постійно адаптуватися, інтегруючи передові системи безпеки для захисту критично важливих операцій як від традиційних, так і нових кіберризиків. Кібербезпека, стійкість та екологічність є найважливішими основами для підтримки ефективної та безпечної роботи морської галузі. Причини з яких морська кібербезпека все ще не повністю вивчена, включають брак даних, складність морських операцій, обмежену поінформованість і розуміння, нормативно-правову базу, відсутність стандартизації, недостатні інвестиції та брак кваліфікованих кадрів. Отримані результати наголошують на гострій необхідності посилення заходів кібербезпеки в навігаційних системах, операційних технологіях та процесах прийняття рішень людиною, тому що зростаюча залежність від взаємозалежних цифрових систем становить значні ризики у разі їхньої компрометації. Крім того, людський фактор, такий як помилки, недогляди та недостатня поінформованість у питаннях безпеки, може посилити успіх кібератак. Кібербезпека сьогодні зміщується від «захисту периметра» до концепції Zero Trust та кіберрезистентності обладнання, а стандартизація протоколів обміну даними стає обов'язковою умовою безпеки в умовах мультибрендових екосистем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ćelić, J., Vukšić, M., Baždarić, R., & Cuculić, A. (2025). The Challenges of Cyber Resilience in the Maritime Sector: Addressing the Weak Awareness of the Dangers Caused by Cyber Threats. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(4), 762. <https://doi.org/10.3390/jmse13040762>

2. Badea, M., Bucovetchi, O., Gheorghe, A. V., Hnatiuc, M., & Raicu, G. (2025). Maritime Industry Cybersecurity Threats in 2025: Advanced Persistent Threats (APTs), Hacktivism and Vulnerabilities. *Logistics*, 9(4), 178. <https://doi.org/10.3390/logistics9040178>
3. Kapalidis, C., Karamperidis, S., Watson, T., & Koligiannis, G. (2022). A Vulnerability Centric System of Systems Analysis on the Maritime Transportation Sector Most Valuable Assets: Recommendations for Port Facilities and Ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(10), 1486. <https://doi.org/10.3390/jmse10101486>
4. MacKinnon, S N, Weber R and Lundh, M. (2023) The rise of digitalisation and automation in the shipping industry and their impacts on training and system safety, *South African Journal of Maritime Education and Training*, Volume 2 Issue 1, p. 83-96 <https://doi.org/10.47348/SAJMET/2023/i1a6>
5. Kaštelan, N., Vidan, P., Assani, N., & Miličević, M. (2024). Digital Horizon: Assessing Current Status of Digitalization in Maritime Industry. *Transactions on Maritime Science*, 13(1). <https://doi.org/10.7225/toms.v13.n01.w13>
6. Alcaide, J.I.; Llave, R.G. (2020), Critical infrastructures cybersecurity and the maritime sector. *Transportation Research Procedia*, Volume 45, Pages 547-554, ISSN 2352-1465, <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.058>
7. Sun, Z., Ni, T., Yang, H., Liu, K., Zhang, Y., Gu, T., & Xu, W. (2023, May). FLoRa: Energy-efficient, reliable, and beamforming-assisted over-the-air firmware update in LoRa networks. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (pp. 14-26).
8. Zehua Sun, Tao Ni, Huanqi Yang, Kai Liu, Yu Zhang, Tao Gu, and Weitao Xu. 2024. FLoRa+: Energy-efficient, Reliable, Beamforming-assisted, and Secure Over-the-air Firmware Update in LoRa Networks. *ACM Trans. Sen. Netw.* 20, 3, Article 54 (May 2024), 28 pages. <https://doi.org/10.1145/3641548>
9. Iglesias-Sanuy, P., López-Ardao, J. C., Rodríguez-Pérez, M., Herrería-Alonso, S., Suárez-González, A., & Rodríguez-Rubio, R. F. (2022). An Efficient Location-Based Forwarding Strategy for Named Data Networking and LEO Satellite Communications. *Future Internet*, 14(10), 285. <https://doi.org/10.3390/fi14100285>
10. Hui Li, Dongcong Shi, Weizheng Wang, Dan Liao, Thippa Reddy Gadekallu, Keping Yu, (2022), Secure routing for LEO satellite network survivability, *Computer Networks*, Volume 211, 109011, ISSN 1389-1286, <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109011>
11. Adrianna Karas (2023). Maritime Industry Cybersecurity: A Review of Contemporary Threats, *European Research Studies Journal* Volume XXVI Issue 4, 921-930
12. Keskin, O. F., Lubja, K., Bahsi, H., & Tatar, U. (2025). Systematic Cyber Threat Modeling for Maritime Operations: Attack Trees for Shipboard Systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(4), 645. <https://doi.org/10.3390/jmse13040645>
13. Awan, M. S. K., & Al Ghamdi, M. A. (2019). Understanding the Vulnerabilities in Digital Components of an Integrated Bridge System (IBS). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 350. <https://doi.org/10.3390/jmse7100350>
14. Jha, P. K. (2025). Adversarial Machine Learning: Attacks, Defenses, and Open Challenges. *arXiv preprint arXiv:2502.05637*.
15. Awan, M. S. K., & Al Ghamdi, M. A. (2019). Understanding the Vulnerabilities in Digital Components of an Integrated Bridge System (IBS). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 350. <https://doi.org/10.3390/jmse7100350>

ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ПІДВОДНИМИ АВТОНОМНИМИ ДРОНАМИ

Ларін Д.Г.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Autonomous Underwater Vehicle (AUV) – це самохідний безпілотний підводний апарат, здатний виконувати задані місії в товщі води без фізичного зв'язку з поверхнею та без безпосереднього втручання оператора в режимі реального часу.

На відміну від звичайних автоматизованих систем, AUV є повноцінним роботом, який має власну енергетичну установку, систему керування та інтелектуальний алгоритмічний комплекс для прийняття рішень. Його рух базується на аналізі даних від бортових сенсорів, що дозволяє апарату адаптуватися до змін навколишнього середовища.

Справжня автономність AUV полягає в здатності реалізувати цикл «Сприйняття – Осмислення – Дія» (Sense – Think – Act) [1] без допомоги людини. Це стає критичним фактором через фізичну неможливість підтримки стабільного радіозв'язку під водою. Вода є непрозорою для електромагнітних хвиль високої частоти. GPS-сигнал доступний лише тоді, коли апарат спливає на поверхню. Радіосигнали низької частоти та гідроакустичний зв'язок має низьку пропускну здатність. Тому саме повністю автономне системи управління є найбільш перспективним напрямком дослідження підводної робототехніки.

В загальному випадку можна виділити три рівні автономності:

- програмна автономність, при цьому апарат слідує жорстко заданим точкам на певній глибині. Якщо виникає перешкода, він не знає, як її обійти;
- реактивна автономність – апарат здатний реагувати на зовнішні фактори (наприклад, уникати зіткнення зі скелею за допомогою сонара), але не змінює загальну мету місії;
- інтелектуальна (повна) автономність – здатність перепланувати місію. Наприклад, якщо апарат виявив витік нафтопроводу, він може самостійно вирішити припинити рух за маршрутом і почати детальне кругове сканування місця аварії.

Архітектура управління автономними підводними апаратами зазвичай будується за чотирьохрівневою схемою. На верхньому, стратегічному, рівні (загального виконання місії) працюють кінцеві автомати або дерева поведінки, які визначають пріоритети виконання місії, безпеки та енергозбереження.

На тактичному рівні (рівень навігації та планування шляху) будується зв'язок між абстрактними командами місії та конкретними сигналами двигунів. Він відповідає за те, яким саме маршрутом апарат дійде до цілі. Виконується перетворення набору точок маршруту, у плавну криву, яку апарат може фізично виконати. Відбувається динамічна зміна курсу при виявленні сонаром перешкоди руху. Вирішення задачі позиціонування на основі збирання даних від DVL (доплеровського реєстратора швидкості), компаса та глибиноміра. Для вирішення цих задач застосовуються алгоритми пошуку шляху (A-star, RRT)[2,3], потенційні поля, вектори гістограм (VFH)[4].

Наступний – виконавчий рівень (рівень регуляторів). Це найнижчий програмний рівень, який працює з «фізикою». Його задача – забезпечити стабільність апарата та точне слідування заданих швидкості чи куту. Вирішує задачі стабілізації, утримання глибини та курсу навіть при наявності підводної течії. Розраховує з якою швидкістю має обертатися кожен із двигунів, щоб апарат повернув у відповідному напрямку або занурився. Основними компонентами математичного апарату є динамічна модель апарата, закон керування та алгоритм розподілу тяги.

Динамічна модель апарата або модель Фоссена [5] для опису руху AUV у 6-DOF (шести ступенях вільності) використовує стандартне нелінійне рівняння у матричній

формі

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + g(\eta) = \tau + \tau_{dist}$$

Де складники означають наступне:

$v \in R^6$ – вектор швидкості (швидкість стрибка, коливання, підйому, крену, тангажу, ристання),

$\eta \in R^6$ – позначає положення та орієнтацію, відповідно землі,

$M = M_{rb} + M_a$ – матриця інерції. Включає масу жорсткого тіла (M_{rb}) та приєднані маси води (M_a), які «рухаються» разом з апаратом.

C – матриця сил Коріоліса та центробіжних сил (також включає компоненти приєднаних мас).

D – матриця гідродинамічного демпфування (опір води). Вона є нелінійною і зазвичай складається з лінійного та квадратичного опору.

$g(\eta)$ – вектор відновлювальних сил (сила тяжіння та сила Архімеда). Саме він визначає статичну остійність дрона.

τ – вектор керуючих сил та моментів, що створюються двигунами.

τ_{dist} – зовнішні збурення (підводні течії).

Задача закону керування – обчислити необхідний вектор τ , щоб мінімізувати помилку $e(t) = \eta_d - \eta$ (де η_d – бажаний стан).

Для кожної осі (курс, глибина, крен тощо) часто застосовується незалежний ПД-регулятор:

$$\tau(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt},$$

де K_p , K_i , K_d – відповідно коефіцієнти пропорційний, інтегральний, диференціальний.

Оскільки підводне середовище дуже мінливе, для AUV часто використовують ковзний режим (Sliding Mode Control) [6], який є стійким до невизначеностей моделі.

Головна ціль цього режиму, щоб не тільки помилка e прямувала до нуля, а й швидкість її зміни $\dot{e}$. Для цього вводиться поверхня ковзання (s):

$$s = \dot{e} + \lambda e$$

де $\lambda > 0$ – коефіцієнт, що визначає швидкість збіжності (нахил лінії ковзання). Коли система знаходиться «на поверхні» ($s = 0$), помилка гарантовано зменшується до нуля за експонентою.

Закон керування обирається так, щоб система «притягувалася» до цієї поверхні

$$\tau = \tau_{eq} - K * \text{sgn}(s)$$

де τ_{eq} – еквівалентне керування, що базується на моделі, а $\text{sgn}(s)$ – функція знаку, що забезпечує стійкість.

Ковзний режим є ідеальним для вертикального занурення та утримання позиції AUV, де зовнішні збурення від хвиль та течій є найбільш непередбачуваними.

Апаратний рівень (рівень драйверів та операційної системи) – це фундамент системи, де софт безпосередньо взаємодіє із залізом. На ньому забезпечується читання сигналів через відповідні інтерфейси (наприклад: UART, CAN, Ethernet), часова синхронізація. Операційна система реального часу (RTOS) гарантує, що критична команда на зупинку двигуна буде виконана за мілісекунди, незалежно від навантаження процесора.

Висновки. Перехід від телекерованих апаратів до автономних (AUV) став можливим завдяки розвитку бортових обчислювальних потужностей. Головною особливістю управління є здатність системи функціонувати в умовах інформаційного вакууму (відсутність GPS та стабільного радіозв'язку). Це вимагає від апарата не просто слідування програмі, а інтелектуального прийняття рішень на основі аналізу навколишнього середовища.

Розподіл системи управління на рівні (стратегічний, тактичний, виконавчий, апаратний) дозволяє ефективно керувати складністю. Верхні рівні (дерева поведінки) вирішують логічні задачі місії. Нижні рівні (регулятори та драйвери) забезпечують фізичне виконання рухів. Така архітектура дозволяє апарату гнучко реагувати на перешкоди, не втрачаючи загальної мети місії.

Найбільшою проблемою залишається накопичення похибки (дрейф) інерціальних систем навігації. Майбутнє автономної навігації лежить у площині вдосконалення алгоритмів одночасної локалізації та картування, використанні методів машинного навчання для компенсації гідроакустичних завад, впровадження групового управління для кооперативної навігації.

Успішне управління підводним автономним дроном – це баланс між складною фізикою середовища та інтелектуальними алгоритмами обробки даних. Розуміння кінематичних зв'язків та динамічних характеристик у поєднанні з робастними методами контролю дозволяє створювати надійні системи, здатні замінити людину в найнебезпечніших умовах океану.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dinh Quang Huy, Nicholas Sadjoli, Abu Bakr Azam et al. Object perception in underwater environments: a survey on sensors and sensing methodologies. *Ocean Engineering*, Volume 267, 1 January 2023, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113202>
2. Ali Arifi, Julien Lepagnot, Soufiene Bouallègue, Laetitia Jourdan. 3D Path Planning of Autonomous Underwater Vehicles Using a Rapidly-exploring Random Trees Algorithm. Conference: 2023 IEEE International Conference on Artificial Intelligence & Green Energy (ICAIGE), October 2023 DOI:10.1109/ICAIGE58321.2023.10346490
3. Rafał Kot, Piotr Szymak, Paweł Piskur, Krzysztof Naus. A-Star (A*) with Map Processing for the Global Path Planning of Autonomous Underwater and Surface Vehicles Operating in Large Areas// *Applied Sciences* 2024, 14(17), <https://doi.org/10.3390/app14178015>
4. Gengshi Zhang, Yonggang Zhang, Jian Xu et al. Intelligent Vector Field Histogram based collision avoidance method for AUV. *Ocean Engineering*. Volume 264, 15 November 2022, 112525 <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112525>
5. Thor I. Fossen and Ola-Erik Fjellstad. Nonlinear modelling of marine vehicles in 6 degrees of freedom.// *Mathematical Modelling of Systems* 1.1 (1995), pp. 17–27.
6. Yining Fu, Yong Hu, Dongliang Xiao, Song Xu. Sliding Mode Control of an Underwater Vehicle with Multi-Mode for Ultra-Long Tunnels. 2024 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). DOI: 10.1109/ICUS61736.2024.10839810

МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СКІНЧЕННИХ АВТОМАТІВ

Новікова Н.О., Манжулова Ю.С., Савчук Н.В.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. У сучасному інформаційному суспільстві питання захисту даних є надзвичайно актуальним. Більшість інформаційних систем використовує автентифікацію за допомогою паролів, тому їхня надійність безпосередньо впливає на рівень інформаційної безпеки.

Незважаючи на широке використання паролів, значна частина користувачів створює прості та передбачувані комбінації, які легко піддаються атакам. Це зумовлює необхідність розробки ефективних методів перевірки складності паролів.

Одним із перспективних підходів є використання детермінованих скінченних автоматів (DFA), які дозволяють формалізувати процес аналізу текстових рядків та забезпечити ефективну обробку даних за один прохід [1].

У даній роботі розглядається застосування DFA для аналізу складності паролів із використанням додаткових критеріїв безпеки.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена стрімким зростанням кількості кіберзагроз та витоків даних. Значна частина атак базується на підборі або використанні вже відомих паролів із відкритих баз даних.

Традиційні методи перевірки паролів, як правило, обмежуються простими правилами: мінімальна довжина, наявність цифр або спеціальних символів [2]. Однак такі підходи не враховують реальну стійкість пароля до атак [3].

Особливо важливим є врахування:

- ентропії пароля як кількісної оцінки його складності;
- наявності пароля у базах скомпрометованих даних;
- структури та логіки побудови рядка.

Таким чином, виникає необхідність створення комплексного підходу до оцінки складності паролів, який поєднує формальні методи та практичні аспекти безпеки [4].

Постановка задачі. Метою роботи є розробка програмної системи перевірки складності пароля на основі детермінованого скінченного автомата.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- дослідити теоретичні основи скінченних автоматів;
- проаналізувати сучасні методи перевірки паролів;
- розробити модель DFA для аналізу пароля;
- реалізувати програму мовою C++;
- впровадити обчислення ентропії;
- реалізувати перевірку за базами витоків;
- провести тестування системи.

Об'єктом дослідження є процес аналізу текстових рядків. Предметом дослідження є застосування детермінованого скінченного автомата для перевірки складності паролів.

Основний матеріал. Детермінований скінченний автомат формально визначається як п'ятірка:

$$A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, F),$$

де Q – множина станів, Σ – вхідний алфавіт, δ – функція переходів, q_0 – початковий стан, F – множина допустимих станів.

У межах даної роботи стан автомата представлено у вигляді структури, яка містить характеристики пароля. Такий підхід дозволяє поєднати теоретичну модель з практичною реалізацією [5].

Стан автомату змінюється детерміновано, тобто для кожного символу та поточного

стану існує єдиний можливий перехід. Це забезпечує передбачуваність роботи алгоритму та його відповідність теоретичній моделі DFA.

Аналіз пароля здійснюється посимвольно. Під час обробки кожного символу:

- визначається його тип (літера, цифра, спеціальний символ);
- оновлюється бітова маска стану;
- обчислюється довжина рядка;
- накопичується сума цифр;
- фіксуються додаткові параметри (наявність «0», пробілів тощо).

Використання бітових масок дозволяє ефективно зберігати інформацію про типи символів та швидко перевіряти виконання умов.

Важливою особливістю є те, що всі перевірки виконуються за один прохід по рядку, що забезпечує лінійну часову складність $O(n)$, де n – довжина пароля.

Крім базового аналізу, у роботі реалізовано:

- обчислення ентропії пароля для оцінки його стійкості;
- перевірку на наявність у базах скомпрометованих паролів;
- багаторівневу систему перевірки.

Багаторівнева система передбачає поступове ускладнення вимог до пароля. На кожному рівні перевіряються додаткові умови:

- мінімальна довжина;
- наявність різних типів символів;
- обмеження на суму цифр;
- перевірка парності;
- додаткові логічні умови.

Такий підхід дозволяє не лише оцінювати пароль, але й навчати користувача створювати більш надійні комбінації.

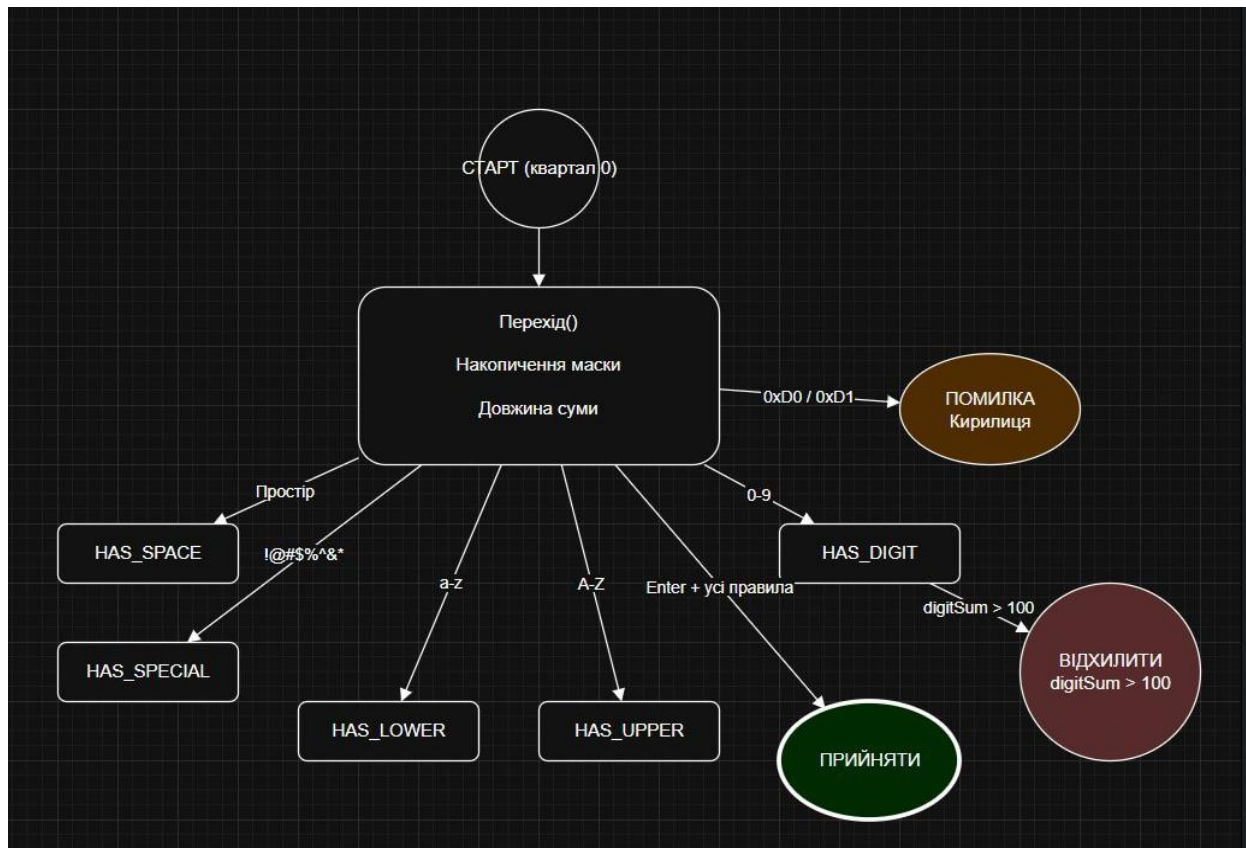


Рисунок 1 – Схема автомату

Результати досліджень. У результаті виконання роботи було розроблено програмну систему перевірки складності паролів.

Система забезпечує:

- аналіз пароля за допомогою DFA;
- обчислення ентропії;
- перевірку за базою витоків;
- багаторівневу оцінку складності.

Проведене тестування включало різні типи паролів (рис. 2):

- прості (короткі, без різних типів символів);
- середньої складності;
- складні (з великою ентропією).

```
Введіть пароль: 1234567890
[ ] Складність: 33.2 bits -> ● ЗНАЙДЕНО В БАЗІ ВИТОКІВ! Взлом миттєвий.
[ X ] Умова рівня 2 не виконана.
=====
--- УМОВИ ДЛЯ ПАРОЛЯ (Рівень 2) ---
[ ✓ ] 1. Довжина >= 5
[ ] 2. Велика літера
-----
Введіть пароль: qwerty
[ ] Складність: 28.2 bits -> ● ЗНАЙДЕНО В БАЗІ ВИТОКІВ! Взлом миттєвий.
[ X ] Умова рівня 2 не виконана.
=====
--- УМОВИ ДЛЯ ПАРОЛЯ (Рівень 2) ---
[ ✓ ] 1. Довжина >= 5
[ ] 2. Велика літера
-----
Введіть пароль: admin
[ ] Складність: 23.5 bits -> ● ЗНАЙДЕНО В БАЗІ ВИТОКІВ! Взлом миттєвий.
[ X ] Умова рівня 2 не виконана.
=====
--- УМОВИ ДЛЯ ПАРОЛЯ (Рівень 2) ---
[ ✓ ] 1. Довжина >= 5
[ ] 2. Велика літера
-----
Введіть пароль: |
```

Рисунок 2 – Тестування системи

Результати показали, що:

- слабкі паролі не проходять навіть базові рівні перевірки;
- складні паролі коректно оцінюються системою;
- паролі з баз витоків визначаються незалежно від їх формальної складності.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого підходу.

Висновки. У роботі досліджено використання детермінованого скінченного автомата для перевірки складності паролів.

Показано, що автоматний підхід дозволяє:

- ефективно аналізувати рядок за один прохід;
- поєднувати різні критерії оцінки;
- забезпечувати гнучкість і масштабованість системи.

Наукова новизна полягає у поєднанні автоматного підходу з оцінкою ентропії та перевіркою за базами витоків.

Практична значущість роботи полягає у можливості використання розробленої системи у навчальних цілях та як основи для створення реальних систем інформаційної безпеки.

Отримані результати підтверджують доцільність використання DFA для задач аналізу текстових даних та перевірки складності паролів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hopcroft J.E., Motwani R., Ullman J.D. Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation. Addison-Wesley, 2006. 535 p.
2. Bishop M. Computer Security: Art and Science. Addison-Wesley, 2003. 1383 p.
3. Grassi P. Digital Identity Guidelines: Authentication and Lifecycle Management. Paul Grassi. Electronic text data. CSRC, 2024. Regime of access: <https://csrc.nist.gov/pubs/sp/800/63/b/upd2/final>
4. Password Storage Cheat Sheet. Electronic text data. OWASP Cheat Sheet Series, 2026. Regime of access: https://cheatsheetseries.owasp.org/cheatsheets/Password_Storage_Cheat_Sheet.html
5. Aho A.V. The theory of parsing, translation, and compiling / A.V. Aho, J.D. Ullman: Prentice-Hall, NJ, 1972. – 2051 p.

ЗАСТОСУВАННЯ ЕВРИСТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ МОРСЬКИХ СУДЕН

Малаксіано М.О., Перстньов Д.І.
Одеський Національний Морський Університет
(Україна)

Вступ. Задачі оптимізації руху морських суден є складними комбінаторними задачами, що включають планування маршрутів, мінімізацію витрат часу та палива, а також врахування обмежень, пов'язаних із безпекою та зовнішніми умовами. Такі задачі можуть бути зведені до задач маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem, VRP), які є NP-складними та узагальнюють задачу комівояжера. У зв'язку з високою обчислювальною складністю класичних методів оптимізації, для їх розв'язання активно застосовуються евристичні та метаевристичні алгоритми. Сучасні задачі оптимізації руху суден характеризуються високим рівнем невизначеності, що обумовлено впливом випадкових факторів, таких як погодні умови, зміни у завантаженості портів, затримки обробки вантажів та інші зовнішні впливи. Це значно ускладнює процес прийняття оптимальних рішень і потребує застосування адаптивних алгоритмічних підходів. Розвиток інформаційних технологій, зокрема систем моніторингу суден (AIS), дозволяє отримувати великі обсяги даних у реальному часі. Це створює передумови для використання інтелектуальних алгоритмів оптимізації, які здатні оперативно реагувати на зміну умов функціонування транспортної системи.

Актуальність досліджень. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності функціонування морської транспортної інфраструктури в умовах зростання обсягів перевезень та динамічності середовища.

У реальних умовах задачі маршрутизації мають динамічний характер: нові замовлення з'являються під час виконання маршрутів, що потребує оперативної перебудови рішень у режимі реального часу. Це робить класичні детерміновані методи малоефективними. Евристичні алгоритми дозволяють знаходити наближено оптимальні рішення за прийнятний час, що робить їх ключовим інструментом у сучасних системах підтримки прийняття рішень у морському транспорті.

Важливим аспектом є також необхідність інтеграції алгоритмів оптимізації у сучасні інформаційні системи управління морським транспортом. Такі системи повинні забезпечувати не лише планування, але й адаптивне управління процесами перевезення. Особливу роль відіграє підвищення рівня автоматизації прийняття рішень, що дозволяє зменшити вплив людського фактору та підвищити точність прогнозування. Використання евристичних алгоритмів у цьому контексті дозволяє забезпечити баланс між швидкістю обчислень та якістю отриманих рішень.

Постановка задачі. Метою роботи є аналіз та порівняння евристичних алгоритмів, що застосовуються для оптимізації руху морських суден з метою визначення найбільш ефективних підходів. Для досягнення мети необхідно:

- проаналізувати задачі маршрутизації у морському транспорті;
- дослідити основні евристичні алгоритми;
- оцінити їх ефективність;
- визначити найбільш перспективні підходи.

У реальних умовах задача оптимізації є багатокритеріальною. Окрім мінімізації довжини маршруту або часу доставки, необхідно враховувати витрати палива, рівень ризику, пріоритетність замовлень та інші фактори. Також важливим є врахування обмежень, пов'язаних із характеристиками суден, такими як вантажопідйомність, швидкість руху та технічні параметри. У динамічних задачах додатково виникає необхідність оперативного перерахунку маршрутів при зміні умов.

Основний матеріал. Задачі оптимізації руху суден можуть бути представлені як варіації VRP, зокрема з урахуванням часових обмежень (VRPTW). Ці задачі є NP-складними, що обумовлює необхідність застосування евристичних методів. Основні групи алгоритмів:

- Жадібні алгоритми – характеризуються високою швидкістю, але часто дають локально оптимальні рішення.
- Генетичні алгоритми – базуються на принципах еволюції та забезпечують ефективний пошук у великих просторах рішень.
- Алгоритм мурашиних колоній (ACO) – імітує поведінку мурах при пошуку найкоротших маршрутів. Широко застосовується для задач маршрутизації та демонструє високу ефективність.
- Алгоритм рою частинок (PSO) – забезпечує швидку збіжність, але може застрягати у локальних мінімумах.
- Імітація відпалу (Simulated Annealing) – дозволяє уникати локальних мінімумів, але потребує ретельного налаштування.

Сучасні дослідження показують, що найбільш ефективними є гібридні алгоритми, які поєднують різні підходи. Наприклад, алгоритм множинних мурашиних колоній (MACS) поєднує глобальний пошук із локальною оптимізацією та дозволяє одночасно мінімізувати кількість суден і довжину маршруту. Задача маршрутизації транспортних засобів є узагальненням задачі комівояжера (Traveling Salesman Problem, TSP), яка є однією з класичних задач комбінаторної оптимізації. У задачі комівояжера необхідно знайти найкоротший маршрут, що проходить через усі задані точки рівно один раз із поверненням у початкову точку.

Формально задача комівояжера може бути представлена як задача мінімізації довжини маршруту:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

за умов, що кожна вершина відвідується рівно один раз.

Задача VRP є більш складною, оскільки передбачає використання кількох транспортних засобів, врахування обмежень на ресурси, часових вікон та інших факторів. Таким чином, задача оптимізації руху морських суден може розглядатися як розширена версія задачі комівояжера з додатковими обмеженнями. Оскільки задача комівояжера є NP-складною, її узагальнення у вигляді VRP також належить до класу обчислювально складних задач. Ефективність застосування евристичних алгоритмів значною мірою залежить від структури задачі та параметрів середовища. Для задач невеликої розмірності можуть бути достатні прості евристики, тоді як для складних динамічних систем необхідне використання метаевристичних або гібридних підходів.

Особливу увагу слід приділити питанням налаштування параметрів алгоритмів, оскільки їх ефективність значною мірою залежить від вибору коефіцієнтів, таких як швидкість випаровування феромонів у ACO або параметри мутації у генетичних алгоритмах. Крім того, важливим напрямом є комбінування алгоритмів з методами локального пошуку, що дозволяє значно підвищити якість отриманих рішень. Наприклад, використання операторів типу 2-opt або cross-exchange дозволяє покращити маршрути після їх первинного побудування.

Таблиця 1 – Порівняння алгоритмів

Алгоритм	Швидкість	Якість рішення	Адаптивність
Greedy	висока	низька	низька
GA	середня	висока	середня
ACO	середня	висока	висока
PSO	висока	середня	середня

SA	низька	середня	висока
Hybrid	середня	дуже висока	дуже висока

Результати досліджень. Проведений аналіз показав, що ефективність алгоритмів залежить від типу задачі та умов середовища. Жадібні алгоритми забезпечують швидкість, але мають низьку якість рішень. Алгоритми рою частинок та імітації відпалу демонструють середню ефективність. Генетичні алгоритми та алгоритми мурашиних колоній забезпечують високу якість рішень для складних задач маршрутизації. Найкращі результати демонструють гібридні алгоритми, які поєднують глобальний пошук і локальну оптимізацію. Використання гібридних алгоритмів дозволяє зменшити вплив локальних мінімумів та забезпечити більш стабільну якість рішень. Це особливо важливо для задач великої розмірності, де простір можливих рішень є надзвичайно великим.

У динамічних задачах важливим фактором є швидкість адаптації алгоритму до змін середовища. Алгоритми, які здатні швидко перебудовувати рішення, демонструють значно кращі результати у порівнянні зі статичними підходами.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що евристичні алгоритми є ефективним інструментом оптимізації руху морських суден. Найбільш ефективними є:

- генетичні алгоритми;
- алгоритми мурашиних колоній;
- гібридні алгоритми.

Гібридні підходи забезпечують найкращий баланс між швидкістю, якістю рішень та адаптивністю до змін середовища. Для практичного використання в інформаційних системах управління морською транспортною інфраструктурою доцільно застосовувати саме гібридні евристичні алгоритми. Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка адаптивних алгоритмів, які здатні автоматично змінювати свої параметри залежно від умов задачі. Це дозволить підвищити ефективність їх застосування у реальних інформаційних системах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дзундза В. С., Михальчук Г. Й. (2017). Програмна система розв’язання задач маршрутизації транспортних засобів. Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій, Т. 21, 52–59. <https://dx.doi.org/10.15421/43172101>
2. Yang Z., van Osta J.-P., van Veen B., van Krevelen R., van Klaveren R., Stam A., Kok J., Bäck T., Emmerich M. (2017). Dynamic vehicle routing with time windows in theory and practice. *Natural Computing*, 16, 119–134. <https://doi.org/10.1007/s11047-016-9550-9>
3. Афанасьєв, Д. В. (2023). Зменшення витрат у морських перевезеннях за допомогою штучного інтелекту. *Академічні візії*, (26). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15209187>
4. Pillac V., Gendreau M., Guéret C., Medaglia A. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.08.015>

УДК 004.8

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ ПРИ ПІДГОТОВЦІ СПЕЦІАЛІСТІВ МОРСЬКОЇ ГАЛУЗІ: ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

Панченко Т. Д., Тузова І. А.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Сьогодні трудно уявити будь яку сферу діяльності людини без використання штучного інтелекту (ШІ, англ. artificial intelligence, AI). У виробництві і економіці, освіті і охороні здоров'я, практично у кожній галузі ШІ вносить корективи у способи навчання, працю, людські взаємовідношення у світовому масштабі. Навіть, такі консервативні галузі, як морська, будівельна та інші не оминула ця технологічна революція.

Штучний інтелект стає все більш затребуваним інструментом у освітньої та наукової сферах. Його технології надають багато можливостей щодо персоналізації навчання, створення адаптивного, інтерактивного та інклюзивного освітнього середовища, розроблення навчальних матеріалів і цифрових ресурсів, автоматизованого оцінювання та здійснення зворотного зв'язку з здобувачами вищої освіти, прогнозування успішності й аналізу даних, надання додаткової підтримки за допомогою інтелектуальних репетиторів і віртуальних помічників, застосування віртуальної та доповненої реальності в освітньому процесі, що має позитивний вплив на якість отриманих знань.

Основна частина. Штучний інтелект у судноплаванні почав активно застосовуватись з 2019 року, коли було впроваджено автоматизоване стикування для круїзних суден, поромів та морських суден із використанням комп'ютерних систем для допомоги в навігації. Тому перед навчальними закладами вищої освіти в Україні було поставлено завдання впровадити в початковий процес використання новітніх технологій та ШІ для подальшого використання в практичній діяльності.

Морська індустрія використовує сучасні технології для вдосконалення та оптимізації морських операцій. Люди, які працюють і навчаються в цій галузі, повинні розуміти, як впровадження нових технологій змінює операції, щоб краще підготуватися до них і адаптуватися до них.

Використовуючи ШІ в морській галузі можна модернізувати практично кожен аспект морських операцій. Автоматизація кораблів ШІ дозволяє оптимізувати роботу суден та зменшити помилки, що викликані людським фактором, а навігаційні системи на базі ШІ підвищують точність та безпеку мореплавства. ШІ широко використовується за для раннього виявлення потенційних загроз та запобігання аваріям, що забезпечує безпеку мореплавства. В морській логістиці оптимізує вантажоперевезення та управління портами, революціонізує управління вантажопотоками та оптимізацію портових операцій. Ці технології дозволяють значно підвищити ефективність всього логістичного ланцюжка.

Широко використовується ШІ у вантажоперевезеннях та логістиці для вирішення задач оптимізації розміщення вантажів та максимально безпечного використання простору, автоматизує планування завантаження і розвантаження у портах. Допомагає прогнозувати оптимальні маршрути, аналізуючи велику кількість факторів, що впливають на час доставки, оптимізує витрати палива та інше [2].

Системи штучного інтелекту координують роботу портових механізмів, таких як крани, автоматизовані транспортні засоби та складське обладнання, мінімізуючи простой та затримки.

За допомогою ШІ здійснюється аналіз, оцінка та управління ризиками в логістиці.

Впровадження прогресивних освітніх підходів щодо опанування ШІ майбутніми

спеціалістами морської галузі сприяє зростанню рівня їхньої фахової компетентності.

Метою дослідження є аналіз можливостей використання штучного інтелекту в освітньому процесі закладів вищої освіти в умовах воєнного стану.

В освітньому процесі використання штучного інтелекту у теперішній час стає сучасною реальністю. Сьогодні Україна є членом Спеціального комітету із штучного інтелекту при Раді Європи і приєдналася до Організації економічного співробітництва і розвитку з питань штучного інтелекту (Organisation for Economic Co-operation and Development, Recommendation of the Council on Artificial Intelligence, OECD/LEGAL/0449). Постановою Кабміну № 1556-р., яку було затверджено у грудні 2020 року, схвалено «Концепцію розвитку штучного інтелекту в Україні», основна мета її полягає у визначенні пріоритетних напрямів і основних завдань розвитку технологій штучного інтелекту для задоволення прав та законних інтересів фізичних і юридичних осіб, побудови конкурентоспроможної національної економіки, вдосконалення системи публічного управління (Кабінет Міністрів України, 2020) [3].

Очікуваними результатами реалізації Концепції є: значне збільшення кількості кваліфікованих спеціалістів у галузі штучного інтелекту, в тому числі наукових та науково-педагогічних працівників [4].

У цьому документі визначено пріоритетні галузі розвитку технологій штучного інтелекту, де провідне місце займає «Освіта» і «Наука». Підготовка кваліфікованих кадрів є основним завданням освіти в розвитку штучного інтелекту.

Автори окреслили ризики, потенційні небезпеки та проблемні аспекти впровадження штучного інтелекту в освітній процес, які можуть призвести до зниження якості освіти, втрати контакту між учасниками освітнього процесу, зниження мотивації до навчання, порушенням академічної доброчесності, падінням інтересу до отримання знань, алгоритмічними помилками та некоректністю відповідей ШІ, низькою цифровою грамотністю, професійною неготовністю та відсутністю методичних компетенцій.

Незважаючи на всі потенційні можливості технологій ШІ для підвищення рівня якості освіти, штучний інтелект слід використовувати як помічника педагога, який залишається не тільки джерелом знань, а й консультантом, коучем, супервайзером, тьютором або модератором, значно впливаючи на розвиток особистісних і соціально важливих якостей, що дозволяють досягати видатних результатів. Для досягнення цієї мети бажано залучати провідних ІТ-фахівців щодо розроблення освітніх програм з опанування технологій штучного інтелекту.

Однак, його використання повинно бути відповідальним, етичним і обґрунтованим. Дотримання цих застережень допоможе уникнути потенційних проблем і забезпечити, щоб ШІ приносив користь і сприяв розвитку знань та інновацій.

Для студентів, особливо в умовах воєнного часу, використання штучного інтелекту може надавати ряд можливостей для покращення доступу до літературних джерел, пошуку інформації для наукових робіт, підготовки до іспитів, генерування ідей для курсових та кваліфікаційних робіт, отримання зворотного зв'язку з викладачами, допомогу у вивченні іноземних мов та ін.

Використання ШІ потребує дотримання етичних принципів та обережного підходу. Наведемо важливі застереження для здобувачів вищої освіти та навчально-педагогічних працівників:

1. Етичне використання:

– Плагіат. Потрібно виконувати етичні норми при використанні ШІ для створення текстових документів, творів або аналізу даних. Не потрібно привласнювати собі результати роботи ШІ, без відповідного посилання.

– Авторство. Щоб не виникало питань про авторство і доброчесність, потрібно завжди вказувати, яким чином було використано інструменти ШІ у своїх роботах.

2. Надійність даних:

- Перевірка результатів. Слід пам'ятати, що результати, отримані за допомогою ШІ, завжди слід перевіряти вручну. Іноді ШІ може надавати некоректну інформацію, робити помилки або пропонувати результати, які потребують додаткової перевірки.

- Якість даних. Для коректної роботи ШІ необхідно використовувати якісні та перевірені джерела даних, що застосовуються для навчання його моделей з метою уникнення викривлення та похибок у результатах.

3. Приватність і конфіденційність:

- Захист даних. Щоб уникнути порушень конфіденційності і прав на приватність, необхідною умовою є дотримання законів та правил, щодо захисту персональних даних.

- Анонімність. Якщо є можливість, необхідно працювати з конфіденційними даними, щоб уникнути ризиків порушення приватності.

4. Уникнення упереджень:

- Алгоритмічні упередження. Необхідно ретельно перевіряти навчальні дані, щоб уникнути помилок в алгоритмічних упередженнях. Намагайтеся створювати нейтральні і справедливі моделі.

- Соціальна відповідальність. Приділяйте увагу соціальним та етичним аспектам під час розробки та використання ШІ.

5. Залежність від технологій:

- Критичне мислення. Використовуйте ШІ тільки як допоміжний інструмент зберігаючи критичне мислення і об'єктивну оцінку ситуації.

- Розвиток навичок. Продовжуйте вдосконалювати свої навички та знання, щоб уникнути залежності від технологій.

6. Юридичні аспекти:

- Дотримання законів. Необхідно враховувати юридичні аспекти використання ШІ та дотримуватися усіх відповідних законів та регламентів з цього питання.

- Інтелектуальна власність. Порушення авторських прав та патентів під час використання ШІ неприпустимо. Згідно статті № 33 Закону про авторські та суміжні права (нова редакція закону прийнята в Україні у 2023 році) були внесені уточнення, пов'язані з поширенням штучного інтелекту. Нова стаття цього закону описує права на об'єкти, які згенеровані комп'ютерною програмою. Ці об'єкти називаються законом «неоригінальними».

7. Навчання та адаптація:

- Постійне навчання. З швидким розвитком ШІ, необхідно постійно оновлювати та удосконалювати свої знання стосовно нових технологій та їх етичного використання.

- Професійний розвиток. Підвищуйте кваліфікацію, щоб ефективно використовувати можливості ШІ у своїй практиці.

Окрім недоліків існують і багато переваг в використанні ШІ в освітньому процесі. Автори навели перелік переваг щодо використання ШІ в якому надано інформацію про можливості покращення навчального процесу та наукових досліджень.

Штучний інтелект для студентів:

1. Персоналізоване навчання. Системи ШІ можна використовувати для створення персональних навчальних планів, на основі аналізу здібностей і потреб студентів. Це надає можливість студентам навчатися у зручному режимі та приділяти більше уваги тим галузям знань, які цього потребують.

2. Віртуальні репетитори. Використання ШІ як віртуальних репетиторів, для допомоги студентам в розв'язуванні завдань, пояснень складних концепцій та отримання відповідей на питання цілодобово в режимі реального часу.

3. Підтримка під час підготовки до іспитів. За допомогою ІІІ можна створювати для кожного студента пакет навчальних матеріалів, завдань та тестів, що допоможе успішно підготуватися до контрольних заходів. Вони також можуть моніторити отримані результати та надавати оцінку та поради.

4. Автоматизація рутинних завдань. ІІІ може розвантажити студентів від рутинних завдань, сприяє вивільненню часу для глибокого вивчення дисциплін, що дозволяє студентам приділити більше уваги у засвоєнні матеріалу.

5. Доступ до навчальних матеріалів. За допомогою ІІІ студенти мають змогу швидко отримати доступ до необхідних навчальних матеріалів, таких як навчальні посібники, наукові статті, книги, відео та аудіо ресурси, на основі їхніх запитів.

Штучний інтелект для науково-педагогічних працівників:

1. Створення навчальних матеріалів та перевірка робіт студентів. За допомогою ІІІ можна швидко розробляти індивідуальні тести та завдання будь-якої складності, перевіряти отриманні результати, створювати презентації та медіа для проведення навчальних занять, аналізувати досягнення студентів з метою покращення якості їх навчання;

2. Проведення аналізу даних. ІІІ здатен швидко та точно аналізувати великі обсяги даних, виявляти закономірності і робити прогнози.

3. Літературний огляд. Інтелектуальні системи можуть автоматично проводити огляд наукової літератури, знаходити найважливіші та найактуальніші статті, економлячи час педагогів.

4. Сприяння співпраці. Платформи на основі ІІІ можуть з'єднувати науково-педагогічних працівників вищих навчальних закладів з різних країн, сприяючи співпраці та обміну знаннями.

5. Виявлення фальсифікацій та плагіату. Системи ІІІ можуть аналізувати наукові роботи та науково-методичні матеріали на наявність плагіату або фальсифікацій, забезпечуючи їх високу якість та етичність.

На сьогоднішній день, згідно з міжнародними статистичними даними 22% студентів і 24% викладачів постійно в своїй діяльності використовують штучний інтелект для навчання. «Освіта як інструмент формування особистої стійкості, соціального капіталу країни та культури миру», яке презентували в межах п'ятого Саміту перших леді та джентльменів. У дослідженні взяли участь респонденти з 14 країн світу: Фінляндії, Литви, Естонії, Данії, Австрії, Чехії, Великої Британії, Мексики, Туреччини, Південної Африки, ОАЕ, США, Японії, України.

Серед українських респондентів, яких опитали в межах міжнародного дослідження, 25% часто користуються штучним інтелектом, 58% епізодично, 14% – ніколи не користувалися.

Стосовно використання ІІІ студентами технічних спеціальностей морегосподарської галузі Одеського національного морського університету після проведення опитування виявилось, що для проходження тестування можливостями ІІІ користуються приблизно 60% здобувачів, для створення практичних та лабораторних робіт – 30%. Це говорить про те, що використання ІІІ стрімко набирає обертів і в подальшому тенденція буде тільки збільшуватись. Однак слід відмітити, що користуватися штучним інтелектом потрібно маючи глибокі знання в предметній області.

Висновки. Іntenсивна інтеграція інструментів ІІІ у науково-педагогічну діяльність детермінує необхідність ревізії фундаментальних засад освітнього процесу. Це вимагає модернізації методології навчання та верифікації результатів задля сталого розвитку якісних показників освіти.

Для активного впровадження ІІІ у підготовці спеціалістів для морської галузі пропонується ввести в навчальний процес освітні компоненти, які надають можливість

отримати знання і практичні навички використання штучного інтелекту в практичній діяльності. Такі знання та вміння значно підвищують ефективність судноплавства, логістики та інших напрямків морегосподарської галузі. Основні переваги ШІ включають оптимізацію навігаційних маршрутів, зниження витрат палива, підвищення надійності через постійний моніторинг обладнання та покращення управління портовими трафіками. Водночас існують ризики, пов'язані з вразливістю до кібератак, надмірною залежністю від автоматизованих систем та можливістю упередженості даних, що може призвести до помилкових рішень. Незважаючи на ці виклики, прогнозується, що ШІ продовжить трансформувати морську галузь [6].

Для того, щоб використання штучного інтелекту не порушувало академічну доброчесність, конфіденційність, анонімність персональних даних та авторське право мають бути розроблені та закріплені на законодавчому рівні чіткі правила користування ним у всіх сферах суспільного життя. Особливо це повинно бути впроваджено у сфері освіти, де використання штучного інтелекту не повинне заважати розвитку власних аналітичних здібностей, критичного мислення, креативності та активній розумовій діяльності. Учасники освітнього процесу повинні це розуміти та відноситися до його використання усвідомлено і відповідально.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhuravlova, Yuliia. (2024). AI in Logistics: How Does It Truly Transform The Field? Eliftech, Jan 11. AI in Logistics: Benefits and Use Cases (eliftech.com) [in English]
2. Штучний інтелект у морській галузі: комплексна трансформація від навігації до екології. БО «Морський Апостолят» Stella Maris <https://stellamaris.org.ua/shtuchnyj-intelekt-u-morskij-galuzi/>
3. Кабінет Міністрів України (2020) Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні (від 2 грудня 2020 р. № 1556-р) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text>
4. Кабінет Міністрів України (2021) Про затвердження плану заходів з реалізації Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні на 2021 – 2024 роки (від 12 травня 2021 р. № 438-р) <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/438-2021-%D1%80#Text>
5. Haurav, Roj. (2023). Zakhyst sudnoplavnykh shliakhiv za dopomohoiu shtuchnoho intelektu (AI). Securities.io, 27 lystopada. <https://www.securities.io/uk/securing-shipping-lanes-through-the-use-of-artificialintelligence-ai/> [in Ukrainian]
6. Як штучний інтелект змінює морську індустрію. Flagman Education <https://flagman.education/iak-shtuchnyj-intelekt-zminiuiе-morsku-industriiu/>

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖ У СИСТЕМАХ ПРОГРАМНО КЕРОВАНОГО РАДІО

Загребельний Є. О., Полікаровських О. І.
Одеський національний морський університет
(Україна)

У сучасних умовах розвитку радіоелектронних технологій та морського транспорту особливої актуальності набуває підвищення ефективності обробки радіосигналів у складних умовах експлуатації. Програмно-кероване радіо є однією з ключових технологій, що забезпечує гнучкість, адаптивність та масштабованість систем зв'язку морського призначення за рахунок перенесення обробки сигналів із апаратного рівня на програмний. Водночас специфічні умови морського середовища створюють додаткові виклики для традиційних алгоритмів цифрової обробки сигналів.

Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком морського транспорту, зростанням обсягів міжнародних перевезень та підвищенням вимог до безпеки судноплавства. Сучасні судна оснащуються великою кількістю радіоелектронних систем, зокрема навігаційних, зв'язку та радіолокаційних, ефективність яких безпосередньо залежить від якості обробки радіосигналів [1].

Особливістю морського середовища є наявність складних умов поширення сигналів, таких як багатопроменевість, відбиття від водної поверхні, атмосферні впливи, а також високий рівень радіоперешкод від інших суден і технічних систем. Це значно ускладнює застосування традиційних методів цифрової обробки сигналів, які часто базуються на спрощених математичних моделях.

У зв'язку з цим виникає необхідність впровадження інтелектуальних методів обробки сигналів, здатних адаптуватися до змінних умов середовища. Нейронні мережі є одним із найбільш перспективних підходів, оскільки вони дозволяють автоматично виявляти складні залежності у даних, забезпечують високу точність обробки та можуть ефективно функціонувати навіть при низькому співвідношенні сигналу та шуму.

Крім того, розвиток технологій програмно-керованого радіо створює передумови для інтеграції нейромережових алгоритмів безпосередньо в бортові системи суден. Це дозволяє реалізувати адаптивні та інтелектуальні радіосистеми, здатні працювати в реальному часі в умовах обмежених обчислювальних ресурсів[2].

Таким чином, дослідження застосування нейронних мереж у системах програмно-керованого радіо в морському транспорті є актуальним науково-практичним завданням, спрямованим на підвищення надійності, ефективності та безпеки сучасних судових систем зв'язку.

Метою є дослідження можливостей застосування нейронних мереж у системах програмно-керованого радіо морського призначення з метою підвищення ефективності обробки радіосигналів у складних умовах експлуатації. Об'єктом дослідження є процеси обробки радіосигналів у системах програмно-керованого радіо морського призначення. Предметом дослідження є методи та алгоритми обробки радіосигналів із використанням нейронних мереж.

Для досягнення поставленої мети необхідно провести комплексне дослідження, яке включає аналіз особливостей функціонування систем програмно-керованого радіо в умовах морського середовища, зокрема вплив багатопроменевого поширення сигналів, шумів та інтерференції. Важливим етапом є вивчення можливостей застосування сучасних нейромережових моделей для обробки радіосигналів, таких як класифікація, виявлення, демодуляція та оцінка параметрів сигналів. Окрім цього, слід визначити основні переваги нейромереж у порівнянні з класичними методами цифрової обробки сигналів, з урахуванням специфіки морських систем зв'язку. Необхідно також оцінити обмеження використання нейромереж, зокрема обчислювальну складність, потребу у навчальних

даних та труднощі реалізації в реальному часі на бортових системах[3]. Також слід сформувати практичні рекомендації щодо впровадження нейромереж у системи програмно-керованого радіо, враховуючи обмежені ресурси та особливості морського транспорту.



Рисунок 1 – Актуальність та проблеми використання нейромережевих SDR на морському транспорті

У сучасних умовах перспективним напрямом є використання нейронних мереж, які здатні автоматично навчатися на основі необроблених даних та ефективно працювати в складних і невизначених умовах морського середовища. Нейромережі дозволяють підвищити точність, швидкодію та адаптивність систем програмно визначеного радіо.

Ефективність систем програмно-керованого радіо із використанням нейромереж у морському транспорті визначається сукупністю ключових показників, серед яких важливе місце займають точність класифікації та ідентифікації сигналів, швидкодія обробки в реальному часі, стійкість до шумів, завад і багатопробеневого поширення, здатність адаптуватися до змін параметрів морського радіоканалу, а також енергоефективність обчислень бортових систем.

Основні напрями застосування нейромереж у системах програмно-керованого радіо в морському транспорті охоплюють широкий спектр задач, зокрема автоматичну класифікацію сигналів і модуляцій у судових системах зв'язку, виявлення слабких сигналів у складних умовах морського середовища, придушення завад та інтерференції від інших суден і технічних систем, демодуляцію та декодування сигналів без необхідності точного знання параметрів каналу, оцінку параметрів сигналу для навігаційних і радіолокаційних систем, а також виявлення аномалій у радіоспектрі з метою підвищення безпеки мореплавства[4].

Незважаючи на значні переваги використання нейронних мереж у системах програмно-керованого радіо, їх впровадження в морському транспорті супроводжується рядом суттєвих проблем і обмежень. Однією з основних є висока обчислювальна складність нейромережевих моделей, особливо глибоких архітектур, що ускладнює їх використання в бортових системах суден із обмеженими ресурсами. Це вимагає застосування спеціалізованих апаратних засобів або оптимізації моделей, що, у свою чергу, може впливати на точність та швидкодію.

Ще однією важливою проблемою є потреба у великих обсягах якісних навчальних даних. Для ефективного навчання нейромереж необхідні репрезентативні вибірки, які враховують різноманітні умови морського середовища, включаючи різні рівні шумів, типи

сигналів, погодні умови та характеристики каналів зв'язку. Отримання таких даних у реальних умовах є складним і ресурсомістким процесом.

Суттєвим обмеженням є також складність забезпечення стабільної роботи нейромереж у реальному часі. У морських системах зв'язку та навігації затримки обробки можуть критично впливати на безпеку, тому навіть незначні відхилення в продуктивності можуть призводити до небажаних наслідків. Крім того, нейромережеві моделі можуть бути чутливими до змін середовища, що призводить до зниження точності при появі нових або нетипових умов, які не були враховані під час навчання[5].

Також варто враховувати проблему інтерпретованості нейромережевих рішень. На відміну від класичних алгоритмів, результати роботи нейромереж часто є складними для пояснення, що ускладнює їх використання в критично важливих системах, де необхідна висока ступінь довіри та можливість аналізу прийнятих рішень[6].

Додатковим фактором є енергоспоживання нейромережевих алгоритмів, що має особливе значення для автономних або енергообмежених систем на борту суден. Підвищене енергоспоживання може обмежувати тривалість роботи обладнання та вимагати додаткових ресурсів.

Таким чином, основними викликами при впровадженні нейромереж у системи програмно-керованого радіо морського призначення є забезпечення балансу між точністю, швидкістю, енергоефективністю та надійністю роботи в умовах реального часу, а також адаптація моделей до змінних умов експлуатації.

Інтеграція нейромереж у системи програмно визначеного радіо в морському транспорті є перспективним напрямом розвитку інтелектуальних суднових систем зв'язку. Використання методів глибокого навчання дозволяє підвищити ефективність обробки сигналів, забезпечити адаптивність і надійність роботи в складних умовах. Подальші дослідження мають бути спрямовані на оптимізацію моделей та їх впровадження у системи реального часу з обмеженими ресурсами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ke, Z., & Vikalo, H. (2020). Real-time radio technology and modulation classification via an LSTM auto-encoder.
2. Khalid, U., Karim, M. N., & Rahnavard, N. (2022). RF signal transformation and classification using deep neural networks.
3. Soltani, S., Sagduyu, Y. E., Hasan, R., Davaslioglu, K., Deng, H., & Erpek, T. (2019). Real-time and embedded deep learning on FPGA for RF signal classification.
4. Stebel, J., Krumnikl, M., Moravec, P., Olivka, P., & Seidl, D. (2016). Neural network classification of SDR signal modulation. In *Computer Information Systems and Industrial Management*.
5. Xin, Y., Mu, J., Jing, X., & Liu, W. (2026). Radio frequency signal recognition of unmanned aerial vehicle based on complex-valued convolutional neural network. *Sensors*, 26(2), Article 620.
6. Yahya, Z. Z., & Ali, D. M. (2024). Software defined radio (SDR) signals classification via convolutional neural networks. *International Journal of Microwave and Optical Technology*.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ У МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

Коновалов С.М.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Сучасний розвиток морського транспорту характеризується зростанням обсягів перевезень, ускладненням логістичних процесів та підвищенням вимог до безпеки судноплавства. В умовах цифровізації економіки важливу роль відіграють інформаційні технології (ІТ) та автоматизовані системи управління, які забезпечують ефективність, надійність і безпеку функціонування морських транспортних систем.

Інтеграція ІТ у морську галузь охоплює системи навігації, управління суднами, моніторинг технічного стану обладнання, а також інформаційно-аналітичні системи підтримки прийняття рішень [1].

Актуальність. Актуальність дослідження обумовлена такими факторами:

- зростанням обсягів морських перевезень та необхідністю їх оптимізації;
- підвищенням вимог до екологічної безпеки;
- необхідністю мінімізації людського фактору;
- розвитком концепцій «розумного судна» (Smart Ship) та «розумного порту» (Smart Port) [2].

Крім того, сучасні виклики, пов'язані з кібербезпекою та енергозбереженням, потребують впровадження інтелектуальних систем управління, що базуються на технологіях штучного інтелекту та великих даних, а також дотримання міжнародних рекомендацій з управління кіберризиками у морській галузі [3].

Постановка задачі. Метою дослідження є розробка підходів до підвищення ефективності функціонування морського транспорту шляхом впровадження інформаційних технологій та автоматизації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати сучасні ІТ-рішення у морській галузі;
- дослідити методи автоматизації процесів управління судном;
- розробити математичну модель оцінки ефективності автоматизованих систем;
- оцінити вплив автоматизації на безпеку та економічність перевезень.

Основний матеріал. Інформаційні технології у морському транспорті охоплюють широкий спектр апаратно-програмних засобів, що забезпечують автоматизацію управління судном, підвищення безпеки судноплавства та оптимізацію експлуатаційних процесів [1]. До основних з них належать:

- системи автоматичної ідентифікації (AIS), які забезпечують обмін навігаційною інформацією між суднами та береговими станціями в реальному часі. Використання AIS дозволяє визначати координати, курс, швидкість судна та інші параметри руху, що суттєво знижує ризик зіткнень і підвищує рівень ситуаційної обізнаності екіпажу [4];
- електронні картографічні навігаційні системи (ECDIS), які є ключовим елементом сучасної навігації. Вони забезпечують відображення електронних навігаційних карт, автоматичне прокладання маршрутів, контроль відхилень від курсу та інтеграцію з іншими навігаційними системами, що значно підвищує точність судноводіння [1];
- системи управління енергоспоживанням, що дозволяють здійснювати моніторинг і оптимізацію використання енергетичних ресурсів судна, забезпечуючи зниження витрат палива та скорочення шкідливих викидів [2];
- системи моніторингу технічного стану судна, які базуються на використанні датчиків і аналітичних алгоритмів та дозволяють здійснювати прогнозування відмов обладнання і своєчасне технічне обслуговування [5];
- системи підтримки прийняття рішень (DSS), що використовують методи аналізу

даних і штучного інтелекту для обробки навігаційної та експлуатаційної інформації, забезпечуючи вибір оптимальних режимів роботи судна [5];

– інтегровані місткові системи (IBS), які об'єднують різні навігаційні підсистеми в єдине інформаційне середовище та сприяють підвищенню ефективності управління судном [1];

– системи кібербезпеки морського транспорту, що забезпечують захист інформаційних ресурсів судна від кібератак і несанкціонованого доступу відповідно до міжнародних рекомендацій [3].

Таким чином, комплексне використання сучасних інформаційних технологій дозволяє не лише підвищити ефективність експлуатації суден, але й створює основу для розвитку автономного судноплавства [2].

Математична модель ефективності. Ефективність автоматизованої системи управління можна оцінити за допомогою інтегрального показника:

$$E = \alpha P + \beta S + \gamma C, \quad (1)$$

де:

P – продуктивність системи;

S – рівень безпеки;

C – економічна ефективність;

α, β, γ – вагові коефіцієнти [5].

У таблиці 1 наочно показано порівняння традиційної системи з автоматизованою по ключовим параметрам ефективності.

Таблиця 1 – Порівняння традиційних та автоматизованих систем

Параметр	Традиційна система	Автоматизована система
Точність навігації	Середня	Висока
Людський фактор	Високий	Мінімізований
Енергоспоживання	Високе	Оптимізоване
Безпека	Середня	Висока

На рисунку 1 показано базову схематичну структуру автоматизованої системи управління судном.



Рисунок 1 – Структура автоматизованої системи управління судном

Використання технологій штучного інтелекту дозволяє прогнозувати технічні несправності, що знижує ризик аварій [4].

Результати досліджень. У результаті проведених досліджень встановлено:

- впровадження автоматизованих систем дозволяє підвищити ефективність управління на 20–30 %;
- рівень аварійності знижується на 15–25 %;
- оптимізація маршрутів дозволяє зменшити витрати палива до 10 %.

Запропонована модель оцінки ефективності дозволяє комплексно враховувати ключові параметри функціонування морського транспорту.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що інформаційні технології відіграють визначальну роль у розвитку сучасного морського транспорту, забезпечуючи підвищення ефективності, безпеки та економічності перевезень. Впровадження автоматизованих систем управління дозволяє суттєво знизити вплив людського фактору, підвищити точність навігації та оптимізувати використання ресурсів, зокрема палива та енергетичних потужностей суден.

Застосування математичних моделей оцінки ефективності автоматизованих систем забезпечує можливість комплексного аналізу їх функціонування з урахуванням ключових параметрів, таких як продуктивність, рівень безпеки та економічна доцільність. Отримані результати свідчать про значний потенціал автоматизації, що проявляється у зниженні аварійності, підвищенні ефективності управління та скороченні експлуатаційних витрат.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розвитком інтелектуальних систем управління на основі технологій штучного інтелекту, впровадженням цифрових двійників суден, а також забезпеченням належного рівня кібербезпеки в умовах зростаючої цифровізації морської галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Stopford, M. *Maritime Economics*. 3rd ed. London: Routledge, 2009. 840 p.
2. UNCTAD. *Review of Maritime Transport 2023*. Geneva: United Nations, 2023. 168 p.
3. IMO. *Guidelines on Maritime Cyber Risk Management*. London: International Maritime Organization, 2021. 48 p.
4. Balmat, J.-F., Lafont, F., Maifret, R., Pessel, N. A Decision-Making System to Maritime Risk Assessment. *Ocean Engineering*. 2011. Vol. 38, Issue 1. P. 171–176.
5. Zhang, Y., Qiu, M. Power Modeling of Computer Systems: Techniques and Tools. *Journal of Systems Architecture*. 2012. Vol. 58, Issue 10. P. 567–580.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОЇ ПІДТРИМКИ ПІДВОДНИХ РОБІТ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДДАЛЕНОЇ ПРИСУТНОСТІ

Нікітюк П. В., Дехта В. Ю., Пуляєв І. О.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Підводні занурення пов'язані зі значними проблемами безпеки через екстремальні підводні умови. Водолazi стикаються з такими ризиками, як декомпресійна хвороба, азотний наркоз та несправності обладнання, що потребує суворих протоколів безпеки та поглибленої підготовки для їх запобігання. Безперервний моніторинг та технічне обслуговування систем життєзабезпечення необхідні забезпечення благополуччя дайверів під час тривалих підводних операцій. Нові технології революціонізують способи проведення підводних робіт інтегруючи концепції автономних підводних апаратів та Інтернету речей (IoT) для подальшого розширення можливостей підводних операцій, забезпечуючи більш високу надійність обладнання, його універсальність та підвищуючи безпеку робіт під водою [1].

Актуальність дослідження. Постійне пошкодження підводних споруд та підводної частини суден робить підтримку ефективного функціонування цих об'єктів дорогим та складним завданням. В даний час кількість морських і підводних установок, що використовуються у всьому світі, зростає, тому зростає потреба в пошуку максимально ефективних і надійних підходів до інспекції. Традиційні методи інспекції за участю водолазів недостатні за глибиною, безпекою та масштабом. У дослідженні розглянуто існуючі проблеми підводної інспекції та обговорено переваги та недоліки дистанційно керованих підводних апаратів (ROV), автономних підводних апаратів (AUV) та напівавтономних ROV у різних умовах інспекції [2].

Постановка задачі. Мінімізація людського фактора в портовій та морській сфері сьогодні переходить із розряду «побажань» до технічного стандарту. Це продиктовано як вимогами безпеки, так і економічною ефективністю, дозволяючи знизити аварійність (до 80% випадків), підвищити точність оцінки ризиків та дотримуватися норм охорони (ISPS Code). Впровадження автоматизованих систем та дистанційного контролю забезпечує безпеку персоналу у небезпечних зонах та прискорює портові операції [3]. У цьому дослідженні аналізуються сучасні компоненти та потреби у глибоководних технологіях та устаткуванні, а також розглядається їхній поточний стан та тенденції розвитку.

Основний матеріал. Для ідентифікації потенційних пошкоджень підводної частини корпусу судна та оцінки стану різних портових споруд необхідно виконувати підводні інспекції, які зазвичай проводять водолазами. Дайвери візуально визначають потенційні пошкодження, що проводять збір матеріалів для оцінки стану підводного об'єкта. Усі початкові методи обмежені поганою видимістю, обмеженою витривалістю водолазів та великими ризиками безпеки. Розробка дистанційно керованих підводних апаратів (ROV) внесла істотні зміни та призвела до збільшення глибини та часу інспекційних спостережень за рахунок меншої участі людини. Незважаючи на вдосконалення ROV, вони обмежені проблемою прив'язування та необхідністю кваліфікованих операторів [4]. Через недосконалість допоміжного обладнання, наприклад, гідролокаторів, підводних систем, маніпуляторів і камер, що використовують обладнання з дистанційно керованим підводним обладнанням дані одержувані в результаті інспекцій не завжди коректні і необхідні повторені дослідження з різними ракурсами, наприклад, паль причалу, детальної перевіркою всіх підводних поверхонь носові пристрої, що підрулюють.

Сучасні методи, зумовлені зростаючою автоматизацією, включають застосування

передових методів гідролокаційної візуалізації, оптичних сенсорних модулів і вбудованих методів злиття даних, що значно підвищує точність і глибину підводних перевірок [5]. Сучасні методи, обумовлені зростаючою автоматизацією, включають застосування передових методів гідролокаційної візуалізації, оптичних сенсорних модулів і вбудованих методів злиття даних, що значно підвищує точність і глибину підводних перевірок. Крім того, активне впровадження інноваційних технологій, машинного навчання (ML), штучного інтелекту (ШІ) та аналітики у реальному часі змінило процес інспекцій. Нові покоління роботизованих платформ мають високоточні датчики і бортові обчислювальні потужності, що дозволяє безперешкодно виявляти аномалії, оцінювати дефекти і виконувати ремонтні роботи. Такий перехід полегшує перехід від реактивних методів технічного обслуговування до проактивних та прогностичних підходів до управління інфраструктурою.

Незважаючи на значні інновації, досягнуті в галузі підводної інспекції, як і раніше, існує досить багато проблем, що перешкоджають ідеальній роботі. Підводне середовище зазвичай характеризується сильно каламутною водою з дуже поганою видимістю, що робить роботу неточною датчиків. Перешкодами в керуванні навігацією є автономна навігація та точна локалізація в течіях та на нерівному морському дні. Складності інспекції, з одного боку, пов'язані з деградацією датчиків через біологічне обростання та корозію, а також з обсягами даних, що генеруються, які в багатьох випадках перевищують можливості бортової обробки. Крім того, завдання інтеграції широкого спектру платформ та технологій у єдину систему є одночасно технічною та логістичною [6].

Підводні апарати, що дистанційно керуються, – це дистанційно кероване судно, що працює під водою і пілотоване пунктом управління, зазвичай розташованим на плавучому судні або морській платформі. Ці апарати з'єднані з операторами через кабельний трос, який дозволяє здійснювати передачу команд управління у реальному часі та відеозворотний зв'язок. Трос не тільки забезпечує живлення ROV, але і є механічним з'єднанням, яке може бути використане для підймання апарата у разі потреби. Такі системи широко використовуються у підводному/підводному секторах для виконання таких робіт, як інспекція, технічне обслуговування та збирання даних в інших небезпечних або недоступних середовищах для водолазів [7].

Автономні підводні апарати (AUVs) схожі на дистанційно керований підводний апарат, за винятком того, що людина-оператор не бере активної та постійної участі після розгортання пристрою. Апарати рухаються маршрутом заздалегідь визначених планів місій і мають гнучкість, що дозволяє їм самостійно проводити інспекцію чи збір даних. Такі пристрої також оснащені бортовим інтелектом, датчиками та руховою установкою для виконання різних операцій, включаючи картування морського дна, інспекцію інфраструктури та моніторинг довкілля. Особливо корисними, коли проводяться тривалі місії та операції, в регіонах з обмеженим доступом або на важкопрохідній місцевості, оскільки, на відміну від своїх наземних аналогів, вони не піддаються зовнішньому контролю. Завдяки прогресу в технологіях, автономні підводні апарати оснащуються штучним інтелектом та алгоритмами машинного навчання, щоб приймати більш виважені рішення у динамічній підводній обстановці [8].

Дистанційно керовані підводні апарати та автономні підводні апарати зазвичай оснащені різними бортовими датчиками під час обстеження підводної інфраструктури; їх мета – збір інформації про навколишнє середовище та конструкцію. Ці датчики використовують різні галузі технологій візуалізації та вимірювання для оцінки стану підводних об'єктів. Більшість таких систем створюють двовимірні (2D) або тривимірні (3D) просторово-часові дані, які корисні для створення докладних візуалізацій конструкцій, що обстежуються, і навколишнього середовища. Розробка технологій дистанційної присутності (дистанційного моніторингу, управління та інспекції) для підводної розвідки та відновлення морської інфраструктури дозволить спростити операції

на відстані та, таким чином, відповідатиме реальності тривалих періодів між сприятливими погодними умовами для доступу на місце. Технології дистанційної присутності застосовуються до всіх класів підводних роботів, включаючи міні-ROV, спостережні ROV та повнорозмірні робочі ROV, що використовуються для операцій з інспекції та ремонту [9].

Віддалена або дистанційна присутність – активний напрямок досліджень у співтоваристві підводної робототехніки. Наприклад, MarineLab – підводна лабораторія (Фонд розвитку морських ресурсів) є найбільш довго працюючим у світі підводним дослідницьким центром. Дослідники з цієї лабораторії розробили метод управління міні-ROV VideoRay через Інтернет та проведено демонстрації в реальному часі управління віддаленими установками VideoRay, розташованими по всьому світу [10]. У більшості випадків підхід до дистанційної телеприсутності ґрунтується на використанні будь-яких програм для спільного використання робочого столу. Основний недолік цього підходу - це неминуча затримка, що виникає в контурі управління через використання програми спільного використання робочого столу. Однак існує підхід, заснований на новій архітектурі управління та апаратної конструкції, завдяки чому менша кількість етапів перетворення сигналів від команд пілота підводного апарату до сигналів управління двигунами забезпечує мінімальний обмін даними через Інтернет та мінімальну затримку.

У Центрі досліджень мобільної та морської робототехніки (MMRRC) при Університеті Лімерика, Ірландія розроблено комплекс інтелектуальних технологій OceanRINGS для підводних операцій, який включає передові рішення управління для всього спектру підводних апаратів і забезпечує універсальне робоче середовище для підводних операцій з використанням нормалізованого простору управління [11].

Повний набір інтелектуальних технологій, реалізованих усередині OceanRINGS, включає наступне:

- Покращений інтерфейс користувача (інтуїтивне зрозумілі 2D і 3D дисплеї, що забезпечують кращу візуалізацію та ситуаційну обізнаність);
- Широкий спектр пристроїв введення (джойстик, геймпад, миша, сенсорний екран, мікрофон, KINECT);
- Надійний контролер швидкості/курсу з незалежним керуванням напрямком;
- Вищий рівень автоматизації (автоматична компенсація океанських течій та ефектів опору кабелю);
- Розширені режими керування (що дозволяють пілотам ROV із середнім рівнем навичок досягати виняткових результатів);
- Високоточне динамічне позиціонування (ДП) ROV в абсолютній системі координат або щодо судна (що забезпечує підвищену безпеку у складних морських умовах на критичних етапах розгортання та підйому);
- Поліпшений зв'язок ROV-судно (проста синхронізація рухів ROV та судна);
- Вбудована стійкість до відмов підрулюючого пристрою (оптимальне керування).
- Набір допоміжних засобів для пілота з використанням звуку:
 - Голосові команди (пілот генерує команди через мікрофон);
 - Звукова навігація (комп'ютер надає голосові інструкції через динаміки, щоб допомогти пілоту досягти мети);
 - Керування у реальному часі з віддаленого командного центру через віддалену присутність (Ethernet/Інтернет).

Блок-схема архітектури управління для дистанційної присутності з міні-ROV показана на рис. 1.

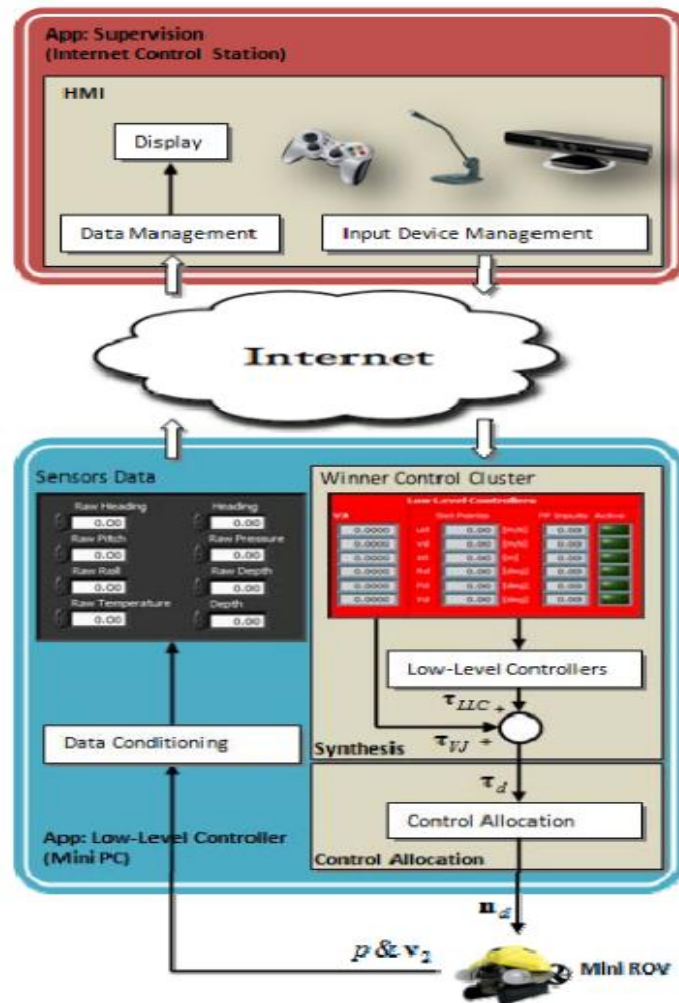


Рисунок 1 – Віддалена присутність: архітектура керування [9]

Система управління використовує підхід розподілу управління, у якому завдання вибору виконавчих механізмів (співставлення сумарних управляючих впливів з індивідуальними налаштуваннями виконавчих механізмів) відокремлена завдання регулювання (проектування сумарних управляючих впливів) у процесі проектування системи управління. Модуль синтезу виконує завдання регулювання, тоді як модуль розподілу управління виконує завдання вибору виконавчих механізмів. Програма Supervision, що працює на Internet Control Station, виконує дві функції:

- Подання пілоту даних вимірювань датчиків у реальному часі (крен, тангаж, нищпорення, глибина і температура),
- Отримання команд пілота від одного з трьох доступних пристроїв введення (геймпад, мікрофон або KINECT) та створення кластера керування Winner.

Додаток «Низькорівневий контролер», що працює на міні-ПК, виконує такі завдання:

- Збір та фільтрація низькочастотних/медіанних даних вимірювань датчиків (крен, тангаж, нищпорення, тиск і температура), перетворення тиску в глибину та створення кластера даних датчиків.
- Визначення налаштувань виконавчого механізму (вектор керування підрулюючим пристроєм) у два етапи: спочатку виконується завдання регулювання (модуль синтезу), а потім завдання вибору виконавчого механізму (модуль розподілу керування).

Технологія віддаленої присутності відрізняється простотою, надійністю та

стабільністю і вимагає стабільного та відкритого підключення до Інтернету з максимальною швидкістю мережі 1 Мбіт/с, легко доступною для більшості інтернет-провайдерів, дозволяють розробити абсолютно нове покоління інспекційних підводних апаратів з дистанційним керуванням. Основні характеристики таких роботизованих платформ включають тривалий час роботи на об'єкті, дистанційне управління, регулярну інспекцію підводних споруд, виявлення та повідомлення про аномалії, несправності та проблеми для подальшого ремонту та технічного обслуговування, моніторинг морської установки без витрат на мобілізацію суден, низьке енергоспоживання та просте періодичне технічне обслуговування.

Швидкий розвиток робототехніки та інформаційних технологій додало сфері збору, обробки та подання даних під водою зовсім інший вигляд, особливо у застосуванні до дистанційно керованих підводних апаратів та автономних підводних апаратів (AUV). Спостерігається зростання застосування інтерактивних та покращених методів подання даних, таких як тривимірна візуалізація у реальному часі у поєднанні з традиційними можливостями, такими як графіки часових рядів, відстеження положення та відображення орієнтації. Оператори в сучасних системах можуть візуалізувати напрямок і положення AUV у модельованому тривимірному середовищі та одночасно переглядати відповідні параметри навколишнього середовища, відеовхід, дані про збір проб та нотатки. Це багаторівневий інтерфейс, що дозволяє вивчати всі аспекти підводного середовища. Методи візуального контролю використовують процедуру мозаїчного зображення з датчиками, встановленими на апараті, а також витяг ознак зображення для створення повних візуальних карт підводних споруд, що дозволяє створювати дуже корисні візуальні набори даних, поєднуючи численні кадри зображень в єдиний, що не викликає нарікань і ієрархічний інтерфейс [6].

Складність підводних завдань, що виконуються в даний час, і висока потреба в чіткій і своєчасній інформації зробили ШІ і машинне навчання необхідними інструментами в цій галузі. Рішення на основі ШІ та машинного навчання дуже ефективні при обробці великих обсягів даних, що збираються найновішими підводними технологіями, такими як гідролокатори, багатоспектральні системи візуалізації та оптичні датчики. Такі складні дані зазвичай погано обробляються традиційними методами аналізу. Тим не менш, інтелектуальні алгоритми зможуть швидко обробляти ці обсяги та отримувати своєчасні оцінки підводних умов та порушень [12].

Результати дослідження.. Проаналізовано передові інструменти, такі як удосконалені гідролокаційні системи, автономні підводні апарати (AUV), інтегровані платформи для обстеження та аналітика на основі штучного інтелекту (ШІ). Розглянуті технологічні досягнення в галузі підводних робіт, їх принципи, застосування та ефективність. Визначено, що технологія дистанційної присутності має потенціал для забезпечення економічно ефективного рішення для частої дистанційної інспекції підводних об'єктів, знижуючи необхідність використання дорогих суден. Інспекційні підводні апарати з дистанційним керуванням (I-ROV) можуть використовуватися для моніторингу важливих параметрів навколишнього середовища, стану споруд, що інспектуються, на які впливає підводне середовище.

Висновки.. Підводна інспекція за допомогою дистанційно керованих підводних апаратів не є чимось новим, і багато операторів та виробників мають великий досвід використання візуальних, акустичних та інших неруйнівних методів контролю. Ці методи залишаються необхідними у сфері технічного обслуговування морських споруд, проте їх витісняють інновації, що ростуть, в галузі автоматизації та інтеграції датчиків, спрямовані на підвищення ефективності та зниження ризиків експлуатації. Можливість підводних апаратів переходити від управління водолазами та ручного управління до інтелектуальних систем з виборчим та повним управлінням, особливо автономним підводним апаратам (AUV), значно підвищила ефективність збору даних, безпеку та швидкість операцій.

Поліпшення як в інструментах візуалізації, так і в постобробних додатках також сприяють підвищенню доступності і зручності використання результатів інспекцій кінцевим користувачем, що дозволяє приймати рішення на основі докладної інформації. Інспекція найважливіших підводних об'єктів стає дедалі можливішою при використанні автономних систем з предиктивною аналітикою, які допомагають мінімізувати втручання людини, знижують витрати на інспекції та підвищують стійкість. Людина переміщається із «зони ризику» до «зони управління», виконуючи роль експерта, який приймає рішення на основі точних даних, а не первинного збирача інформації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Theocharidis, Theocharis & Kavallieratou, Ergina. (2025). Underwater communication technologies: a review. *Telecommunication Systems*. 88. 10.1007/s11235-025-01279-x.
2. Dulo, Chukwuemeka. (2025). A review on the advances in underwater inspection of subsea infrastructure: Tools, technologies, and applications. *Communication in Physical Sciences*. 12. 1624-1635. 10.4314/cps.v12i5.15.
3. International Maritime Organization. (2003). *International Ship and Port Facility Security (ISPS) Code: 2003 edition*. IMO Publishing.
4. Marani, Giacomo & Choi, Song & Yuh, Junku. (2009). Underwater Autonomous Manipulation for Intervention Missions AUVs. *Ocean Engineering — OCEAN ENG*. 36. 15–23. 10.1016/j.oceaneng.2008.08.007.
5. Williams, D. P., & Groen, J. (2009, November). On the effects of synthetic-aperture length on SAS seabed segmentation. In *2009 Ninth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications* (pp. 590-595). IEEE.
6. Dulo, Chukwuemeka. (2025). A review on the advances in underwater inspection of subsea infrastructure: Tools, technologies, and applications. *Communication in Physical Sciences*. 12. 1624–1635. 10.4314/cps.v12i5.15.
7. Kaizer, Adam & Lednicka, Barbara & Tessmer, Agnieszka & Freda, Wlodzimierz & Soszynska-Budny, Joanna & Ziajka, Ewelina. (2025). Use of an ROV with Modulated Lighting for Diagnosing the Technical Condition of Submerged Port Wharf Structures. *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 19. 477-482. 10.12716/1001.19.02.17.
8. Maurelli, F., Karras, G., Kyriakopoulos, K. J., Lane, D. M., Petillot, Y. R., Patrón, P., ... & Kruusmaa, M. (2016). The PANDORA project: A success story in AUV autonomy. In *OCEANS 2016 — Shanghai* (pp. 1–8). IEEE. doi.org
9. Omerdic, Edin & Toal, Daniel & Dooly, Gerard & Kaknjo, Admir. (2015). Remote presence: Long endurance robotic systems for routine inspection of offshore subsea oil & gas installations and marine renewable energy devices. *2014 Oceans - St. John's, OCEANS 2014*. 10.1109/OCEANS.2014.7003054.
10. T. Glebas, (2013) «Remote VideoRay Usage Over the Internet», Micro ROV conference VIPS 2013, San Diego, California, 27th Sep 2013.
11. Omerdic, Edin & Toal, Daniel & Dooly, Gerard. (2013). OceanRINGS: Smart Technologies for Subsea Operations. Chapter in book «Advanced in Marine Robotics», LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN-13: 978-3-659-41689-7, ISBN-10: 3659416894
12. Igbinenikaro, O. P., Adekoya, O. O., & Etukudoh, E. A. (2024). Emerging underwater survey technologies: A review and future outlook. *Open Access Research Journal of Science and Technology*, 10, 2, pp. 71–84. <https://doi.org/10.53022/oarjst.2024.10.2.0052>

РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ У СЕРЕДОВИЩІ UNITY НА ОСНОВІ ЩІЛЬНІСНОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ

Клепцов А.А., Фаріонова Т.А.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)

Вступ. У сучасних інформаційних технологіях морського транспорту особливе місце посідають системи інтелектуальної обробки радіолокаційних даних. Задача локалізації об'єктів за азимутальними вимірюваннями (*bearing-only*) є технічно складною через виникнення значної кількості хибних точок перетину променів, що потребує впровадження ефективних засобів цифрової фільтрації та групування даних [1].

Актуальність досліджень. Традиційні методи обробки сигналів часто не справляються з хаотичним розподілом спуріозних перетинів, які виникають у багаторадарних системах. Актуальність даної роботи полягає у розробці програмного модуля в середовищі Unity, який використовує алгоритм DBSCAN для автоматичного виявлення реальних цілей у реальному часі, що є критичним для систем підтримки прийняття рішень та автономного судноводіння [2].

Постановка задачі. Метою роботи є розробка та апробація імітаційної моделі локалізації об'єктів у середовищі Unity. Основна задача полягає в реалізації інтелектуального алгоритму на основі щільнісної кластеризації, який здатен самостійно ідентифікувати кількість та координати морських цілей без апіорних даних про обстановку, відсікаючи при цьому понад 80% геометричного шуму.

Основний матеріал. В основу розробленого модуля покладено концепцію «цифрового двійника» навігаційної ситуації. Середовище Unity використано не лише для візуалізації, а як обчислювальне ядро для моделювання геометричних взаємодій.

Модуль складається з трьох ключових компонентів:

1. Генератор азимутальних потоків: імітує роботу п'яти незалежних РЛС, що формують вектори напрямку на об'єкти.
2. Обчислювач перетинів: алгоритм, що знаходить усі можливі точки перетину променів у 2D-просторі, формуючи первинну хмару кандидатних точок.
3. Інтелектуальний фільтр DBSCAN: програмний шар, що аналізує щільність точок у хмарі [3].

Алгоритм DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) працює за принципом пошуку областей з високою концентрацією перетинів. Координати центру цілі визначаються як середнє значення позицій точок, що увійшли до сформованого кластера:

$$C_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i, \quad (1)$$

де P_i – координати точок перетину, що задовольняють критерію щільності (ϵ , minPoints), а n – кількість точок у кластері.

Така архітектура дозволяє використовувати модуль як Plug-and-Play компонент для розробників морських симуляторів або систем моніторингу трафіку суден (VTS), оскільки він легко інтегрується в будь-який Unity-проект через C#-скрипти.

Результати досліджень. Під час імітаційного моделювання було встановлено, що запропонований модуль стабільно локалізує об'єкти навіть при критичному зростанні кількості завад.

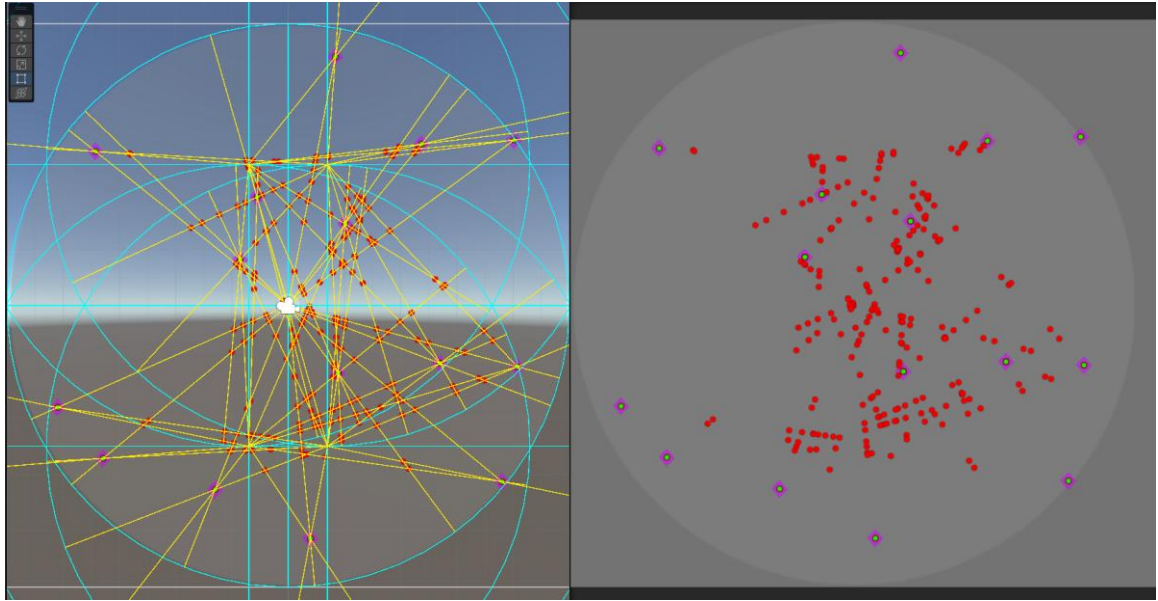


Рисунок 1 – Візуалізація роботи інтелектуального модуля локалізації в Unity

У ході експериментів було встановлено, що інтегрований у Unity алгоритм DBSCAN ефективно адаптується до змінної навігаційної обстановки. Завдяки щільнісному підходу, система успішно виконує сепарацію корисного сигналу від фонового шуму, ідентифікуючи реальні цілі та позначаючи їх фіолетовими маркерами (Рисунок 1).

Особливістю модуля є здатність алгоритму фільтрувати розсіяні азимутальні перетини, які автоматично маркуються як «Noise» і виключаються з обчислювального циклу. Це запобігає хибному спрацюванню систем супроводження цілей та дозволяє отримати стабільні координати центрів мас об'єктів для передачі в модулі автопілотування.

З точки зору програмної реалізації, модуль демонструє високу оптимізацію: використання ефективних структур даних у C# дозволяє підтримувати частоту оновлення кадрів понад 60 FPS. Така продуктивність робить систему придатною для використання в динамічних сценаріях, де необхідна миттєва реакція на маневрування суден в умовах інтенсивного трафіку.

Висновки. У роботі представлено інтелектуальний модуль локалізації, реалізований у середовищі Unity. Використання алгоритму DBSCAN дозволило вирішити проблему ідентифікації цілей у шумному азимутальному полі без необхідності ручного налаштування кількості об'єктів. Запропоноване рішення може бути використане як база для розробки перспективних систем автоматизації морського транспорту та тренажерних комплексів нового покоління.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hero A. O., Blatt D. Sensor network source localization via projection onto convex sets. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2005. Vol. 53, No. 9. P. 3372–3384.
2. Pernas-Álvarez J., Crespo-Pereira D. Open-source 3D discrete event simulator based on the game engine Unity. *Journal of Simulation*. 2024. <https://doi.org/10.1080/17477778.2024.2314166>
3. Ester M., Kriegel H.-P., Sander J., Xu X. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*. 1996. P. 226–231.

ВИКОРИСТАННЯ ПРОСТОРОВИХ ОЗНАК ІНФРАСТРУКТУРИ У РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗУВАННЯ

Кравцов Д.Є., Полетаєв М.І.
Одеський Національний Морський Університет
(Україна)

Вступ. У сучасних задачах аналізу даних важливим фактором є врахування того, де саме розташовані об'єкти дослідження. У багатьох моделях машинного навчання прогнозування виконується на основі характеристик самих об'єктів, наприклад їх технічних або числових параметрів. Проте важливу роль може відігравати і навколишнє середовище, зокрема доступність транспортної та комерційної інфраструктури. Такі фактори можуть відображати рівень розвитку території та впливати на результати прогнозування.

Актуальність досліджень. У сучасних дослідженнях показано, що просторові характеристики інфраструктури можуть суттєво впливати на результати прогнозних моделей. Зокрема, доступність транспортних вузлів та різних міських сервісів розглядається як один із факторів, що відображає соціально-економічні характеристики території [1–3]. Проте в багатьох практичних задачах машинного навчання такі фактори враховуються недостатньо або не використовуються безпосередньо як ознаки моделей.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження можливості використання просторових ознак інфраструктури для підвищення якості регресійних моделей прогнозування. У межах дослідження розглядається підхід до формування ознак, що характеризують доступність інфраструктурних об'єктів, та їх інтеграцію у моделі машинного навчання.

Основний матеріал. Як експериментальну предметну область використано задачу прогнозування вартості оренди житлової нерухомості на прикладі міста Х'юстон (США). Для аналізу застосовано датасет, що містить інформацію про 9260 об'єктів житлової нерухомості, отриманих із відкритих даних сервісу з операцій із нерухомістю Redfin. Датасет включає базові табличні характеристики об'єктів, зокрема координати розташування, рік побудови, кількість спалень та ванних кімнат, площу будівлі, площу земельної ділянки, поштовий індекс та значення орендної вартості.

Для збагачення набору даних було використано геопросторову інформацію про розташування елементів інфраструктури. У дослідженні використано два типи інфраструктурних об'єктів: 9016 зупинок громадського транспорту, отриманих із відкритих транспортних геоданих міста Х'юстон, а також 344 ресторани мережі Starbucks, координати яких було отримано з офіційних відкритих джерел компанії Starbucks.

На основі координат об'єктів нерухомості та інфраструктурних елементів було сформовано додаткові просторові ознаки. Для кожного об'єкта нерухомості виконано розрахунок відстаней до інфраструктурних об'єктів із використанням географічних координат. Зокрема, було визначено кількість інфраструктурних об'єктів у заданих радіусах (від 1 до 10 км), відстань до найближчого об'єкта інфраструктури, а також середні відстані до кількох найближчих об'єктів.

Таким чином, базовий набір табличних характеристик було доповнено просторовими ознаками, що описують щільність та доступність інфраструктури навколо кожного об'єкта нерухомості. Такий підхід дозволяє перейти від використання лише координат до більш змістовного опису просторового середовища.

Для побудови прогнозної моделі використано алгоритм градієнтного бустингу LightGBM. Відбір найбільш інформативних ознак здійснювався методом Recursive Feature Elimination with Cross-Validation, а оптимізація гіперпараметрів моделі проводилась із використанням бібліотеки Optuna.

Результати досліджень. Проведені експерименти показали, що інтеграція

просторових ознак інфраструктури позитивно впливає на якість прогнозування вартості нерухомості. Зокрема, використання ознак транспортної доступності дозволило зменшити середньоквадратичну помилку моделі приблизно на 4–5%. Додаткове врахування ознак комерційної інфраструктури, представленої ресторанами Starbucks, забезпечило подальше покращення точності прогнозування, знизивши помилку приблизно на 6% порівняно з базовою моделлю.

Отримані результати свідчать про те, що просторові характеристики інфраструктурного середовища можуть виступати інформативними факторами у задачах регресійного моделювання.

Висновки. У роботі досліджено підхід до формування просторових ознак інфраструктури та їх використання у регресійних моделях машинного навчання. Показано, що інтеграція характеристик доступності інфраструктурних об'єктів дозволяє підвищити точність прогнозування порівняно з моделями, які використовують лише табличні характеристики об'єктів.

Запропонований підхід має універсальний характер і може застосовуватися у різних задачах аналізу просторових систем. Зокрема, характеристики просторової доступності інфраструктурних об'єктів можуть використовуватися для дослідження транспортних мереж, логістичних систем та портової інфраструктури, що відкриває можливості застосування запропонованої методики у задачах аналізу транспортних систем, у тому числі в галузі морського транспорту.

ЛІТЕРАТУРА

1. K. Ren, House Price Prediction Based on Machine Learning Algorithms – Taking Ames as an Example, *Advances in Economics Management and Political Sciences*, vol. 85, no. 1, pp. 181–189, 2024. DOI: 10.54254/2754-1169/85/20240870.
2. S. Mathur, Impact of Transit Stations on House Prices Across Entire Price Spectrum: A Quantile Regression Approach, *Land Use Policy*, vol. 99, 104828, 2020. DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104828.
3. Soltani, N. Zali, R. Mirzaei, M. Heydari, A. Rahimi, A. Hamidi, Multilevel Impacts of Urban Amenities on Housing Price in Tehran, Iran, *Journal of Urban Planning and Development*, vol. 149, no. 4, 2023. DOI: 10.1061/JUPDDM.UPENG-4434.

ІНТЕГРАЦІЯ ІНТЕРПРЕТОВАНОГО ТА КАУЗАЛЬНОГО МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ОЗНАК У РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗУВАННЯ

Кравцов Д.Є, Полетаєв М.І.
Одеський Національний Морський Університет
(Україна)

Вступ. Сучасні моделі машинного навчання широко застосовуються для прогнозування у задачах аналізу даних, зокрема у регресійних задачах. Алгоритми градієнтного бустингу, такі як XGBoost, LightGBM і CatBoost, здатні ефективно враховувати складні нелінійні взаємозв'язки між ознаками та забезпечувати високу точність прогнозів. Проте складна структура цих моделей часто ускладнює інтерпретацію отриманих результатів та розуміння механізмів формування прогнозу.

Актуальність досліджень. Для пояснення результатів роботи моделей машинного навчання активно застосовуються методи інтерпретованого штучного інтелекту (Explainable AI), зокрема SHAP-значення, графіки часткової залежності та показники важливості ознак. Такі інструменти дозволяють оцінювати внесок окремих факторів у прогноз моделі та аналізувати її поведінку [1]. Однак подібні підходи відображають переважно статистичні або асоціативні залежності між змінними і не завжди дозволяють зробити висновок про реальний причинно-наслідковий вплив факторів.

У зв'язку з цим останніми роками зростає інтерес до методів каузального машинного навчання, які дозволяють оцінювати причинні ефекти та відокремлювати їх від кореляційних залежностей [2]. Зокрема, для моделювання складних нелінійних ефектів між змінними можуть застосовуватися узагальнені адитивні моделі (Generalized Additive Models), що забезпечують більш гнучкий аналіз впливу факторів у порівнянні з традиційними лінійними підходами [3].

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження можливостей інтеграції інтерпретованих та каузальних методів машинного навчання для більш глибокого аналізу впливу ознак у регресійних задачах прогнозування. Основна ідея полягає у поєднанні методів ХАІ, що дозволяють пояснювати поведінку моделей, з інструментами causal machine learning, які дають змогу оцінити реальний причинний ефект зміни окремих характеристик.

Основний матеріал. У дослідженні використано експериментальний датасет, що містить інформацію про 9260 об'єктів житлової нерухомості міста Х'юстон (США). Набір даних включає структурні та геопросторові характеристики об'єктів, зокрема координати, рік побудови, кількість спалень і ванних кімнат, площу будівлі та земельної ділянки, а також поштовий індекс.

Для прогнозування вартості нерухомості застосовано модель градієнтного бустингу LightGBM, яка добре працює з табличними та гетерогенними даними і здатна враховувати складні нелінійні залежності між ознаками.

На етапі інтерпретації результатів використано кілька підходів. По-перше, застосовано SHAP-аналіз, який дозволяє визначити внесок кожної ознаки у конкретне передбачення моделі та оцінити глобальну важливість факторів. По-друге, використано графіки часткової залежності (PDP), що демонструють середню зміну прогнозованого значення при варіюванні окремої ознаки.

Однак такі методи не дозволяють відрізнити кореляційні залежності від причинних. Тому для подальшого аналізу застосовано інструменти каузального машинного навчання:

- Generalized Additive Models (GAM) для моделювання нелінійних ефектів ознак;
- Double Machine Learning (DML) для оцінювання маржинальних причинних ефектів

окремих факторів при контролі інших змінних.

Поєднання цих методів дозволило сформуванню двошарову систему аналізу: інтерпретовані моделі пояснюють поведінку алгоритму прогнозування, тоді як каузальні методи уточнюють реальний вплив ознак на цільову змінну.

Результати досліджень. Проведений аналіз показав, що найбільший внесок у формування прогнозованої вартості нерухомості мають структурні характеристики об'єкта, зокрема площа будівлі, кількість спалень та ванних кімнат, а також рік побудови.

Методи інтерпретованого машинного навчання (SHAP та PDP) виявили також значний вплив геопросторових змінних – широти, довготи та поштового індексу. Однак застосування каузального аналізу показало, що після врахування взаємодій між ознаками ці фактори значною мірою втрачають статистичну значущість.

Натомість структурні параметри зберігають стабільний причинний ефект: збільшення площі будівлі або кількості внутрішніх приміщень призводить до систематичного зростання прогнозованої вартості. Таким чином, інтеграція інтерпретованих і каузальних методів дозволила відокремити асоціативні залежності від реальних причинних факторів, що формують результат моделювання.

Висновки. У роботі запропоновано підхід до аналізу факторів у регресійних задачах прогнозування, який поєднує інструменти Explainable AI та causal machine learning. Така інтеграція дозволяє не лише пояснювати поведінку моделей машинного навчання, а й оцінювати причинний вплив ознак на результуючу змінну.

Експериментальні результати показали, що використання каузальних методів дозволяє уточнити висновки, отримані за допомогою традиційних інтерпретаційних підходів, і виявити фактори, які мають реальний вплив на прогнозовану величину.

Запропонована методика має універсальний характер і може застосовуватися у різних задачах аналізу складних систем, де необхідно не лише отримати точний прогноз, але й зрозуміти механізми формування результатів. Це відкриває можливості використання такого підходу у задачах економічного аналізу, урбаністичних досліджень, а також у системах підтримки прийняття рішень у транспортних та логістичних системах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Molnar C., Casalicchio G., Bischl B. General Pitfalls Of Model-Agnostic Interpretation Methods For Machine Learning Models. In: Holzinger A., Goebel R., Fong R., Moon T., Müller K.-R., Samek W. (eds). xxAI – Beyond Explainable AI. Lecture Notes in Computer Science, vol. 13200. Springer, Cham, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04083-2_13
2. Chernozhukov V., Demirer M., Duflo E., Fernandez-Val I. Double/Debiased Machine Learning For Treatment And Structural Parameters. The Econometrics Journal, 2018, Vol. 21, Issue 1, pp. C1–C68. <https://doi.org/10.1111/ectj.12097>
3. Hastie T., Tibshirani R. Generalized Additive Models. Chapman & Hall/CRC, London, 1990. <https://doi.org/10.1201/9780203753781>

ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПОРТОВОЇ ЛОГІСТИКИ/АГЕНТУВАННЯ СУДЕН З РОЗРАХУНКОМ ВИТРАТ РЕСУРСІВ ПРИ ЗМІННИХ ТАРИФАХ І КУРСАХ ВАЛЮТ

Маринова Ю. О., Бугаєва І. Г.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Сучасний ринок портових послуг функціонує в умовах високої турбулентності: тарифи на лоцманське забезпечення, причальні збори, буксирне обслуговування та інші ресурси переглядаються адміністраціями портів у міру зміни операційних витрат, а курси валют (передусім USD, EUR) можуть коливатися щодня. Для судових агентів, які здійснюють розрахунки з портом та іншими контрагентами, постає задача оперативного формування фінансових калькуляцій із мінімальною похибкою. Вирішення цієї задачі потребує впровадження інформаційної системи, що автоматично інтегрує актуальні тарифні та валютні дані.

Актуальність досліджень. Аналіз існуючих програмних продуктів (як вітчизняних, так і зарубіжних) показав, що більшість із них або не підтримують автоматичне оновлення курсів валют та тарифів, або використовують спрощені моделі розрахунку без урахування динамічних коефіцієнтів. У результаті агенти змушені вручну вносити корективи, що призводить до помилок та втрати часу. Розробка спеціалізованої системи, орієнтованої на портову логістику, є актуальною для підвищення точності фінансового планування та конкурентоспроможності агентських компаній.

Постановка задачі. Метою роботи є створення інформаційної системи для автоматизованого розрахунку витрат ресурсів при агентуванні суден, яка враховує:

- змінні тарифи на послуги (залежно від періоду, типу судна, обсягу вантажу тощо);
- актуальні курси валют, що впливають на вартість послуг, номінованих у різних валютах;
- ієрархічну структуру витрат із можливістю групування за контрагентами.

Для досягнення мети необхідно:

1. Проаналізувати предметну область і визначити склад ресурсів (послуг), що підлягають оплаті.
2. Розробити математичну модель розрахунку вартості із залежністю від часу та зовнішніх параметрів.
3. Спроекувати реляційну базу даних для зберігання довідників, історії змін тарифів і курсів, а також документів (заявки, інвойси).
4. Реалізувати веб-орієнтоване програмне забезпечення з інтерфейсом користувача для введення даних суднозаходу, розрахунку та формування звітів.

Основний матеріал. Система реалізована на базі трирівневої архітектури «клієнт–сервер» із використанням веб-фреймворку (Spring Boot, React). Основними функціональними модулями є:

- Модуль інтеграції даних: періодично (щогодини) отримує курси валют із відкритих API (Національний банк України, інші джерела) та завантажує оновлені тарифні сітки через XML/JSON-файли, що надаються адміністраціями портів.
- Модуль розрахунку витрат: на основі обраного суднозаходу (тип судна, тоннаж, тривалість стоянки, перелік замовлених послуг) обчислює вартість кожної послуги та підсумкові суми.
- Модуль управління ставками: дозволяє адміністратору системи задавати правила застосування коефіцієнтів (сезонні, валютні, інфляційні) та дати початку дії ставок.
- Модуль звітності: генерує детальні калькуляції, рахунки-фактури, порівняльні аналізи в форматах PDF та Excel.

Математична модель розрахунку вартості окремої послуги базується на виразі

$$C_j(t) = V_j \cdot \left(P_{j0} \cdot \prod_{k=1}^m \alpha_{jk}(t) \right) \cdot \beta_{\text{вал}}(t) + C_{\text{дод.}j} \quad (1)$$

де $C_j(t)$ – вартість j -ї послуги в момент t ; V_j – обсяг (натуральний показник, наприклад, тоннаж, кількість буксирів); P_{j0} – базовий тариф; $\alpha_{jk}(t)$ – коефіцієнти зміни тарифу (сезонний, коефіцієнт типу судна тощо); $\beta_{\text{вал}}(t)$ – коефіцієнт перерахунку до валюти розрахунку (на основі офіційного курсу); $C_{\text{дод.}j}$ – додаткові фіксовані збори.

Загальна вартість агентування (сума всіх послуг) визначається як:

$$C_{\text{заг}} = \sum_{j=1}^n C_j(t). \quad (2)$$

Для забезпечення гнучкості в системі реалізовано можливість застосування різних валютних коефіцієнтів залежно від того, в якій валюті виставлено тариф. Наприклад, якщо послуга номінована в USD, а розрахунок ведеться в UAH, застосовується курс USD/UAH на задану дату. Якщо послуга вже в UAH, $\beta_{\text{вал}} = 1$.

Структура бази даних включає наступні основні сутності:

- послуги (ід, назва, одиниця виміру, базова валюта);
- тарифні сітки (ід послуги, період дії, базове значення, тип коефіцієнта);
- курси валют (дата, код валюти, курс);
- суднозахід (ід, назва судна, дата прибуття, тип судна, тоннаж);
- деталі розрахунку (ід суднозаходу, ід послуги, обсяг, розрахована вартість).

Для тестування системи було змодельовано сценарій обслуговування судна типу «Ro-Ro» дедвейтом 8000 т у порту «Південний» із переліком послуг: лоцманська проводка, причальний збір, буксирне забезпечення, швартові операції, агентська винагорода. Порівняння розрахунків із фіксованими та змінними параметрами наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняння витрат по різних сценаріях

Стаття витрат	Базовий тариф (фікс.)	З урах. зміни тарифу (+8%)	З урахуванням курсу USD (+5%)	Комбінований сценарій(+8%,+5%)
Лоцманська проводка, USD	1200,00	1296,00	1260,00	1360,80
Причальний збір, USD	850,00	918,00	892,50	963,90
Буксирне забезпечення, USD	620,00	669,60	651,00	703,08
Швартові операції, USD	350,00	378,00	367,50	396,90
Агентська винагорода, USD	500,00	540,00	525,00	567,00
Загалом, USD	3520,00	3801,60	3696,00	3991,68

Примітка: зміна тарифу на 8% відбулася згідно з новим прейскурантом порту; зміна курсу USD врахована через коефіцієнт $\beta_{\text{вал}} = 1,05$.

Діаграма потоків даних у системі представлена на рисунку 1.

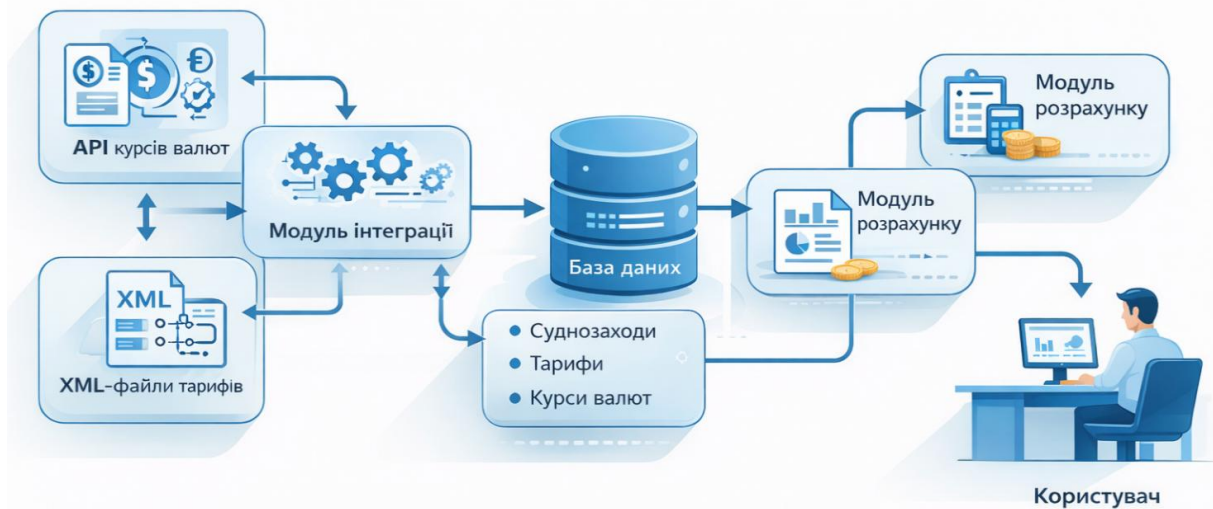


Рисунок 1 – Схема інформаційних потоків системи розрахунку витрат

Результати досліджень. Розроблена система дозволяє:

- автоматично оновлювати курси валют із заданою періодичністю (кожні 4 години) та вести історію змін для аудиту;
- гнучко налаштовувати тарифні правила: для кожної послуги можна задати кілька коефіцієнтів із прив'язкою до діапазонів дат, типів суден, вантажів;
- виконувати розрахунки в режимі реального часу для кількох суднозаходів одночасно;
- формувати порівняльні звіти «що-якщо» для аналізу впливу змін тарифів або курсів на загальну вартість;
- знизити час підготовки калькуляції з 30–40 хвилин (при ручному розрахунку) до 1–2 хвилин.

Тестування показало, що похибка автоматичних розрахунків порівняно з контрольними прикладами, виконаними вручну за затвердженими методиками, не перевищує 0,05% (виключно за рахунок округлень).

Висновки. Запропонована інформаційна система забезпечує автоматизацію розрахунку витрат ресурсів при агентуванні суден із врахуванням змінних тарифів і курсів валют. Використання модульної архітектури та централізованого зберігання довідників дозволяє швидко адаптувати систему до змін нормативно-правової бази та індивідуальних умов роботи агентських компаній. Подальший розвиток системи передбачає інтеграцію з портальними рішеннями морських адміністрацій для автоматичного отримання актуальних тарифів, а також впровадження елементів прогнозної аналітики на основі методів машинного навчання для передбачення змін курсів і тарифів.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 16 с.
2. Мельник О.Г., Лазоренко Л.В. Інформаційні системи в логістиці: навч. посіб. Одеса : ОНМУ, 2021. 184 с.
3. Смірнов С.М. Моделювання фінансових ризиків у портовій діяльності // Вісник морського транспорту. 2023. № 2 (34). С. 45–52.
4. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. Режим доступу:

<http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення: 10.03.2025).

5. Коваленко А.В., Лисенко В.І. Технології інтеграції даних в інформаційних системах портової логістики. Інформаційні технології в морській галузі: зб. наук. пр. 2024. Вип. 12. С. 112–119.

6. API Національного банку України: офіційна документація. URL: <https://bank.gov.ua/ua/open-data/api-dev> (дата звернення: 10.03.2025).

АВТОМАТИЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ПРОФЕСІЙНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ПЕРСОНАЛУ МОРСЬКОГО ПОРТУ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА

Панков М.Р., Коновалов С.М.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. У структурі глобальної логістики морські порти трансформувалися у складні високотехнологічні вузли, де ефективність операцій та безпека судноплавства безпосередньо залежать від якості людського капіталу. Попри стрімку автоматизацію технічних процесів, людський фактор залишається критичною ланкою: за різними оцінками, він є першопричиною від 75 % до 96 % інцидентів на морі [1].

Традиційні підходи до управління персоналом, що базуються на паперовому документообігу або розрізнених базах даних, уже не здатні забезпечити динамічний контроль за кваліфікацією у реальному часі. Перехід до автоматизованого моніторингу професійної компетентності є не просто оптимізацією адміністрування, а стратегічним інструментом мінімізації ризиків та гарантування відповідності портової діяльності міжнародним стандартам безпеки.

Актуальність. В умовах інтенсивної цифровізації морської галузі та зростання вимог до безпеки судноплавства питання підвищення ефективності управління персоналом морських портів набуває особливої актуальності. Незважаючи на значний рівень автоматизації виробничих процесів, людський фактор залишається визначальним елементом у забезпеченні надійності портових операцій та запобіганні аварійним ситуаціям. Високий відсоток інцидентів, спричинених помилками персоналу, свідчить про необхідність переходу від традиційних підходів до управління кадрами до сучасних цифрових рішень [1].

Додатковим чинником актуальності є наявність системних проблем у кадровому забезпеченні морських портів України, зокрема демографічний дисбаланс, фрагментарність даних про кваліфікацію працівників та залежність від паперового документообігу. Це ускладнює оперативний контроль за відповідністю персоналу міжнародним стандартам та створює потенційні ризики для безпеки [2, 3].

Таким чином, розробка та впровадження автоматизованих систем моніторингу професійної компетентності є необхідною умовою підвищення рівня безпеки, ефективності управління та конкурентоспроможності морських портів.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є розробка концептуальних підходів до створення автоматизованої системи моніторингу професійної компетентності персоналу морського порту як інструменту підвищення безпеки судноплавства.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати вплив людського фактору на безпеку портових операцій та визначити ключові складові професійної компетентності персоналу;
- дослідити сучасний стан кадрового потенціалу морських портів України та виявити основні проблеми управління компетенціями;
- сформулювати вимоги до функціональної архітектури автоматизованої системи моніторингу;
- обґрунтувати доцільність використання сучасних цифрових технологій (аналітики даних, blockchain, VR-тренажерів) у процесах оцінювання та контролю компетентності;
- визначити очікуваний ефект від впровадження системи в контексті підвищення рівня безпеки та ефективності управління персоналом.

Основний матеріал

1. Людський фактор та багаторівнева модель компетентності

Безпека мореплавства в акваторіях портів – це результат синергії технічних систем та адекватних дій персоналу. Аналіз аварійності вказує на те, що помилки часто є

наслідком системних збоїв у підготовці [1].

– **класифікація причин помилок:** використання моделі **HFACS** (Human Factor Analysis and Classification System) дозволяє виявити, що за «помилкою оператора» зазвичай стоять організаційні недоліки: некоректне планування змін, відсутність своєчасної перепідготовки або невідповідність психофізіологічного стану працівника складним завданням [1];

– **тріада компетентності:** для морської галузі компетентність не обмежується лише знаннями. Вона включає [4]:

1. **Hard Skills:** Технічна грамотність та сертифікація згідно з вимогами конвенцій ПДНВ (STCW), SOLAS та MARPOL.
2. **Soft Skills:** Здатність до кризової комунікації, прийняття рішень у стресових умовах та робота в мультикультурному середовищі.
3. **Digital Literacy:** Нова вимога сучасності - здатність ефективно взаємодіяти з автоматизованими системами управління портом.

– **Моніторинг як запобіжний захід:** Постійний аудит цих складових дозволяє виявити зниження професійної надійності ще до виникнення аварійної ситуації.

2. Сучасний стан та виклики кадрового потенціалу морських портів України

Аналіз поточної ситуації (зокрема на прикладі ДП «АМПУ») виявляє низку критичних розривів, які потребують негайного вирішення через цифровізацію [2, 3]:

– **демографічний дисбаланс:** спостерігається «старіння» кадрів (понад 67 % персоналу — віком 35–60 років) при критично низькому припливі молодих фахівців (9 %). Це створює ризик втрати унікального досвіду та ускладнює впровадження інновацій;

– **проблема «паперового бар'єра»:** величезна кількість сертифікатів, допусків та медичних оглядів, що мають різні терміни дії, створює умови для випадкових порушень регламентів через людську неухважність менеджерів з кадрів;

– **відсутність єдиного цифрового профілю:** дані про освіту, практичний стаж та інциденти часто зберігаються в різних відділах, що унеможлиблює комплексну оцінку ризиків щодо конкретного працівника.

3. Функціональна архітектура автоматизованої системи моніторингу

Пропоноване рішення полягає у створенні інтегрованої інформаційної системи, яка фокусується на таких функціях:

– **централізований репозиторій компетенцій:** створення «цифрового двійника» професійного профілю працівника, де автоматично акумулюються дані про всі етапи навчання та сертифікації;

– **інтелектуальна система сповіщень:** автоматичний розрахунок критичних дат (закінчення терміну дії допусків) та превентивне інформування персоналу і керівництва за 30/60/90 днів [5];

– **модуль автоматичного розрахунку стажу:** точний облік професійного досвіду на конкретних посадах, що є критичним для присвоєння наступних кваліфікаційних рівнів;

– **аналітичний дашборд:** візуалізація «карти ризиків» порту, де керівництво може миттєво побачити відсоток персоналу, що потребує перепідготовки, та оцінити загальний рівень безпеки за підрозділами;

– **генерація звітів (Compliance Reporting):** моментальна підготовка пакетів документів для міжнародних перевірок та аудитів на відповідність стандартам ISO та вимогам ІМО.

4. Вектори технологічного розвитку та інноваційні додатки

Для забезпечення довгострокової актуальності системи варто інтегрувати наступні інновації [5]:

– **Blockchain для верифікації дипломів:** використання технології розподілених реєстрів для підтвердження автентичності сертифікатів, що виключає ризик використання підроблених документів;

– **Predictive Analytics (Прогностична аналітика):** застосування алгоритмів

машинного навчання для прогнозування періодів «професійного вигорання» або зниження концентрації уваги на основі даних про інтенсивність праці;

– **VR-тренажери як засіб оцінки:** інтеграція результатів тренувань у віртуальній реальності безпосередньо в HRM-систему для об'єктивної перевірки навичок у нештатних ситуаціях;

– **Мобільний кабінет працівника:** забезпечення персоналу зручним доступом до власних даних, навчальних планів та графіків сертифікації через смартфон, що підвищує рівень відповідальності.

Результати досліджень. У ході дослідження встановлено, що ефективний моніторинг професійної компетентності персоналу морського порту має базуватися на інтегрованому підході, який враховує технічні, поведінкові та цифрові навички працівників. Обґрунтовано доцільність використання багаторівневої моделі компетентності, що включає hard skills, soft skills та digital literacy.

Проведений аналіз виявив ключові проблеми існуючих систем управління персоналом, зокрема відсутність єдиного інформаційного простору, складність контролю термінів дії сертифікацій та недостатню прозорість оцінювання кваліфікації працівників.

Запропоновано функціональну архітектуру автоматизованої системи моніторингу, яка включає:

- централізований репозиторій компетенцій;
- інтелектуальну систему сповіщень;
- модулі аналітики та візуалізації ризиків;
- засоби автоматизованої звітності.

Доведено, що впровадження такої системи дозволяє:

- забезпечити безперервний контроль за рівнем компетентності персоналу;
- своєчасно виявляти потенційні ризики, пов'язані з людським фактором;
- підвищити ефективність прийняття управлінських рішень;
- знизити ймовірність аварійних ситуацій у портових акваторіях.

Крім того, визначено перспективні напрями розвитку системи, зокрема інтеграцію технологій прогнозової аналітики, верифікації документів на основі blockchain та використання VR-тренажерів для оцінки практичних навичок.

Висновки. Автоматизація моніторингу компетентності персоналу — це фундаментальний перехід від реактивного управління (виправлення наслідків помилок) до проактивного забезпечення безпеки. Впровадження спеціалізованих інформаційних систем дозволяє порту не лише відповідати жорстким міжнародним вимогам, а й створює прозоре середовище для професійного зростання кадрів. У кінцевому підсумку, цифровізація HR-процесів стає гарантом стійкості морської галузі України та ключовим фактором запобігання техногенним катастрофам в акваторіях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Galierikova A. The human factor and maritime safety. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. P. 1319–1326.
2. Гуштіна М.В. Кадровий потенціал морської галузі: виклики та перспективи розвитку: кваліфікаційна робота магістра: спец. 073 «Менеджмент» / Національний університет «Одеська морська академія». Одеса, 2024. 84 с.
3. Велкова М.К. Економічні аспекти кадрового планування в морському бізнесі: кваліфікаційна робота бакалавра: спец. 051 «Економіка» / Одеський національний морський університет. Одеса, 2025. 72 с.
4. Менеджмент морських ресурсів: навч. посіб. / О.П. Безлуцька, А.П. Бенъ, М.О. Колегаєв та ін. Херсон, 2014. 100 с.
5. Vaggelas G.K. Port labour challenges and opportunities in the era of port automation and digitalization. *The International Maritime and Logistics Conference «Marlog 9»*. 2020. P. 200–215.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ДАНИХ

Шумейко К.П.

Національний університет «Одеська політехніка»
(Україна)

Вступ. Розпізнавання об'єктів є одним із ключових завдань комп'ютерного зору та інтелектуального аналізу даних. В останні роки значна увага приділяється розробці систем, здатних ефективно функціонувати в складних умовах спостереження, де використання лише одного типу сенсорів не забезпечує необхідної надійності та точності. Обмеження окремих джерел даних, зокрема шуми, погіршення якості сигналу та часткова втрата інформації, стимулюють розвиток методів обробки та аналізу даних, що ґрунтуються на інтеграції інформації з кількох сенсорних джерел.

Одним із перспективних напрямів розвитку систем розпізнавання є використання мультимодальних даних, які об'єднують інформацію з різних типів сенсорів, таких як оптичні камери, гідроакустичні системи та інші вимірювальні пристрої. Інтеграція різномірних даних дозволяє підвищити стійкість систем розпізнавання до зовнішніх впливів, покращити інформативність отриманих ознак та підвищити точність класифікації об'єктів [2].

Актуальність досліджень. Розпізнавання об'єктів у підводному середовищі є актуальною науково-технічною задачею, що зумовлена широким спектром прикладних завдань, зокрема моніторингом морських екосистем, інспекцією підводної інфраструктури, пошуком затонулих об'єктів та забезпеченням автономної навігації підводних апаратів. Однак особливості поширення світла у водному середовищі суттєво ускладнюють процеси візуального спостереження та аналізу даних. Поглинання і розсіювання світла призводять до зниження контрастності зображень, спотворення кольорової інформації та обмеження видимості об'єктів. У зв'язку з цим зростає інтерес до розробки систем розпізнавання, що використовують мультимодальні дані, які поєднують інформацію від оптичних та гідроакустичних сенсорів. Такий підхід дозволяє підвищити надійність виявлення об'єктів у складних умовах підводного середовища [1][4].

Постановка задачі. Метою даного дослідження є проведення порівняльного аналізу сучасних моделей розпізнавання об'єктів при використанні мультимодальних даних у підводному середовищі. У роботі розглядаються різні класи моделей машинного навчання та глибокого навчання, що застосовуються для обробки сенсорних даних та їх інтеграції. Основна увага приділяється аналізу архітектур на основі згорткових нейронних мереж, моделей обробки послідовних даних, а також методів об'єднання інформації на різних рівнях обробки даних. Крім того, досліджується вплив різних стратегій інтеграції мультимодальних даних на якість розпізнавання об'єктів та обчислювальну ефективність алгоритмів.

Основний матеріал. Сучасні системи розпізнавання об'єктів переважно базуються на методах глибокого навчання, що дозволяють автоматично виділяти інформативні ознаки з вхідних даних. У задачах виявлення та класифікації об'єктів широко застосовуються архітектури згорткових нейронних мереж (CNN). Серед найбільш поширених моделей можна виділити двоетапні детектори сімейства R-CNN, а також одноетапні алгоритми виявлення об'єктів YOLO (You Only Look Once) та SSD (Single Shot Detector).

Для обробки часових і послідовних даних застосовуються рекурентні нейронні мережі (RNN), а також їх модифікації LSTM (Long Short-Term Memory / довга короткострокова пам'ять) і GRU (Gated Recurrent Unit / керований рекурентний блок). Архітектура LSTM використовує спеціальні механізми пам'яті для збереження довготривалої інформації, тоді як GRU застосовує спрощену структуру керованих вентилів, що дозволяє зменшити обчислювальну складність моделі. Останніми роками

активно використовуються архітектури Transformer, що демонструють високу ефективність під час обробки складних багатовимірних даних. На відміну від рекурентних нейронних мереж, Transformer не використовує послідовну обробку даних, а ґрунтується на механізмі самоуваги (self-attention), що дозволяє моделі одночасно враховувати взаємозв'язки між усіма елементами вхідної послідовності. Завдяки можливості ефективно обробляти великі обсяги даних та моделювати складні залежності між ознаками, моделі на основі Transformer активно використовуються у задачах комп'ютерного зору.

Особливе значення у мультимодальних системах розпізнавання має стратегія об'єднання даних різних сенсорів. У дослідженнях виділяють три основні рівні інтеграції даних: early fusion (об'єднання на рівні вихідних даних), feature fusion (об'єднання ознак) та decision fusion (об'єднання рішень) [3]. На рис. 1 можна побачити приклад архітектури системи об'єднання даних оптичних і гідроакустичних сенсорів (sensor fusion), та на рис. 2 Основні рівні інтеграції мультимодальних даних: early fusion, feature fusion та decision fusion

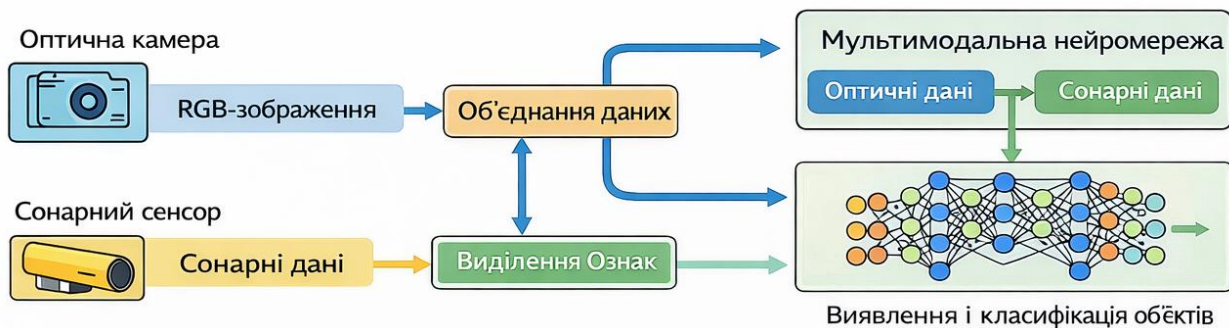


Рисунок 1 – Приклад архітектури системи об'єднання даних оптичних і гідроакустичних сенсорів (sensor fusion)

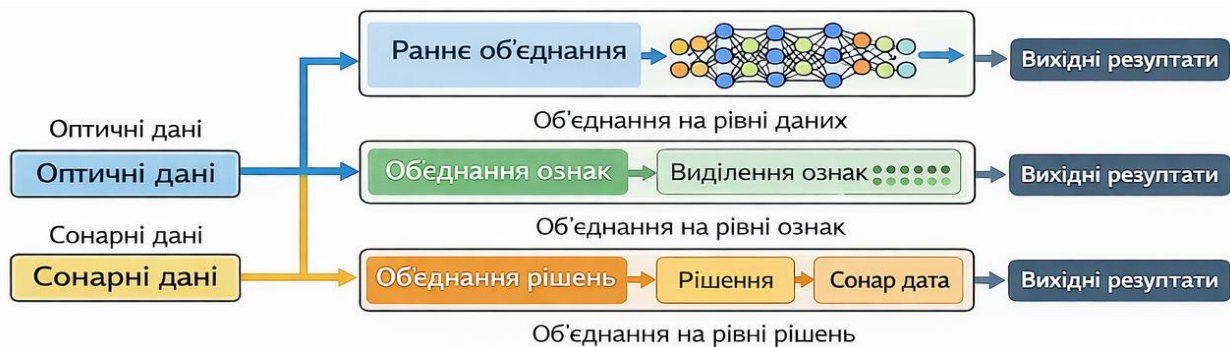


Рисунок 2 – Основні рівні інтеграції мультимодальних даних: early fusion, feature fusion та decision fusion.

Результати досліджень. Проведений аналіз показав, що різні моделі розпізнавання демонструють різні характеристики за показниками точності та швидкодії. Двоетапні детектори, такі як моделі сімейства R-CNN, забезпечують високу точність локалізації та класифікації об'єктів завдяки детальнішому аналізу запропонованих областей інтересу. Однак їхня обчислювальна складність призводить до збільшення часу обробки, що обмежує можливість застосування таких моделей у системах реального часу, наприклад на автономних підводних апаратах.

Одноетапні моделі виявлення об'єктів, такі як YOLO та SSD, характеризуються значно вищою швидкістю обробки даних, оскільки виконують виявлення та класифікацію об'єктів за один прохід нейронної мережі. Це дозволяє використовувати їх у системах, де

критично важливою є оперативна обробка інформації. При цьому сучасні версії цих алгоритмів забезпечують достатньо високу якість розпізнавання, хоча в окремих випадках можуть поступатися двоетапним моделям за точністю виявлення дрібних або слабо виражених об'єктів. Порівняння популярних моделей виявлення об'єктів можна знайти у таблиці нижче.

Таблиця 1 – Порівняння популярних моделей виявлення об'єктів

Модель	Тип детектора	Середня точність	Кадрів за секунду	Особливості
Faster R-CNN	двоетапний	0.75–0.80	5–10	висока точність
SSD	одноетапний	0.65–0.72	20–35	компроміс між швидкістю та точністю
YOLO	одноетапний	0.70–0.75	40–60	підходить для систем реального часу

Аналіз методів мультимодальної інтеграції показав, що об'єднання даних різних сенсорів сприяє підвищенню стійкості систем розпізнавання до несприятливих умов спостереження. Використання підходів об'єднання ознак і рішень дозволяє підвищити точність класифікації та зменшити ймовірність хибних виявлень, особливо в умовах обмеженої видимості, характерних для підводного середовища. Водночас збільшення кількості оброблюваних даних та необхідність синхронізації різних сенсорних потоків можуть призводити до зростання обчислювального навантаження, що потребує оптимізації алгоритмів та архітектури систем обробки даних.

Використання мультимодальних даних дозволяє підвищити точність розпізнавання. У низці досліджень зазначається, що інтеграція даних оптичних та гідроакустичних сенсорів може підвищувати точність виявлення об'єктів на 8–15 % порівняно з використанням лише одного типу сенсорів [2][3].

Висновки. Використання мультимодальних даних дозволяє підвищити стійкість систем розпізнавання об'єктів у підводному середовищі. Порівняльний аналіз показав, що двоетапні детектори забезпечують вищу точність, тоді як одноетапні моделі характеризуються більшою швидкістю обробки та краще підходять для систем реального часу. Інтеграція даних різних сенсорних джерел є перспективним напрямом розвитку систем підводного моніторингу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jian, M., Liu, X., Luo, H., Wang, H., Yu, J., & Dong, J. (2024). Underwater object detection and datasets: A survey. *Artificial Intelligence Review*, <https://doi.org/10.1007/s44295-024-00023-6>
2. Li, J., Skinner, K. A., Eustice, R. M., & Johnson-Roberson, M. (2017). WaterGAN: Unsupervised generative network to enable real-time color correction of monocular underwater images. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(1), 387–394, <https://doi.org/10.1109/LRA.2017.2730363>
3. Islam, M. J., Xia, Y., & Sattar, J. (2020). Fast underwater image enhancement for improved visual perception. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(2), 3227–3234, <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2974710>
4. Li, C., Anwar, S., & Porikli, F. (2020). Underwater scene prior inspired deep underwater image and video enhancement. *Pattern Recognition*, 98, 107038, <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2019.107038>

DESCRIPTION OF REQUIREMENTS IN A DATA MODEL, REPRESENTED AS A SEMANTIC GRAPH

^{1,2}Iakymenkov D., ¹Malaksiano M.

¹Odesa National Maritime University
(Ukraine)

²DUX Consulting
(Ukraine)

Introduction. One of the best methods for locating and removing bottlenecks in intricate commercial processes like trade and transportation, as well as for improving the effectiveness of supply chain coordination, is information technology. Information systems for automating particular transport modes, logistics enterprises and transport hubs started to be developed for few decades. Such developments is in the progress, still, in many domains legacy systems remain the valuable percent of the IT landscape. In parallel with the IT solutions development, both scientific and practical activities were carried out to propose some approaches for harmonization of the system architecture, data models and interactions [1, 2].

Thus, a substantial theoretical and practical base has been created to ensure the efficiency of transportation flows through the application of information solutions. At the same time, the active digitization of documentary support for transportation flows not only demonstrates a positive impact on the process's overall efficiency but also identifies new optimization points, many of which are generated by the digitization process itself. One such issue is ensuring a functional compatibility of information and telecommunication systems among participants in the transportation process. The importance of this task becomes even more significant with the increasing complexity of the transportation system, particularly in transport corridors employing multimodal transportation.

This article is a continuation of the previous works, published by the Authors [3,4] where a working model for researching the problem of ensuring the information interaction interoperability among participants in such a transportation flow was formulated and potential optimization points were identified. Focus of this article is on the developing of the approach that was proposed and to describe the method for the description of the requirements, that are applicable to the data in the semantic graph, as a part of such graph in the form of the Shapes. Authors will show important differences in the concepts of the requirements processing, particularly – validation and application of the requirements and will propose own approach.

Description of the working model. The previous works [3,4] explore enhancing the efficiency and security of data exchange within the different model of transport and multimodal transportation systems by utilizing semantic graphs and the data pipeline concept.

Description of the Problem. The core challenge identified by the Authors is the functional incompatibility of information systems among diverse participants in the supply chain. As transportation systems grow more complex, especially in multimodal corridors, several factors hinder efficient interaction, such as (1) the diversity of the system architecture, (2) the information security and sovereignty (3) the limitations of current models, (4) the data traceability.

Because the parties involved in a common shipment process utilize diverse information systems with varying levels of architectural maturity, direct intervention or wholesale replacement is economically inefficient. Furthermore, constraints such as the requirement for data sovereignty and restricted access to participants' internal data models preclude a "one-size-fits-all" integration.

While traditional «many-to-many» interactions are notoriously complex to manage, centralized "platform" models often face significant hurdles, including high integration costs and a lack of trust in the intermediary. Moreover, when a platform transforms data, it introduces complex legal and operational questions regarding authorship and accountability for the resulting

content.

Definition of the Approach. The Authors propose shifting the paradigm from physical data storage platforms to a virtual information system based on the Data Pipeline concept. The approach is defined by several key principles such as Data Pipeline concept [5,6], functional transformation and semantic graphs.

Information interaction is viewed as a function of data (D) and requirements (R), expressed as

$$P = F(D, R),$$

where D describes a set of the data, that is related to the current informational interaction and R describes a set of requirements for such data and for such interaction. Authors had also shown that transformation of the data could be described a transformation of the requirements for such data:

$$P = F'(R), \text{ where } R = [F_1(D_1), F_2(D_2), \dots, F_M(D_M)]$$

By separating the data from the requirements, it become possible to describe a universal «functional transformation» that is linked to the requirements itself but not to the actual data.

Semantic graphs are used to represent interconnected data models and requirements. This allows for the creation of a harmonized ontology that describes associations between different standards (such as UN/CEFACT, GS1, and OASIS UBL). The model aims to be technologically neutral, utilizing tools like UN/CEFACT Reference Data Models (RDMs) and the Core Components Library (CCL) to ensure data conveys value in an understandable form across different jurisdictions.

As it was shown in [7], it is possible to create a SHACL and ShEx schemas from existing RDF datasets in the semantic graph. Described algorithm allows automatic schema construction that generates specific or consensus-based constraints by analyzing sample data and accounting for potential noise.

In the [8] the shapes schemas is introduced as formal language designed to validate the structure and vocabulary of RDF graphs. It establishes the theoretical foundation for Shape Expressions (ShEx) 2.0, offering a way to define constraints like property cardinalities, data types, and logical combinations of node shapes. The topic of the validation coherency is extremely important. The proposed algorithms are used partially for the further assessment.

Description of the requirements. As it was described, the requirements for the data are described in the same data model presented as a semantic graph. To clarify, what are such a requirements, several examples follows:

- Network level interface requirements
 - Network protocol
 - Connection requirements
 - Security requirements
- Application-level interface requirements
 - API requirements
 - Messaging requirements
- Dataset requirements
 - Dataset format
 - Dataset Schema
 - Dataset business-level rules and conditions
 - Localization
- Legal requirements
 - Identification Schema(s)
 - Authorization

Let's review the example for the interaction between two IT nodes while unloading goods in the seaport from the vessel. Let's imagine that carrier provides information in the form of the

EDIFACT message (CUSCAR) and maritime terminal in the port is operating the XML-based datasets in the WCO DM 3.0 format. In such case the requirements for the data would be.

Table 1 – Example of the requirements for the use-case

Requirements definition	Carrier (EDIFACT)	Terminal (XML)
Network level interface requirements		
- Network protocol	AS2 (HTTP-based EDI transport)	HTTPS (REST API)
- Connection requirements	Persistent partner configuration (static IP + certificates)	Dynamic (API gateway, OAuth token-based)
- Security requirements	- Message signing (X.509) - Encryption (S/MIME) - MDN (Message Disposition Notification)	- TLS 1.3 - OAuth 2.0 / OpenID Connect - Role-based access control (RBAC)
Application-level interface requirements		
- API requirements	None (file/message-based EDI exchange)	RESTful API • POST /cargo-report • GET /status/{id}
- Messaging requirements	- Push model (carrier - > terminal) - Store-and-forward Acknowledgment via CONTRL message	- Request/response (synchronous) - Optional async callbacks (webhooks) - JSON/XML payloads
Dataset requirements		
- Dataset format	EDIFACT (syntax version D.96A or similar)	XML (aligned with WCO DM 3.0)
- Dataset Schema	CUSCAR D.96A	XSD with strongly typed elements
- Dataset business-level rules and conditions	- Mandatory segments (e.g., TDT for transport) - Conditional segments (e.g., DGS for dangerous goods)	- Strict validation (XSD + Schematron) - Cross-field validation (e.g., consignee required if import)
- Localization	- UN/LOCODE for locations - ISO country codes - Free text in English	- Multilingual support (EN/DE) - Code lists aligned with WCO + EU customs (TARIC, etc.)
Legal requirements		
- Identification Schema(s)	- EORI (EU Economic Operator Registration) - Carrier SCAC code	- EORI (mandatory) - Terminal Operator ID
- Authorization	- Bilateral EDI agreement	- API client credentials

	- Customs compliance (pre-arrival declaration obligations)	- Delegated authority (e.g., customs broker acting for carrier)
--	--	---

Here is the sample of the data in EDIFACT format:

UNH+1+CUSCAR:D:96A:UN'
BGM+85+ABC123'
TDT+20+V1234+1++MAEU:172:20'
LOC+9+DEHAM'
NAD+CF+123456789::16'

And data in the XML (WCO DM 3.0 —simplified):

```
<CargoReport>
  <TransportMeans>
    <ID>V1234</ID>
    <Operator>MAEU</Operator>
  </TransportMeans>
  <Location>
    <UNLocode>DEHAM</UNLocode>
  </Location>
  <Consignor>
    <ID scheme=EORI">123456789</ID>
  </Consignor>
</CargoReport>
```

We describe requirements as part of the semantic graph and link them to the core ontology. For example, here is the presentation of the same requirement for the Location entity, that are related to the different contexts – EDIFACT and XML.

Table 2 – Eaxmple of the requirements described as RDF

Carrier (EDIFACT requirements)	Terminal (XML / WCO requirements)
@prefix ex: <http://example.org/> . ex:Req_EDI_LOC a ex:Requirement ; ex:domain ex:Location ; ex:property ex:unlocode ; ex:minCount 1 ; ex:source "EDIFACT" . ex:Req_EDI_Consignee a ex:Requirement ; ex:domain ex:Consignee ; ex:property ex:identifier ; ex:minCount 1 ; ex:source "EDIFACT" .	ex:Req_XML_LOC a ex:Requirement ; ex:domain ex:Location ; ex:property ex:unlocode ; ex:minCount 1 ; ex:pattern "[A-Z]{5}\$" ; ex:source "WCO" . ex:Req_XML_Consignee a ex:Requirement ; ex:domain ex:Consignee ; ex:property ex:identifier ; ex:minCount 1 ; ex:datatype xsd:string ; ex:source "WCO" . ex:Req_XML_DangerousGoods a ex:Requirement ; ex:domain ex:DangerousGoods ; ex:property ex:imoClass ; ex:minCount 1 ; ex:source "WCO" .

SHACL language, that is used to describe the Shapes is intended to perform the validation (quite complex!), but still, there is lack of option to compare two shape sets directly or to produce the «match/differs» out of the box. To solve this, we need to add a post-processing

step, that uses SHACL rules and SPARQL layer.

Let validate our requirements using the Shapes mechanism against the semantic graph with the requirements.

Here is the sample of the shapes, that allows us to find matched, non-matched and partially matched requirements (we assume that requirements match partially if the properties are the same, but constraints are different).

Table 3 – Sample shapes for the requirements validation

Match Rule	Non-match Rule	Partial match Rule
<pre>@prefix sh: <http://www.w3.org/ns/shacl#> . ex:RequirementComparisonShape a sh:NodeShape ; sh:targetClass ex:Requirement ; sh:rule [a sh:SPARQLRule ; sh:construct """ CONSTRUCT { ?this ex:matches ?other . } WHERE { ?this ex:source "EDIFACT" ; ex:domain ?d ; ex:property ?p . ?other ex:source "WCO" ; ex:domain ?d ; ex:property ?p . } """ ;] .</pre>	<pre>ex:UnmappedWCOShape a sh:NodeShape ; sh:targetClass ex:Requirement ; sh:rule [a sh:SPARQLRule ; sh:construct """ CONSTRUCT { ?this ex:notMapped true . } WHERE { ?this ex:source "WCO" ; ex:domain ?d ; ex:property ?p . FILTER NOT EXISTS { ?other ex:source "EDIFACT" ; ex:domain ?d ; ex:property ?p . } """ ;] .</pre>	<pre>ex:PartialMatchShape a sh:NodeShape ; sh:targetClass ex:Requirement ; sh:rule [a sh:SPARQLRule ; sh:construct """ CONSTRUCT { ?this ex:partiallyMatches ?other . } WHERE { ?this ex:source "EDIFACT" ; ex:domain ?d ; ex:property ?p . ?other ex:source "WCO" ; ex:domain ?d ; ex:property ?p . FILTER EXISTS { ?other ex:pattern ?pattern } """ ;] .</pre>

The example of the result graph for our requirements is presented here:

- ex:Req_EDI_LOC ex:matches ex:Req_XML_LOC .
- ex:Req_EDI_Consignee ex:matches ex:Req_XML_Consignee .
- ex:Req_XML_DangerousGoods ex:notMapped true .
- ex:Req_EDI_LOC ex:partiallyMatches ex:Req_XML_LOC.

That is a part of the requirements alignment knowledge graph, where SHACL rules describes alignment engine, RDF is used to define the requirement model and SPARQL is used as a reasoning layer.

The SPARQL query will return the target list of the differences:

```
SELECT ?req
WHERE {
  ?req ex:notMapped true .
}
```

We have created a list of requirements that are not matched fully and thus need to be transformed. Advantage of such approach is a formal separation of the design-time requirements

alignment and the data transformation while we treat requirements as a data, not touching the real data at the same time.

Here is important to mention the difference between concepts of the requirements validation and requirements application.

The Validation refers to the process of verifying whether an RDF graph (a set of triples) conforms to a predefined set of structural and semantic constraints.

So, the Requirements Validation is considered as a mapping of the requirements, described as a set of triples, with a predefined set of structural and semantic constraints (that are also described as sets of triples). Thus, one set of the requirements acts as constraint for another set of the requirements, making it possible to verify the compatibility of such sets.

In the same time, Application of the Requirements is considered as implementation of the structural and semantic constraints, described as requirement properties to the target node (triple) of the RDF graph, that results such state of this node, that validation of this requirement against this node will always return true.

While some of the requirements can be transformed using the tools of the semantic graph itself (like format conversion), other requirements will require more complex specific converters (like specific digital signature application, for example) that considered as external «black boxes» for such requirements. As we have discussed in the previous work, that also could be «blue boxes» or open code to keep sovereignty on the data while performing a transformation.

Conclusion. The aim of this article to show the approach, how it is possible to describe the requirements for the dataset, that is already presented as a part of the semantic graph, in the form of the same semantic graph. Then such requirements are treated as a “data” and canonical graph tools like shapes can be used to validate such requirements and to create a list of the non-matched requirements. While keeping the relationship between each requirement and core ontology, it is possible to describe the transformation of some of these requirements as a SPARQL query, while more complex requirements will require the specific convertors. The assessment on this topic is to be continued to focus on the topic of the requirements classification and requirements application to create an interface transformation model.

REFERENCES

1. Eveline van Stijn, Bram Kleivink, Martijn Janssen and Yao-Hua Tan, Enhancing business and government interactions in global trade, Conference: Third International Engineering Systems Symposium. CESUN 2012, https://www.researchgate.net/publication/233758106_Enhancing_business_and_government_interactions_in_global_trade
2. Philipp Liegl, Christian Huemer, Marco Zapletal, Towards a global business document reference ontology, https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_177763.pdf. DOI: 10.1007/978-3-642-02144-2_32
3. Dmytro Iakymenkov, Galyna Roizina, Yehor Zudikhin, Mykola Malaksiano, Utilizing Semantic Graphs to Enhance Efficiency and Security in Data Exchange within the Maritime Transportation System, Maritime Systems, Transport and Logistics I, p.213-233, Studies in Systems, Decision and Control ((volume 580)), DOI: 10.1007/978-3-031-82027-4
4. Sergey Bushuyev, Andrii Ivko, Dmytro Iakymenkov, Galyna Roizina, Mykola Malaksiano, Application of the Data Pipeline Concept for Improving the Transport Corridors' Efficiency, Conference papers, DTESI 2023: Proceedings of the 8th International Conference on Digital Technologies in Education, Science and Industry, December 06–07, 2023, Almaty, Kazakhstan, CEUR Workshop Proceedings ceur-ws.org, ISSN 1613-0073
5. CLECAT, Data Pipelines: Innovation in Supply Chain Visibility, David Hesketh, https://www.clecat.org/media/David_Hesketh.pdf
6. The United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), Data Pipeline Project.

https://unece.org/fileadmin/DAM/cefact/cf_forums/2019_Geneva/T_L_DataPipeline2019.pdf

7. Iovka Boneva, Jérémie Dusart, Daniel Fernández Alvarez, Jose Emilio Labra Gayo. Semi Automatic Construction of ShEx and SHACL Schemas, <https://hal.science/hal-02193275/>

8. Iovka Boneva, Jose G Labra Gayo, Eric G Prud 'Hommeaux. Semantics and Validation of Shapes Schemas for RDF, <https://hal.science/hal-01590350v1>

ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ТА АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ПОТОКОВОГО ЗАХОПЛЕННЯ МЕДІАДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Шишкевич Я.Р., Цімовська А.О.
Одеський ліцей №117 Одеської міської ради
(Україна)

Вступ. Сьогодні онлайн-комунікація, стрімінг, освіта та комп'ютерні ігри є невід'ємною частиною сучасного цифрового світу. Проте стандартні інструменти часто мають високі системні вимоги, складний інтерфейс, не дозволяють кастомізації під конкретні задачі. У роботі розглянуто проблему створення ефективного інструменту для потокового захоплення відео та аудіо в реальному часі з використанням карти відеозахоплення.

Актуальність дослідження зумовлена потребою в легковажних, швидких і стабільних рішеннях для моніторингу HDMI-сигналу, де професійні програми типу OBS Studio є надмірно ресурсоемними та складними. Метою роботи є розробка та аналіз продуктивності програми CCard на мові Python, яка забезпечує мінімальну затримку відтворення, низьке навантаження на систему та простоту використання.

Для досягнення поставленої мети в роботі визначено такі основні завдання. По-перше, проведено порівняльний аналіз архітектурних рішень сучасних фреймворків для обробки відеопотоків, зокрема WebRTC, DirectShow та AVFoundation. По-друге, розроблено багатопотоковий алгоритм синхронізації відео- та аудіоданих, спрямований на зменшення навантаження на центральний процесор. По-третє, експериментально встановлено залежність споживання системних ресурсів (CPU та оперативної пам'яті) від параметрів вхідного потоку, зокрема роздільної здатності та частоти кадрів. Крім того, проведено порівняльний аналіз затримки сигналу розробленого програмного забезпечення та професійних засобів трансляції.

Нині доступно багато різноманітних програм для захоплення та обробки відеопотоків і звуку. Вони суттєво відрізняються за функціональними можливостями, швидкістю роботи, рівнем інтеграції з іншими системами та зручністю використання для різних категорій користувачів. Аналіз сучасних технологій та програмних рішень показав, що більшість з них мають суттєві обмеження (висока ресурсоемність, затримки, складність і брак простоти), які ускладнюють використання для простих і швидких задач. Тому було створено програму на мові Python, яка може виводити зображення з ігрової консолі (PS3) на монітор персонального комп'ютера без прямого підключення до монітору. Для цього використовується карта відеозахоплення — пристрій, який перетворює будь-який гаджет із відеовиходом (смартфон, планшет, ігрова консоль, ПК тощо) на повноцінну веб-камеру для комп'ютера. Джерелом відео може бути не лише вбудована камера, а й зовнішнє зображення через HDMI/USB. Ми дали назву нашій розробці — CCard. Коротко роботу застосунку можна так описати: після запуску програми CCard автоматично завантажуються налаштування з файлу settings.json (мова інтерфейсу, тема оформлення, роздільна здатність, цільовий FPS та інші параметри), після чого створюється головне вікно на базі PyQt6 із центральною областю відображення відеопотоку та панеллю керування (вибір камери, мікрофона, кнопки Debug, Fullscreen, Settings). За допомогою OpenCV запускається захоплення відео з камери, а SoundDevice — аудіо з мікрофона з можливістю моніторингу в реальному часі; у Windows додатково використовується ruwin32 та Pygrabber для коректного визначення пристроїв. У фонових потоках здійснюється обробка відео й аудіо та моніторинг підключених пристроїв, паралельно оновлюється статистика (FPS, CPU, RAM). У центральній частині відображається живий відеопотік, а зміна параметрів, пристроїв або режиму роботи застосовується майже миттєво без необхідності перезавпуску програми.

Експериментальне тестування програми CCard проводилося з метою оцінки її

продуктивності, стабільності та затримки сигналу при захопленні відео та звуку з карти відеозахоплення в реальному часі. Тестування здійснювалося на персональному комп'ютері з такими характеристиками(апаратна частина):центральний процесор (CPU): Intel Core i5-8400;оперативна пам'ять (RAM): 16 ГБ DDR4; графічний процесор (GPU): RTX 3050 8 GB; карта відеозахоплення: DTV Video Capture Card (інтерфейс USB 2.0, підтримка захоплення до 4K 30 FPS та 1080p 30 FPS , 720p 60 fps) та вхідний сигнал: HDMI.

Щодо програмної частини, то вона складається з: операційна система: Windows 11,інтерпретатор Python: Python 3.14.3. Були використані основні бібліотеки: OpenCV 4.13.90, SoundDevice 0.5.5, PyQt6 6.10.2 , psutil 7.2.2 (моніторинг системних ресурсів (CPU, RAM, GPU)) та numpy 2.4.2 (обробка масивів даних).

У ході експерименту вимірювалися такі ключові параметри:

1. Затримка сигналу – час від появи кадру на вихідному пристрої до його відображення в програмі CCard. Вимірювалося методом «екран - екран» за допомогою високоточний цифровий таймер (точність 1 мс), виведений на вихідний монітор.

2. Завантаженість CPU – середнє відсоткове використання центрального процесора за 60 секунд стабільної роботи.

3. Стабільність кадрової частоти (FPS jitter).

Результати досліджень представлені у таблицях 1-3.

Таблиця 1 – Навантаження системи при різних роздільних здатностях програми Card

Роздільна здатність	FPS	Споживання CPU, %	Затримка, мс
720p (1280×720)	60	10–15	8,4
1080p (1920×1080)	30	18–19	16,3

Таблиця 2 – Вплив кодека на продуктивність

Кодек	Споживання CPU, %	Стабільна частота кадрів FPS
MJPEG	15–20	60
YUY2	2,5–2,8	8–10

Таблиця 3 – Вплив розміру буфера на затримку та стабільність зображення (1080p 60 FPS)

Розмір буфера	Діапазон затримки, мс	Середнє значення затримки, мс	Розкид затримки, ± мс
1	6–11	8,6	1,7
50	4–11	8,8	2,1
100	7–11	8,8	1,5

Для оцінки стабільності та ефективності програми CCard на різному обладнанні проведено порівняльне тестування на трьох конфігураціях середньої та нижчої потужності. Тестування здійснювалося при фіксованій роздільній здатності 720p і частоті 60 FPS (кодек MJPG) у режимі «чистого» моніторингу без запису чи стрімінгу. Результати наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати тестування CCard на різних апаратних платформах

Параметри	Конфігурація 1	Конфігурація 2	Конфігурація 3
Процесор (CPU)	Intel Core i5–8400	Intel Core i3–9100	Intel Core i7–4800QM (i5–750)
Оперативна пам'ять (RAM)	16 ГБ DDR4 2666 МГц	16 ГБ DDR4 3200 МГц	8 ГБ DDR3 1600 МГц

Навантаження на CPU	10–15 %	23–27 %	24–25 %
Затримка відтворення	8,4 мс	9,6 мс	16,6 мс

Результати тестування показали, що продуктивність CCard залежить від апаратної конфігурації системи. Найкращі показники за навантаженням на процесор та затримкою відтворення продемонструвала Конфігурація 1 – мінімальне навантаження на CPU та найменша затримка.

Для оцінювання ефективності використання оперативної пам'яті було проведено порівняльне тестування розробленого застосунку CCard та програмного забезпечення OBS Studio за ідентичних умов. Результати наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 – Порівняльний аналіз CCard та OBS Studio за основними метриками

Критерій	CCard	OBS Studio
Споживання оперативної пам'яті (RAM)	85–97 МБ	до 120 МБ
Затримка виводу зображення на екран	8–9 мс	10–12 мс
Швидкість запуску програми	3,8 с	4 с

Висновки. Отже, розроблена програма CCard продемонструвала високу стабільність роботи при 60 FPS: затримка відтворення стабільно тримається в межах 8–9 мс, розкид не перевищує $\pm 2,9$ мс, а пікове навантаження на CPU не піднімається вище 20%. На відміну від OBS Studio, яка орієнтована на професійний стрімінг, запис і складні ефекти, CCard створена саме для простих і швидких сценаріїв, де критичні мінімальна затримка, низьке споживання ресурсів та миттєвий запуск роблять її ефективним інструментом для швидкого моніторингу HDMI-сигналу на середньому обладнанні. Розроблене ПЗ має практичну цінність для освітніх, геймерських, лабораторних та діагностичних сценаріїв (моніторинг ігрових консолей, мікроскопів, ендоскопів, HDMI-джерел тощо). Крім того, програма може бути ефективно використана в суднопластві — для систем моніторингу на мості, дистанційного керування автономними суднами (MASS), спостереження за акваторією, роботи з ROV (підводними апаратами) та підвищення ситуаційної обізнаності екіпажу в реальному часі. Розроблене ПЗ може слугувати основою для подальших розширень, таких як запис відео, мережева трансляція чи інтеграція з AI-обробкою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кравчук О. М., Пістун І. П. Цифрова обробка сигналів та мультимедіа. – Київ: НТУУ «КПІ», 2022.
2. Марченко І. Програмування мультимедійних застосунків мовою Python. Київ: КНЕУ, 2022.
3. FFmpeg Official Documentation. URL: <https://ffmpeg.org/documentation.html>.
4. OBS Studio Documentation. URL: <https://obsproject.com/wiki/>.
5. Real-Time Video Processing with OpenCV and Python. Medium, 2024. –URL: https://medium.com/@stephen_vp/real-time-video-processing-with-opencv-and-python-2024-guide.

APPLICATION OF INTELLIGENT SYSTEMS IN MARITIME DECISION SUPPORT

Tkachenko M. H., Chibirdin I. O.
Odesa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. Maritime transport is a large-scale socio-technical system in which navigation safety, fuel efficiency, port coordination, and regulatory compliance intersect under continuous uncertainty. Traditional decision support systems in shipping have relied on deterministic models and fixed business rules. These tools are effective when operating conditions are stable and system boundaries are well defined. However, modern maritime operations increasingly involve non-stationary weather dynamics, volatile logistics demand, rapidly changing geopolitical constraints, and high-dimensional data streams from onboard and shore-side sensors. Against this background, the concept of an intelligent system becomes central to the development of maritime decision support [1, 2].

In this study, an intelligent system is understood as a computational system that addresses tasks historically delegated to human operators: tasks requiring evolving knowledge, contextual adaptation, and workflows that cannot be reduced to rigid predefined patterns. Conventional automated systems, by contrast, execute precise predefined algorithms without meaningful contextual reasoning. Over the last five years, AI-based decision systems have moved from pilot projects to mainstream adoption in maritime and adjacent industries. Commercial enterprises and non-profit organizations increasingly report that AI-enabled decision systems can adapt faster to real-world operational drift than static rule engines because they generalize from heterogeneous evidence. Despite substantial capability growth, reliability, transparency, and lifecycle governance remain difficult engineering challenges.

Relevance of the Research. The relevance of the research is determined by the growing complexity of maritime decision-making across operational, tactical, and strategic horizons. On short horizons, officers and dispatch teams handle safety-critical choices under time pressure. On medium horizons, operators optimize schedules, fuel consumption, cargo flows, and maintenance windows. On long horizons, management evaluates investment portfolios, fleet composition, geopolitical exposure, and resilience strategies. A single decision support architecture must therefore process diverse data types, handle uncertainty, and remain interpretable to stakeholders with very different roles. In such conditions, conventional automation approaches are often insufficient. Rule-based systems degrade when operating conditions shift beyond predefined logic, while classical optimization may produce fragile solutions when assumptions about demand, weather, or infrastructure availability are violated [1, 3].

The relevance is also strengthened by the rapid expansion of AI-supported maritime analytics. Current literature and industrial practice show a shift from static, handcrafted feature systems toward data-driven pipelines that continuously update from vessel telemetry, weather feeds, AIS traces, market indicators, and maintenance records. In this transition, deep learning has become a default option for tasks with sufficient labeled history, especially anomaly detection, trajectory prediction, and multi-factor performance estimation. At the same time, the same body of evidence consistently emphasizes that data quality is the primary success factor. Label noise, sensor drift, missing observations, and weak synchronization between technical and business datasets can rapidly eliminate measured performance advantages.

Problem Statement. The core problem is to design maritime decision support systems that preserve the adaptability of expert reasoning while retaining computational consistency and auditability. Maritime decision problems can be categorized into five areas: risk and situation assessment; forecasting and estimation; optimization and control; knowledge work with unstructured text; and human-AI teaming and assurance. This decomposition clarifies where

specific AI methods create value and where governance mechanisms are mandatory. It also helps avoid a common implementation mistake: deploying one model family to all tasks regardless of task structure, data regime, and consequence severity.

Thus, the practical research question may be stated as follows: how should intelligent systems be architected and governed to improve maritime decision quality across these five categories while controlling instability, opacity, and operational cost? Addressing this question requires both technical method selection and institutional design choices.

Main Material. Current literature and industrial practice demonstrate rapid growth in AI-supported maritime analytics. Deep learning is increasingly used in anomaly detection, trajectory prediction, and performance estimation. Reinforcement learning is expanding into agentic decision-making tasks because it directly models sequential interaction under delayed rewards, which is relevant for routing policies, dynamic speed control, and resource allocation under uncertainty. However, reward misspecification, sparse feedback, and sim-to-real gaps can create unsafe policy behavior if assurance mechanisms are weak. In parallel, large language models are emerging as generalist reasoning and interface layers. They are useful not as replacements for numerical forecasting engines, but for synthesizing regulations, summarizing incident reports, drafting procedural guidance, and supporting communication between technical and non-technical teams. Their practical value is strongest when integrated with retrieval, validated data sources, and explicit human approval checkpoints [2, 3].

A robust intelligent decision support stack for maritime operations can be organized as a layered architecture. The first layer is data engineering: ingestion, validation, temporal alignment, feature governance, and lineage control. The second layer is model services: specialized predictors, optimization modules, and language-enabled knowledge tools. The third layer is orchestration and assurance: uncertainty estimation, rule constraints, fallback strategies, and human override channels. Method selection should follow task structure rather than algorithm trends. For risk and situation assessment, ensemble classifiers and probabilistic sequence models are often effective because calibrated uncertainty is as important as point accuracy. For forecasting and estimation, deep neural networks perform strongly when training data are abundant and stationarity assumptions are monitored. For optimization and control, hybrid methods that combine predictive models with mathematical optimization or reinforcement learning can yield better operational utility than pure prediction pipelines. For knowledge work on unstructured text, LLM-based assistants should be treated as cognitive interfaces rather than autonomous authorities. Recommended practice is to ground generated outputs in verified corpora and require explicit citation or trace links to source documents. In high-stakes contexts, model outputs should be interpreted as decision hypotheses requiring expert confirmation. Human-AI teaming is not a secondary feature; it is the primary reliability mechanism. Interfaces should present confidence ranges, alternative scenarios, and key causal factors in language usable by bridge teams, planners, and management simultaneously. Escalation logic should define when recommendations are advisory, when dual confirmation is required, and when automatic execution is prohibited. Assurance should include stress testing on edge cases, adversarial validation, and continuous post-deployment monitoring for concept drift.

The strongest evidence for intelligent systems in maritime domains is concentrated in several application families. First, operational monitoring and tuning can improve vessel efficiency through adaptive control suggestions, condition-aware maintenance planning, and near-real-time anomaly detection. Second, operational planning benefits from integrated route support that combines weather forecasts, port congestion signals, fuel economics, and constraint-aware scheduling. Third, strategic forecasting can support scenario analysis, including macroeconomic shocks and geopolitical disruptions that influence fleet utilization and trade corridors. A fourth high-impact application area is regulations and compliance work. Maritime transport is heavily constrained by safety, environmental, customs, labor, and reporting obligations. Intelligent systems can support or partially automate documentation workflows,

support first-pass safety and compliance checks, and accelerate regulatory case handling such as legal inquiries, audit preparation, and evidence collection. LLM-enabled tools can also track and analyze updates in regulatory texts to support legal and compliance teams, improving response speed while reducing procedural and legal risk.

At the same time, these benefits coexist with substantial risk. One major risk is AI instability: model outputs can fluctuate under minor data perturbations or regime shifts, creating brittle decisions if confidence and fallback logic are absent. A second risk is opacity: many high-performing models are difficult to interpret, which complicates legal accountability and weakens operator trust. A third risk is over-delegation, where AI recommendations are allowed to replace expert judgment in high-consequence decisions even though AI systems do not carry legal or professional responsibility and can still fail. A fourth risk is task-model mismatch: applying AI to problems where trained experts or deterministic software would be safer, faster, or more reliable in practice. Using LLMs introduces a separate class of security risks, including prompt injection and safeguard bypass attacks. Therefore, LLM-enabled components should be isolated by least-privilege design, strict tool permission boundaries, and continuous security monitoring. Beyond model risks, deployment faces structural challenges related to regulation, data availability, and long-term cost. The EU AI Act (Regulation 2024/1689) imposes substantial documentation, oversight, and accountability requirements on high-risk AI systems; some safety-critical maritime AI applications may fall into this category depending on their function, deployment context, and regulatory classification.

A realistic deployment program should begin with a bounded pilot instead of enterprise-wide automation. The first stage is domain scoping: selecting one high-value decision problem with measurable operational outcomes. The second stage is data qualification and governance hardening. The third stage is model and policy co-design, with shadow mode deployment before operators are asked to depend on recommendations. The fourth stage is human factors integration, where interfaces must align with cognitive workflows on the bridge and in shore control rooms. The fifth stage is governance at scale, including versioning, rollback procedures, recalibration, incident postmortems, and independent review for high-impact updates. An evaluation framework should combine predictive quality metrics, decision utility metrics, robustness metrics, human factors metrics, and governance metrics. For maritime decision support, the true unit of success is the combined socio-technical system, not the model in isolation.

Research Results. The analysis shows that intelligent systems represent a meaningful evolution of maritime decision support because they can process heterogeneous signals, generalize beyond rigid rule templates, and assist across operational and strategic horizons. Their strongest practical value appears when task-model alignment is explicit: specialized deep learning for data-rich prediction tasks, reinforcement learning for selected sequential control problems, and LLM-based tools for structured knowledge work under supervision. The analysis also demonstrates that data quality remains the dominant determinant of success, while instability, opacity, and lifecycle cost remain central barriers to trustworthy deployment. Therefore, implementation strategy should emphasize layered architecture, human-AI teaming protocols, and assurance-by-design rather than isolated model optimization.

The analysis also confirms that technical metrics alone are insufficient for evaluation. Error, calibration, and drift rate should be paired with process metrics such as review latency, override frequency, and incident recovery time. Governance boards should include domain experts, data scientists, and compliance stakeholders. In this model, performance is defined not by accuracy alone, but by safe operational usefulness under realistic operating constraints. The viable paradigm is not “AI versus experts,” but expert-centered augmentation, where intelligent systems expand the decision bandwidth of human teams while preserving authority over high-consequence actions.

Conclusions. Intelligent systems have significant potential in maritime decision support

because they can improve planning, monitoring, optimization, regulatory analysis, and strategic reasoning in environments characterized by uncertainty and data complexity. However, high reported model performance does not eliminate foundational constraints. Reliable deployment depends on data governance, interpretability, lifecycle control, human oversight, and institutional accountability. Future work should focus on standardized maritime evaluation benchmarks, robust uncertainty communication for operators, and governance patterns compatible with international regulatory frameworks. With these elements in place, intelligent systems can move from experimental add-ons to dependable components of maritime decision ecosystems.

REFERENCES

1. Munim, Z. H., Dushenko, M., Jimenez, V. J., Shakil, M. H., & Imset, M. (2020). Big data and artificial intelligence in the maritime industry: a bibliometric review and future research directions. *Maritime Policy & Management*, 47(5), 577–597. <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1788731>.
2. Tijan, E., Jović, M., Aksentijević, S., & Pucihar, A. (2021). Digital transformation in the maritime transport sector. *Technological Forecasting and Social Change*, 170, 120879. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120879>.
3. Vu, V., Le, P., Do, T., Nguyen, T., Tran, N., Paramasivam, P., Le, T., Le, H., & Chau, T. (2024). An insight into the Application of AI in maritime and Logistics toward Sustainable Transportation. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 8(1), 158–174. <https://doi.org/10.62527/joiv.8.1.2641>.

СЕКЦІЯ:
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В СУДНОПЛАВСТВІ
SECTION
INTELLIGENT TECHNOLOGIES AND DECISION-SUPPORT SYSTEMS IN
MARITIME SHIPPING

УДК 004.9

CONCEPTUAL MODEL OF THE NAVIGATOR'S INFORMATION FIELD

¹Nosov A., ²Nosov P., ²Malaksiano M.

¹Outlaw Eagle Manufacturing, Designer and Draftsperson
(Canada)

²Odesa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. In the current context of project oriented management and the Value Delivery System logic, maritime safety is increasingly less reduced to an isolated task of executing the correct manoeuvre or to local improvements of individual navigation instruments. The actual dynamics of vessel traffic in high density areas, in narrow waters, and under regulatory and operational constraints as well as risk tolerance requirements form a domain in which the decisive factor is not the mere availability of navigational information, but the navigator's capability to transform it into timely, justified, and verified managerial actions within a specific operation or project life cycle.

In such situations, a critical factor is the navigator's interaction with the information field as a set of data flows from onboard systems (ECDIS, AIS, GNSS, radar), regulatory requirements and standard operating procedures, coordination communications (VTS and radiotelephony), and contextual risk scenarios. It is within this field that the sequence of decision making micro operations is executed, including initial perception, integration of heterogeneous messages, assessment of risk and time constraints, action selection, and identification of the required level of decision support. Accordingly, the research focus evolves from analysing individual navigation parameters to formalising the interaction system "human, information field, decision support technologies", where the human factor is treated not as a descriptive characteristic but as a controllable resource within a project oriented approach.

Research relevance. The informatization of navigational watchkeeping has shifted decision making into the navigator's information space, where data are provided by ECDIS, GNSS and AIS, radar, alarm systems, voyage planning procedures, and internal rules. Studies on ECDIS reveal typical failure points during the digital transition, including incorrect safety settings, gaps in training, and operational malfunctions that become a risk factor in critical moments [1]. Analyses of accident cases confirm that errors manifest as a decrease in situational awareness and arise due to cognitive traps, while the problem is often addressed in an overly ECDIS centred manner [2]. Therefore, it is justified to extend the framework to an integrated field and to formalise how conflicts or excessive information flows affect decisions.

A separate line of research substantiates the need for interface standardization through S Mode as a means of reducing variability in presenting critical information and maintaining operator performance stability, although a formal description of the invariants of such presentation remains insufficient [3]. Data trust issues become more acute under cyber impacts, since spoofing can undermine the credibility of navigational data and transform into navigational risk, which requires explicit verification procedures and rules for source consistency [4]. From a methodological perspective, it is appropriate to treat the information environment as a system with variable uncertainty, understood as entropy, and to account for behavioural responses to information waves [5–6], which strengthens the need for a conceptual model «data, interface, trust, decision» in project oriented maritime safety management.

Main research content. Based on these premises, a conceptual model of the navigator's interaction within the project information field has been developed, aligning the managerial loop of the safety portfolio with the operational loop of vessel motion control (Fig. 1).

At the upper level, the value delivery system defines policies, accountability, risk and time thresholds, requirements for information quality and the operational readiness of decision

support tools, as well as escalation channels with stakeholders. The safety portfolio translates these requirements into practical instruments, including analytics, decision support and intelligent modules, thresholds, procedures, and training tools.

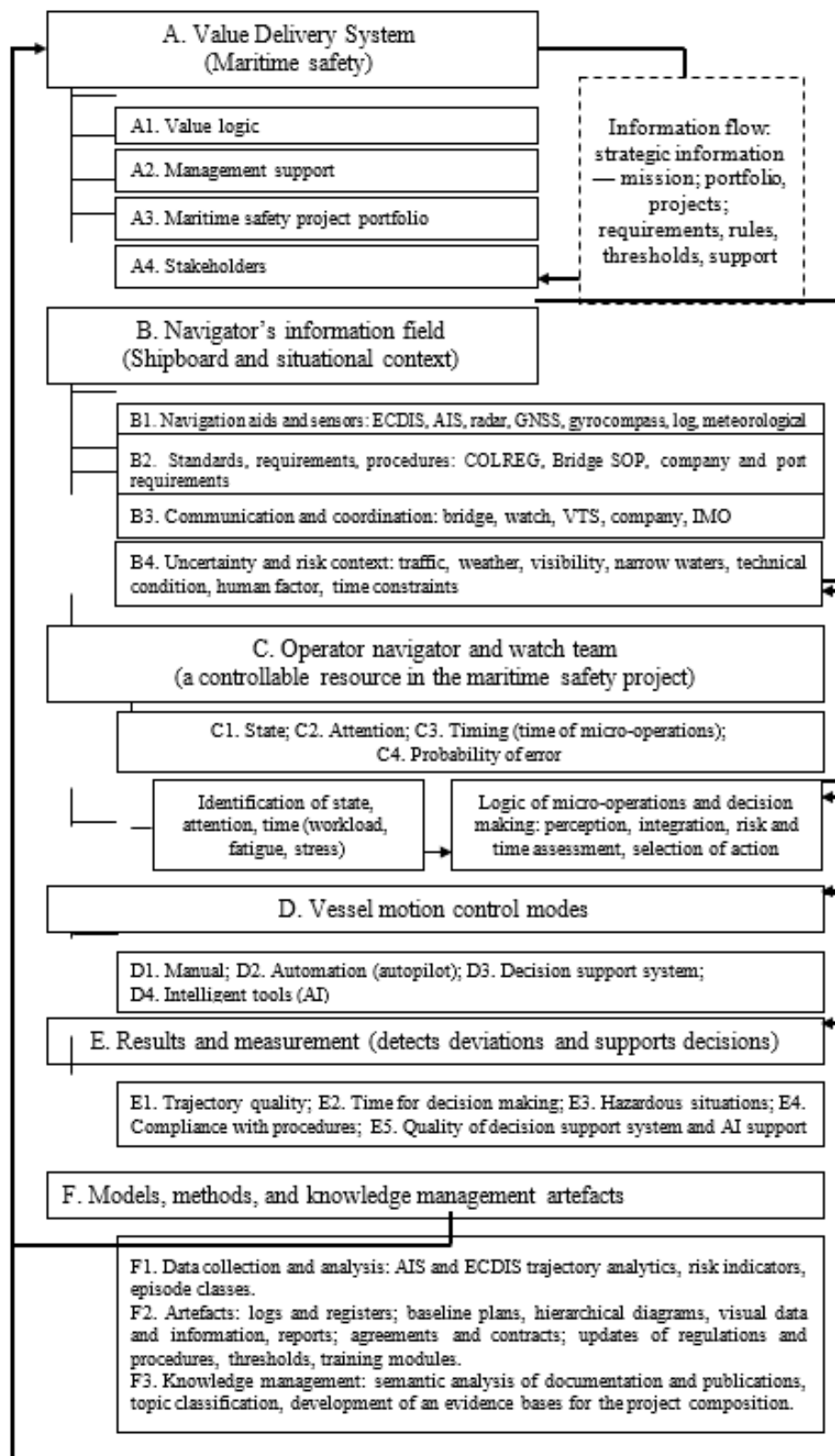


Figure 1 – Conceptual project-oriented model of the navigator’s information field loop

The core of the model is the navigator’s information field as a space of managerial decisions, formed by data from navigation systems and sensors, regulatory requirements,

coordination messages, and conditions of uncertainty and risk. The quality of this field, in terms of structure, timeliness, and internal consistency, determines the pace of decision making micro operations, namely perception, integration, risk and time assessment, selection of action and control mode, execution, and communications. The navigator and the watch team are treated as a controllable resource characterised by state, attention, motivation, timing, and error probability, which explains differences in control quality under the same external conditions.

Control modes are represented as a hierarchy ranging from manual control to automation, decision support systems, and intelligent tools, governed by switching and escalation rules based on risk, time, and uncertainty thresholds. The measurement loop converts the navigational process into controllable indicators, including trajectory quality, decision time, hazardous encounters, procedural compliance, and the quality of decision support, thereby closing the operational feedback loop and providing a basis for updating thresholds, procedures, and the portfolio composition. The transformation from data to knowledge and further to decisions is enabled by AIS and ECDIS trajectory analytics and by managerial artefacts, such as reports, registers, visualisations, regulations, and training modules, which support reproducibility and scaling of safety practices.

Conclusions. The developed conceptual project oriented model formalises the navigator's information field as an integrated and controllable environment in which situational awareness is formed and decision making micro operations are carried out. It substantiates a shift from fragmented instrument focused analyses to a systemic interaction of the human, the information field, and decision support technologies, where the quality, timeliness, and consistency of information flows determine the speed and reliability of control. The practical contribution of the model lies in defining rules for data trust and verification, threshold based switching and escalation of control modes, and a performance measurement loop, which together reduce decision entropy and the probability of watchkeeping errors under elevated risk.

REFERENCES

1. Hasanspahić N., Brčić D., Car M., Žuškin S. From Paper to Digital: The Impact and Hidden Challenges of Mandatory ECDIS on Maritime Safety and Seafarer Practice. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2025. Vol. 19, No. 1. P. 61–67. DOI: 10.12716/1001.19.01.08.
2. Barić M., Grbić L., Peričin L., Jelic R. The Role of the ECDIS on the Development of Situational Awareness – a Study on Grounding Accidents. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2023. Vol. 17, No. 1. P. 219–225. DOI: 10.12716/1001.17.01.24.
3. Mohamed E. A. E., Hosny M. M. Enhancing Safety of Navigation with ECDIS Standardization and S-Mode Adoption // *Maritime Research and Technology*. 2024. Vol. 3, No. 2. P. 117–130. DOI: 10.21622/MRT.2024.03.2.932.
4. Androjna A., Perkovič M. Impact of Spoofing of Navigation Systems on Maritime Situational Awareness. *Transactions on Maritime Science*. 2021. Vol. 10, No. 2. P. 361–373. DOI: 10.7225/toms.v10.n02.w08.
5. Bondar A., Bushuyev S., Bushuieva V., Onyshchenko S. Complementary Strategic Model for Managing Entropy of the Organization. *Proceedings of the 2nd International Workshop IT Project Management (ITPM 2021). CEUR Workshop Proceedings*. 2021. Vol. 2851. P. 293–302.
6. Bushuyev S., Babayev I., Bushuiev D., Bushuyeva N., Babayev J. Emotional Behavior in the «Infodemic vs. Panicdemic vs. Pandemic» modeling COVID-19. *Proceedings of the 2nd International Workshop IT Project Management (ITPM 2021). CEUR Workshop Proceedings*. 2021. Vol. 2851. P. 391–400.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛИВУ РОЗМІРНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН НА БЕЗПЕЧНУ ЕКСПЛУАТАЦІЮ ЗА КРИТЕРІЄМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСТІЙНОСТІ

Шумило О.М., Кононова О.М.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Розмірна модернізація морських пасажирських суден є важливим інструментом підвищення конкурентоздатності крізних компаній. Світовий круїзний флот налічує значну кількість таких суден, які можуть розглядатися кандидатами для проведення такого виду модернізації. Будь-який вид модернізації, що пов'язаний зі змінами в конструкції корпусу повинен оцінюватись з позицій безпеки судноплавства.

Актуальність дослідження. Збільшення розмірів судна за рахунок додавання циліндричної вставки впливає не тільки на міцність корпусу судна але й на його остійність, яка відіграє важливу роль для забезпечення безпеки пасажирів, судна і судноплавства і ефективності його експлуатації.

Постановка проблеми. Оцінка остійності ґрунтується на виконанні п'яти умов, що забезпечують її при різних видах експлуатації, стану погоди і поведінки пасажирів на верхній палубі – дотримання допустимих значень метацентричної висоти, кута крену, що викликається скупченням пасажирів на відкритій палубі біля одного з бортів, кут крену, що викликається спільною дією моментів крену, який виникає від скупчення пасажирів на верхній палубі і від руху на встановленій циркуляції; перевірки параметрів за діаграмою статичної остійності (ДСО); безпечної експлуатації за критерієм погоди. Разом з тим, метацентрична висота відіграє важливу роль при виникненні прискорень і сил інерції в корпусі судна (особливо пасажирського), що зумовило рядом дослідників провести класифікацію метацентричної висоти (точніше кажучи відносної метацентричної висоти) в такому діапазоні остійностей — недостатня, оптимальна, підвищена і надмірна. Це дає можливість створити математичну модель, що за розрахунковими значеннями остійності і згаданою шкалою визначати максимальну довжину судна, яка буде забезпечуватись необхідним критерієм остійності.

Показники остійності здійснюють вагомий вплив на техніко-експлуатаційні, економічні, безпекові фактори будь-якого цивільного судна [1–2]. Модель функціональності судна при проведенні розмірної модернізації, яка відповідає методу [2], передбачає при подовженні судна обов'язково оцінювати його остійність. Загальні вимоги до остійності регламентуються нормами Конвенції SOLAS 74/78, що знаходить відображення в документах провідних кваліфікаційних товариств (МАКТ- IACS) [1–12], в тому числі і Регістру судноплавства України.

Основний матеріал. Перша умова стосується забезпечення метацентричної висоти ґрунтується на тричленному рівнянню початкової метацентричної висоти [1–2]

$$h = z_c + r - z_g \geq h_{min}, \quad (1)$$

де z_c – апліката центру величини судна, м; r – метацентричний радіус, м; z_g – апліката центру ваги судна, м; h_{min} – мінімальне значення метацентричної висоти судна згідно правилу 2.3.1. [1–2].

Друга умова забезпечує кут крену, що викликається скупченням пасажирів на відкритій палубі біля одного з бортів (правило 3.1.2) [1–2],

$$\theta_1 = \frac{0,25 G_{pas} B}{\Delta h} \frac{180^\circ}{\pi} \leq 10^\circ \quad (2)$$

де G_{pas} – загальна вага пасажирів, що розміщуються на відкритій палубі, т, з урахуванням маси одного пасажиру 75 кг; B – ширина судна, м; Δ – водотонажність судна, т, зміна водотоннажності в залежності від подовження визначається згідно [1–2]; h –

метацентрична висота, м.

Третя умова полягає в тому, що кут крену, що викликається спільною дією моментів крену, який виникає від скупчення пасажирів на верхній палубі і від руху на встановленій циркуляції повинен задовольняти нерівність згідно правилу 3.1.3 [1–2]

$$\theta_2 = \frac{M_{кр1} + M_{кр2}}{\Delta h} = \frac{0,25 G_{pas} B + \frac{0,2 \Delta V_{0,8}^2 (z_g - \frac{d}{2})}{L_{wl}}}{\Delta h} \frac{180^\circ}{\pi} \leq 12^\circ \quad (3)$$

де L_{wl} – довжина судна по ватерлінії, м.

Четверта умова встановлює вимоги щодо перевірки параметрів за діаграмою статичної остійності (ДСО), послідовність якої здійснюється за Правилами класифікації та побудови морських суден (правила 2.2.1–2.2.5) [1–2]:

1) площа під додатною частиною діаграми статичної остійності повинна бути не менше ніж 0,055 м·рад до кута крену 30° і не менше ніж 0,09 м·рад до кута крену 40° або до кута заливання θ_f в залежності від того, який із них менший [1], що виражається у вигляді відповідної системи

$$A_{\theta_{max}} \geq \begin{cases} 0,07 \text{ м} \cdot \text{рад} & \text{при } \theta_{max} = 15^\circ \\ 0,055 \text{ м} \cdot \text{рад} & \text{при } \theta_{max} = 30^\circ \\ 0,055 + 0,001 (30 - \theta_{max}) & \text{при } 30^\circ \geq \theta_{max} \geq 15^\circ \end{cases} \quad (4)$$

де $A_{\theta_{max}}$ – площа діаграмами, що обмежується кривою відновлювальних плечей до максимального кута крену θ_{max} ;

2) площа обмежена між кутами крену 30° і 40°, або, у випадку, якщо кут заливаності θ_f менше ніж 40°, між 30° і кутом θ_f повинна бути не менше 0,03 м·рад [1], тобто записується у такому вигляді

$$A_{30^\circ \dots 40^\circ} \geq 0,03 \text{ м} \cdot \text{рад} \quad \text{при } \begin{cases} 30^\circ \leq \theta \leq 40^\circ \\ 30^\circ \leq \theta_f < 40^\circ \end{cases} \quad (5)$$

де $A_{30^\circ \dots 40^\circ}$ – площа діаграми статичної остійності, яка обмежується кривою відновлювальних плечей від 30° до 40°;

3) максимальне плече діаграми статичної остійності l_{max} повинне бути не менше 0,25 м для суден довжиною $L \leq 80$ м і 0,2 м для суден довжиною $L \geq 105$ м при куті крену $\theta \geq 30^\circ$ [1], тобто

$$l \geq 0,2 \text{ м при } \theta = 30^\circ \quad (6)$$

П'ята умова встановлює вимоги до безпечної експлуатації за критерієм погоди

$$K = \frac{M_{ДСО}}{M_v} \geq 1.$$

$M_{ДСО}$ – перекидальний момент, що визначається діаграмою статичної, динамічної остійності, кН·м; M_v – момент, що кренить судно від вітрового навантаження, кН·м.

$$M_v = 0,001 p_v A_v Z_v$$

де p_v – розрахунковий питомий тиск вітра, Па; A_v – площа парусності, м²; z_v – відстань від центру вітрильності до площини діючої ватерлінії, м.

Правилами класифікації та побудови морських суден унормовується вимога забезпечення остійності судна за критерієм погоди

$$K = \frac{b}{a} \geq 1 \quad (7)$$

де b , a – площі під кривою відновлювальних плечей за діаграмою статичної остійності (правило 2.1.2) [1].

Вказані умови забезпечення остійності, представлені рівняннями (1)–(7), входять в модель функціональності судна при збільшенні його корпусу п.2.3. і п.2.5.

На додаток до викладеного необхідно підняти питання щодо впливу подовження судна на його метацентричну висоту. Дійсно, згідно рівнянню (1) метацентричну висоту

визначають аплікати центру величини, центру ваги і метацентричний радіус. Подовження судна за рахунок додавання додаткової циліндричної вставки призведе до наступних змін, що дозволить переписати рівняння (1) у вигляді

$$h = (z_{c0} + \Delta z_c) + (r_0 + \Delta r) - (z_{g0} + \Delta z_g) \geq h_{min}, \quad (8)$$

де Δz_c – приріст аплікату центру величини судна, м; Δr – приріст метацентричного радіусу, м; Δz_g – приріст аплікату центру ваги судна, м.

Враховуючи, що дослідження [2] зміни метацентричної висоти зручно проводити у відносних одиницях, виконаємо дослідження відносної метацентричної висоти $\bar{h} = h/B$, тобто рівняння (8) запишеться у вигляді

$$\bar{h} = \frac{B}{V} \left[V_0(z_{c0} - z_{g0}) + V_b z_{c\Delta L} + J - \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n \Delta G_i z_{gi} \right] \geq h_{min}, \quad (9)$$

де V – об’ємна водотоннажність судна після подовження, м³; V_0 – об’ємна водотоннажність судна до подовження, м³; z_{c0} – апліката центру величини судна до подовження, м; z_{g0} – апліката центру ваги судна до подовження, м; V_b – об’ємна водотоннажність циліндричної вставки, м³; $z_{c\Delta L}$ – апліката центру величини вставки, м; J – поперечний момент інерції площі вантажної ватерлінії, м⁴; ρ – густина морської води, т/м³; ΔG_i – додаткова вага, т; z_{gi} – апліката центру ваги, м.

На рис. 1 показано результати розрахунків відносної метацентричної висоти $\bar{h} = h/B$ за формулою (9) в залежності від довжини вставки на прикладі лайнерів «AIDA» і «Corebbean Princes», з якого видно, що графіки $\bar{h}$ зі збільшенням відносної довжини $\bar{L}$ монотонно зростають і мають точки перетину з прямою $y = (h/B)_{max}$, яка є границею для рекомендованих зон остійності. За рекомендаціями професора А.В. Броннікова це – зони недостатньої, оптимальної, підвищеної і надмірної остійності, за його пропозицією $y = (h/B)_{max} = 0,08$. Важливий висновок, який можна зробити, аналізуючи цей графік, що, використовуючи абсциси точок перетину графіків з $y = (h/B)_{max}$, можна визначити відносні граничні довжини суден за критерієм забезпечення погодженого значення остійності. Нове значення остійності погоджується Регістром, суднобудівним підприємством, що проводить модернізацію, і судновласником. Такі довжини включаються до функції обмеження в математичній моделі модернізації судна [13, 15, 16].

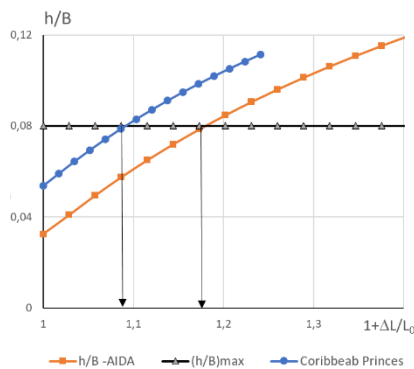


Рисунок 1 – Залежність відносної метацентричної висоти лайнерів «AIDA» і «Corebbean Princes» від відносної довжини при подовженні корпусу

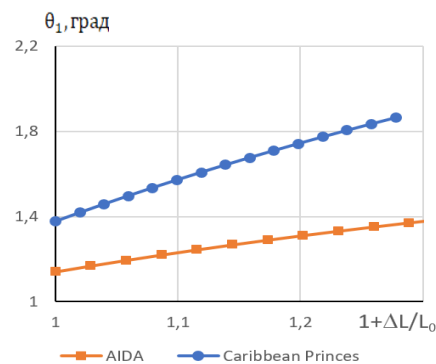


Рисунок 2 – Залежність кута крену, що викликається скупченням пасажирів на верхній палубі біля одного з бортів при збільшенні довжини для суден

Ґрунтуючись на викладених міркуваннях, перепишемо рівняння (2) з застосуванням виразу (9), в результаті чого отримаємо вираз

$$\theta_1 = \frac{0,25 G_{pas} B}{\Delta \frac{1}{V} \left[V_0(z_{c0} - z_{g0}) + V_b z_{c\Delta L} + J - \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n \Delta G_i z_{gi} \right]} \frac{180^\circ}{\pi} \leq 10^\circ \quad (10)$$

Кількість пасажирів на відкритій палубі можна визначити за рівністю

$$N_{pas} = N_{pas0} + \Delta N_{pas} = N_{pas0} + \Delta N_{\Delta L} n_{dec} \Delta L, \quad (11)$$

де N_{pas0} – кількість пасажирів, що розміщуються біля борту на відкритій палубі до подовження судна; ΔN_{pas} – додаткова кількість пасажирів, що розміщуються біля борту на відкритій палубі циліндричної вставки; $\Delta N_{\Delta L}$ – кількість пасажирів, що може розміститися по довжині вставки, яка прирівнюється ширині каюти на одній палубі; n_{dec} – кількість пасажирських палуб; ΔL – довжина вставки, м.

З урахуванням формул (10) і (11) отримаємо рівняння для визначення кута крену, який викликається скупченням пасажирів на відкритій палубі біля одного з бортів

$$\theta_1 = \frac{0,25(N_{pas0} + \Delta N_{\Delta L} n_{dec} \Delta L) B}{\Delta \left[\frac{1}{V} [V_0(z_{c0} - z_{g0}) + V_b z_{c\Delta L} + J - \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n \Delta G_i z_{gi}] \right]} \frac{180^\circ}{\pi} \leq 10^\circ \quad (12)$$

Проаналізуємо характер змін кута крену, що викликається скупченням пасажирів на верхній палубі біля одного з бортів при додаванні додаткової секції. Результати розрахунку кута θ_1 в залежності від відносної довжини показні на рис. 1 на прикладі пасажирських лайнерів «AIDA» і «Caribbean Princes». Результати розрахунку кутів крену показують, що подовження судна і збільшення числа пасажирів (рис.3) не порушує умову неперебільшення кута $\theta_1 \leq 10^\circ$ при подовженні судна на 30%. Зростання кута крену при подовженні довжини корпусу в 1,3 рази складає 20% і 35% для лайнерів «AIDA» і «Caribbean Princes».

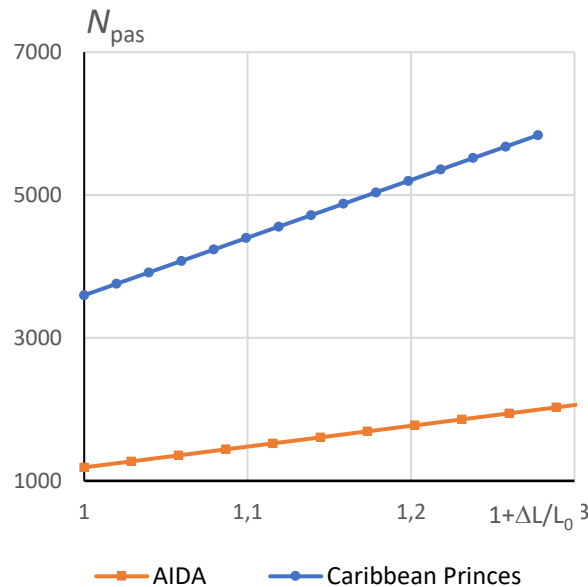


Рисунок 3 – Залежність числа пасажирів від відносної довжини судна

Спираючись на рівняння (3), (8), (11), отримаємо вираз для визначення кута крену, що викликається спільною дією моментів крену, який виникає від скупчення пасажирів на верхній палубі і від руху на встановленій циркуляції,

$$\theta_2 = \frac{0,25(N_{pas0} + \Delta N_{\Delta L} n_{dec} \Delta L) B + \frac{0,2 \Delta V_{0,8}^2 (z_g - \frac{d}{2})}{L_{wlo} + \Delta L}}{\Delta \left[\frac{1}{V} [V_0(z_{c0} - z_{g0}) + V_b z_{c\Delta L} + J - \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n \Delta G_i z_{gi}] \right]} \frac{180^\circ}{\pi} \leq 12^\circ. \quad (13)$$

Виконання умови (3) в наслідок подовження судна подано на рис. 4 А і Б), з якого можна зробити висновок, що збільшення довжини на 30% призводить до збільшення кута θ_2 на 5% («Caribbean Princes») і на 18% («AIDA») і в будь-якому випадку ця нерівність виконується.

Правила 2.1.4.1 Регістру [1] вимагають проведення обов'язкового розрахунку плеча вітрового кренувального моменту від тиску вітру

$$l_{w1} = \frac{p_v A_v Z_v}{1000 g \Delta}, \quad (14)$$

де p_v – тиск вітру, Па, для необмеженого району плавання складає $p_v = 504$ МПа, правило 2.1.4.1 [1]; A_v – вітрильна площа судна, м²; Z_v – плече вітрильності, яке дорівнює виміряній по вертикалі відстані від центра площі вітрильності до середини осадки судна, м; Δ – вагова водотоннажність судна, т.

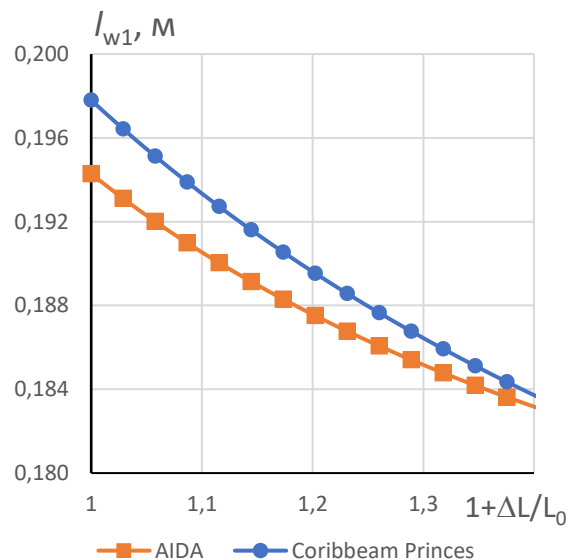
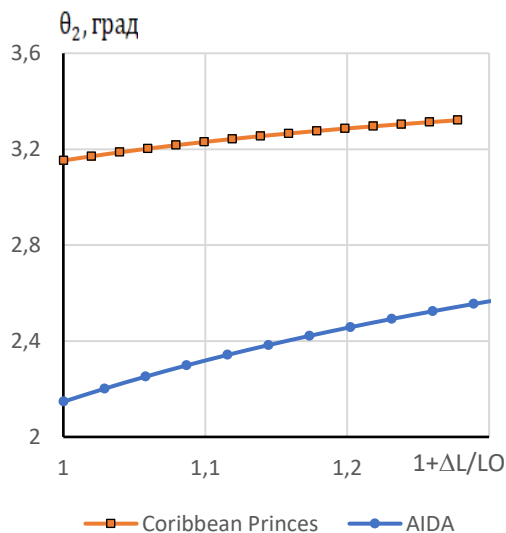


Рисунок 4. – Залежність кута крену, що викликається спільною дією моментів крену, який виникає від скупчення пасажирів на верхній палубі і від руху на встановленій циркуляції

Рисунок – Залежність плеча вітрового кренувального моменту від тиску вітру від подовження судна на прикладі суден «AIDA» і «Caribbean Princes»

Виконаємо аналіз впливу додавання циліндричної вставки на плече l_{w1} , в формулі (14) від подовження залежить вітрильна площа і водотоннажність судна, таким чином вона може бути трансформована у наступному вигляді

$$l_{w1} = \frac{p_v (A_v + \Delta A_{\text{вст}}) Z_v}{1000 g (\Delta_0 + \Delta_{\text{вст}})} \quad (15)$$

де $A_{\text{вст}}$ – вітрильна площа циліндричної вставки, м²;

$\Delta_{\text{вст}}$ – вагова водотоннажність циліндричної вставки, т, визначається з урахуванням досліджень [2].

Результати розрахунків плечей за формулою l_{w1} подані на рис. 5, з яких визначеною очевидністю випливає, що дані плечі зменшуються зі збільшенням довжини судна: при зростанні довжини в 1,4 рази вони зменшуються на 5,5% і 6,7%. Це означає, що згідно діаграми рис. 2.1.2.1 [1], кут статичного крену θ_{w1} буде зменшуватись – остійність покращуватись.

Алгоритм моделі визначення граничної довжини судна за критерієм, що відповідають вимогами безпеки при забезпеченні остійності судна показано на рис. 6, де умови 1–5 встановлюються вимогами Конвенції [14], умова 6 запропонована для досягнення оптимальних значень остійності з позицій забезпечення допустимих значень інерційних навантажень. Після етапів проєктування, виготовлення і монтажу у відповідності до вимог до п.1 правила 5 частини В-1 – Остійність, проводиться процедура кренування пасажирського судна [17], яке проводиться з метою остаточного визначення його остійності і визначення метацентричної висоти й аплікати центру тяжіння.

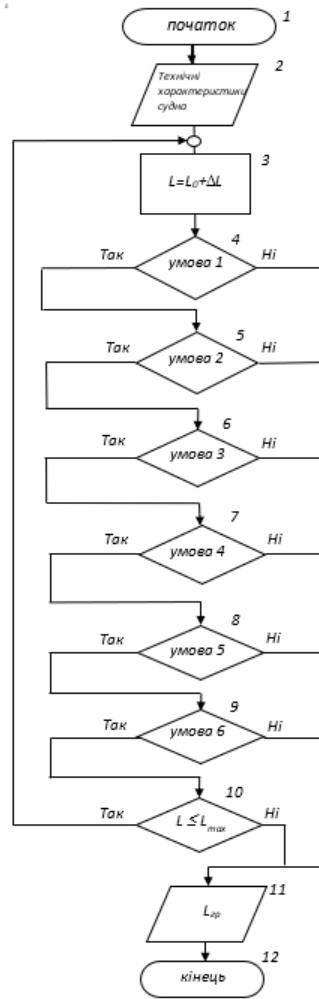


Рисунок 6 – Блок-схема моделі визначення граничного значення довжини судна за критерієм забезпечення остійності

Умова 1 – забезпечення метацентричної висоти $h = z_c + r - z_g \geq h_{min}$

Умова 2 – забезпечення кута крену, що викликається скупченням пасажирів на відкритій палубі біля одного з бортів

$$\theta_1 = \frac{0,25 G_{pas} B}{\Delta h} \frac{180^\circ}{\pi} \leq 10^\circ$$

Умова 3 – кут крену, що викликається спільною дією моментів крену, який виникає від скупчення пасажирів на верхній палубі і від руху на встановленій циркуляції повинен задовольняти нерівність

$$\theta_2 = \frac{\frac{G_{pas} B}{4} + \frac{0,2 \Delta V_{0,8}^2 \left(z_g - \frac{d}{2} \right)}{L_{wl}}}{\Delta h} \times \frac{180^\circ}{\pi} \leq 12^\circ$$

Умова 4 – перевірки параметрів за діаграмою статичної остійності (ДСО)

$$A_{\theta_{max}} \geq \begin{cases} 0,07 \text{ м} \cdot \text{рад}, \theta_{max} = 15^\circ \\ 0,055 \text{ м} \cdot \text{рад}, \theta_{max} = 30^\circ \\ 0,055 + 0,001 (30 - \theta_{max}) \\ 30^\circ \geq \theta_{max} \geq 15^\circ \end{cases}$$

$$A_{30^\circ \dots 40^\circ} \geq 0,03 \text{ м} \cdot \text{рад}$$

при $\begin{cases} 30^\circ \leq \theta \leq 40^\circ \\ 30^\circ \leq \theta_f < 40^\circ \end{cases}$

$l \geq 0,2$ м при $\theta = 30^\circ$

Умова 5 – вимога забезпечення остійності судна за критерієм погоди $K = b/a \geq 1$.

Умова 6 – забезпечення оптимальних значень відносної метacentричної висоти $(h/B) \leq (h/B)_{max}$.

L_0 – початкова довжина судна,

ΔL – довжина вставки, що є в циклі змінною величиною,

L_{cr} – граничне значення довжини судна при якому забезпечується відповідна остійність.

Результати дослідження. Запропоновано модель визначення граничного значення довжини судна, що визначається за критерієм забезпечення остійності, яка ґрунтується на вимогах Регістру судноплавства і Міжнародного кодексу остійності суден в непошкоджену стані, і рекомендацій щодо дотримання значень відносної метacentричної висоти в оптимальних (або наближених до оптимальних) зонах.

Отримано рівняння для визначення кутів крену і плеча кренувального моменту в залежності від додаткової кількості пасажирів і площі циліндричної вставки і метacentричної висоти.

Досліджено вплив подовження пасажирського судна на виконання умов забезпечення остійності пасажирського судна на прикладах лайнерів «AIDA» і «Caribbean Princes» – кути крену при збільшенні корпусу в 1,3 рази зростають в 1,2 і 1,35 рази відповідно з дотриманням граничного кута крену; кута крену, що викликається спільною дією моментів крену, який виникає від скупчення пасажирів на верхній палубі і від руху на встановленій циркуляції – збільшення довжини на 30% призводить до збільшення кута θ_2 на 5% («Caribbean Princes») і на 18% («AIDA»).

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила класифікації та побудови морських суден. Регістр судноплавства України (2020). Том 2. Київ.
2. Шумило О. (2024). Аналіз безпечної експлуатації пасажирського судна з розмірною модернізацією корпусу за критерієм забезпечення остійності. *Вісник Одеського національного морського університету*, (73), 87-101. doi.org/10.47049/2226-1893-2024-2-87-101.
3. Шумило О.М. (2022). Визначення оптимальних розмірів подовження пасажирських суден при їх модернізації. *Розвиток транспорту*. 1 (12), 89–104.
4. IMO. Code on Intact Stability (2008), 2020th ed.; IMO: London, UK, 2020. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.267\(85\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.267(85).pdf).
5. Shumylo, O. (2023). Дослідження впливу розмірної модернізації на геометричні характеристики пасажирського судна. *Розвиток транспорту*, (2(17), 75–89. <https://doi.org/10.33082/td.2023.2-17.07>
6. Shumylo, O. (2022). Оптимізація розмірної модернізації пасажирських суден з урахуванням енергоефективності. *Розвиток транспорту*, (4(15), 58-77. Retrieved із <https://journals.onmu.in.ua/index.php/journal/article/view/191>.
7. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974. [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx).

PROJECT MANAGEMENT OF DIGITAL TRANSFORMATION IN SHIPPING COMPANIES: CHALLENGES AND SOLUTIONS

Bondar A. V.
Odesa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. The global wave of digitalization is reshaping every sector of the economy, and shipping is no exception. The adoption of intelligent decision support systems (DSS), artificial intelligence technologies, automated navigation complexes, and cloud-based solutions is fundamentally transforming the operational model of shipping companies [1]. Yet digital transformation in the maritime industry is not merely a technological process – it is a complex organizational project that demands systematic management. Project management therefore plays a pivotal role in ensuring the successful digital transformation of shipping enterprises [2].

Relevance of Research. The International Maritime Organization (IMO), through its cybersecurity strategy MSC-FAL.1/Circ.3 and Resolution MSC.428(98), has established requirements for the digitalization of shipboard safety management systems [3]. According to the DNV Maritime Forecast to 2050, more than 70% of shipping companies plan to significantly increase their investment in digital technologies by 2030 [4]. At the same time, McKinsey research indicates that approximately 70% of digital transformation projects in traditional industries fail to meet their objectives due to inadequate project management. In the shipping sector this problem is particularly acute given the specific operational context: the geographical distribution of fleets, stringent regulatory requirements, and a conservative industry culture [1]. Accordingly, the development of an adapted project management methodology for the digital transformation of shipping companies represents an important scientific and practical challenge.

Problem Statement. The aim of this study is to develop a classification of digital transformation challenges in shipping companies and to substantiate a differentiated hybrid project management approach corresponding to each challenge type.

To achieve this aim, the following tasks are addressed: systematization and classification of digital transformation challenges in shipping; analysis of existing project management methodologies (PMBok, Agile, PRINCE2) with regard to their applicability to the industry's specific context [2; 6]; development of recommendations for a hybrid project management approach differentiated by challenge type; and formulation of practical conclusions for project managers in shipping companies.

Main Content. Drawing on an analysis of digital solution implementation practices in the shipping industry and a systematic review of academic and regulatory sources, a classification of digital transformation challenges is proposed across four groups: technological, regulatory, organizational, and personnel.

Technological challenges are associated with integrating new digital solutions with legacy shipboard and shore-based systems, ensuring cybersecurity in accordance with IMO requirements [3], and maintaining the reliability and continuity of safety-critical ship management systems. Particular complexity arises from the heterogeneity of onboard equipment: a single vessel may operate systems from multiple manufacturers and generations, complicating unified integration with new DSS. An additional factor is the limited bandwidth of communication channels in open waters, which imposes strict requirements on the architecture of digital solutions [4].

Regulatory and compliance challenges encompass conformity with IMO, SOLAS, the ISM Code, and the requirements of classification societies (DNV, Lloyd's Register, Bureau Veritas) [3]. Every technological solution affecting maritime safety is subject to mandatory certification and documentation. This considerably increases project duration and cost, as it requires multiple levels of review and approval – from design documentation through to sea

trials.

Organizational challenges relate to resistance to change among personnel, the restructuring of business processes, and knowledge management under conditions of crew rotation that are unique to the industry. Unlike most other sectors, in shipping the project team and end-users of a new digital solution may change entirely every four to six months. This impedes knowledge accumulation and demands specific approaches to managing organizational change [5].

Personnel challenges include a shortage of digital technology specialists in the maritime sector and the need to retrain existing staff. According to DNV, the lack of qualified professionals in maritime digital technologies is one of the key risks to successful fleet digitalization by 2030 [4]. The majority of seafarers and shore-based specialists have limited experience with AI systems and cloud solutions, making a systematic digital training programme essential.

The analysis demonstrates that no single classical project management methodology is universally effective across all challenge types [2; 6]. For technological challenges, Agile approaches (Scrum, Kanban) are most appropriate, enabling iterative testing of integration solutions and rapid response to technical issues [6]. Regulatory challenges require a clear structure and documentation at every stage, which aligns with the principles of classical waterfall approaches (PMBoK, PRINCE2) [2]. Organizational and personnel challenges call for change management practices (Kotter's model) combined with flexible training and communications planning [5].

A summary of the proposed challenge classification and the corresponding project management toolkit is presented in Table 1.

Table 1 – Classification of digital transformation challenges in shipping companies and project management toolkit

Challenge Group	Key Challenges	PM Toolkit	Expected Outcome
Technological	Legacy system integration; cybersecurity; reliability of critical systems	Agile (Scrum, Kanban); iterative testing; DevOps practices	Rapid adaptation; reduced failure risk
Regulatory	IMO, SOLAS, ISM Code compliance; solution certification	PMBoK / PRINCE2; Gate Review; documentation management; audit	Compliance with international standards; successful inspections
Organizational	Resistance to change; business process restructuring; knowledge management	Kotter model; stakeholder management (PMBoK); communication plan	Reduced resistance; stable operations during transformation
Personnel	Digital skills shortage; crew rotation; retraining needs	Agile learning (sprints); competency matrix; mentoring programmes	Improved digital literacy; organizational knowledge retention

On the basis of the analysis, a three-level hybrid project management model for the digital transformation of a shipping company is proposed. At the strategic level, planning, regulatory compliance, and stakeholder management are carried out using PMBoK/PRINCE2 standards [2]. At the tactical level, Agile practices are applied for the iterative development and deployment of technological components [6]. At the operational level, a change management and personnel training programme is implemented following Kotter's model [5]. The defining characteristic of the proposed model is the dynamic transition between approaches according to

the current challenge and project phase, distinguishing it from conventional hybrid models that fix a single approach for the entire project.

A key element of the hybrid model is a set of criteria for selecting the appropriate approach. Where a project task is characterized by high uncertainty and technical complexity, Agile is applied. Where the task demands strict regulatory conformity and a documented outcome, the classical approach is preferred. Where the task involves human factors and organizational change, the change management module is activated. This logic enables the project manager to flexibly configure the toolkit for each specific challenge within a single project.

Research Results. The study produces a classification of digital transformation challenges in shipping companies spanning technological, regulatory, organizational, and personnel dimensions. It is demonstrated that each challenge group requires a specific project management toolkit, and that their co-existence within a single project necessitates a hybrid management approach. The proposed three-level hybrid model – strategic (PMBok/PRINCE2), tactical (Agile), and operational (Kotter) – enables all challenge groups to be systematically addressed without compromising overall project integrity.

Practical application of the hybrid approach in DSS implementation projects aboard vessels confirms its effectiveness: integration testing timelines are reduced by 25–30% compared with the waterfall approach, staff engagement with change is improved through change management practices, and regulatory inspections are completed on schedule without project delays.

Conclusions. Digital transformation in shipping companies is a complex project endeavor encompassing technological, regulatory, organizational, and personnel challenges. The application of a single project management methodology is insufficient for effective management of such projects [2; 6]. The proposed challenge classification structures the problem space and identifies the optimal PM toolkit for each group. The three-level hybrid project management model, which differentiates approaches according to challenge type, constitutes the scientific novelty of this study and may serve as a practical planning tool for project managers in shipping companies. Future research should focus on developing a detailed hybrid project management framework tailored to the specific characteristics of different shipping company types: tanker, container, and passenger.

REFERENCES

1. Stopford M. Maritime Economics. 3rd ed. London: Routledge, 2009. 815 p. <https://www.routledge.com/Maritime-Economics/Stopford/p/book/9780415275583>
2. Project Management Institute. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBok Guide). 7th ed. Newton Square: PMI, 2021. 250 p. <https://www.pmi.org/standards/pmbok>
3. IMO. MSC-FAL.1/Circ.3: Guidelines on Maritime Cyber Risk Management. London: IMO, 2017. 5 p. <https://www.imo.org/en/ourwork/security/pages/cybersecurity.aspx>
4. DNV. Maritime Forecast to 2050. Oslo: DNV, 2023. 88 p. <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/maritime-forecast-2050/>
5. Kotter J. P. Leading Change. Boston: Harvard Business Review Press, 2012. 208 p. <https://www.kotterinc.com/bookshelf/leading-change/>
6. Sutherland J. Scrum: The Art of Doing Twice the Work in Half the Time. New York: Crown Business, 2014. 248 p.

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ КОМФОРТОМ У ПАСАЖИРСЬКИХ ЗОНАХ КРУЇЗНИХ СУДЕН

Полікаровських О.І., Ватренко А. С.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Сучасний розвиток інформаційних технологій сприяє активному впровадженню інтелектуальних систем керування у різних галузях транспорту, зокрема у морській індустрії. Пасажирські круїзні судна являють собою складні технічні об'єкти, які поєднують функції транспорту, готелю та розважального комплексу. У зв'язку з цим виникає потреба у створенні автоматизованих систем моніторингу та керування комфортом, які здатні обробляти значні обсяги даних у реальному часі та забезпечувати високий рівень обслуговування пасажирів. Важливою особливістю є обмеженість енергетичних ресурсів та складність середовища функціонування систем, що потребує застосування ефективних алгоритмів обробки інформації [1]. Актуальність даної роботи обумовлена зростанням вимог до енергоефективності, безпеки та комфорту пасажирських перевезень. Використання технологій Інтернету речей (IoT) дозволяє інтегрувати численні датчики та виконавчі пристрої в єдину систему керування, що забезпечує адаптивну реакцію на зміну умов середовища [2]. Крім того, розвиток бездротових технологій передачі даних дає змогу реалізувати стійкі комунікаційні мережі навіть у складних умовах металевих корпусів судна, де спостерігається багатопроменевість сигналів [3]. Таким чином, дослідження інформаційних технологій у цій сфері є важливим як з наукової, так і з практичної точки зору. Основною задачею роботи є розробка структури інформаційної системи, яка забезпечує автоматизоване керування параметрами мікроклімату, освітлення та безпеки у пасажирських зонах круїзного судна. Система повинна забезпечувати обробку даних у реальному часі, мати високу стійкість до завад та мінімізувати енергоспоживання. Також важливим завданням є забезпечення зручного інтерфейсу взаємодії для екіпажу та пасажирів.

Запропонована інформаційна система базується на принципах розподіленої обробки даних і включає кілька функціональних рівнів. На рівні локального збору даних використовуються компактні обчислювальні модулі, які здійснюють первинну обробку сигналів від датчиків температури, освітленості та присутності. Це дозволяє зменшити навантаження на центральний сервер та скоротити затримки передачі інформації. Передача даних здійснюється за допомогою бездротових технологій, адаптованих до умов поширення сигналів у металевих конструкціях, що дозволяє підвищити надійність зв'язку [4]. Структурну схему системи наведено на рисунку 1.

На центральному рівні відбувається інтеграція даних та їх візуалізація у вигляді графічного інтерфейсу. Система забезпечує оновлення інформації у реальному часі з мінімальною затримкою, що є критично важливим для оперативного реагування на зміни умов. Особливу увагу приділено реалізації алгоритмів адаптивного керування, які враховують зовнішні фактори, такі як погодні умови, рівень освітленості та навантаженість кают.

Процес обробки даних реалізується у вигляді багаторівневої моделі, що включає формування векторів стану, фільтрацію шумів та прийняття рішень на основі аналізу поточних параметрів системи. Застосування методів прогнозування дозволяє забезпечити стабільність температурного режиму навіть за умов різкої зміни вологості морського повітря. Крім того, використання інтелектуальних алгоритмів дає змогу автоматично переводити систему у режим енергозбереження при відсутності пасажирів у каюті [5].

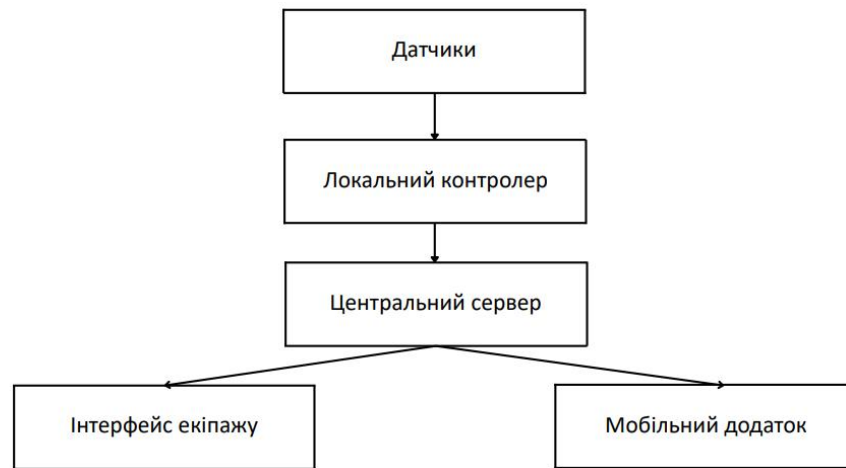


Рисунок 1 – Структурна схема системи моніторингу та керування

Результати дослідження. Проведені дослідження показали, що впровадження розподіленої системи керування дозволяє значно підвищити ефективність використання енергетичних ресурсів судна. Зокрема, було встановлено, що застосування адаптивних алгоритмів керування забезпечує зниження енергоспоживання на 15–20 %. Також відзначено підвищення точності роботи систем безпеки та стабільності функціонування кліматичних підсистем. Отримані результати підтверджують доцільність використання сучасних інформаційних технологій для підвищення рівня комфорту пасажирів.

Висновки. У роботі розглянуто підходи до побудови інформаційних систем моніторингу та керування комфортом у пасажирських зонах круїзних суден. Запропонована структура системи дозволяє ефективно обробляти дані в умовах обмежених ресурсів та складного середовища експлуатації. Використання технологій Інтернету речей та адаптивних алгоритмів керування забезпечує підвищення енергоефективності та надійності системи. Отримані результати можуть бути використані при розробці сучасних суднових інформаційних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Li, S., Xu, L. D., & Zhao, S. (2015). The internet of things: A survey. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 243–259. <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7>
2. Stallings, W. (2020). *Data and computer communications* (11th ed.). Pearson.
3. IEEE. (2022). IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources (IBRs) Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems Interfaces (IEEE Std 2800-2022). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2022.9762253>
4. Isermann, R. (2019). *Fault-diagnosis systems: An introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30368-8>
5. Zhang, Y., & Chen, M. (2021). Smart cabin systems based on IoT technologies. *Journal of Marine Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.1080/20464177.2021.1911456>

FORMALIZATION OF THE INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR CENTER-OF-GRAVITY POSITION ON THE WOBBLINESS OF AN ERGATIC NAVIGATION SUPPORT SYSTEM AND THE MANIFESTATION OF RISK

Nosov P.

Odesa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. Under current conditions of increasing navigational complexity, growing traffic intensity, and higher maritime safety requirements, the problem of formally incorporating the human factor into ergatic navigation support systems is of particular relevance. Despite the development of automation, information integration, and decision-support tools, the current functional state of the navigator still significantly affects system stability, its ability to compensate for deviations, and its capacity to maintain a safe operating regime. Existing approaches mainly describe the human factor qualitatively or through general error-related indicators, but they do not sufficiently formalize the mechanism of its influence on system wobbliness, the frequency of forced corrective actions, and risk formation. In this regard, it is relevant to develop a model that represents the human factor as an internal dynamic component of the ergatic system and quantitatively assesses its effect on stability parameters and risk generation.

Main Research Material. Within the gravitational-inertial model of stability of an ergatic navigation support system, it is advisable to move from a generalized description of the human factor to its direct physical-analog representation through the position of the internal center of gravity along the top axis (Fig. 1). Such an approach makes it possible to consider the navigator not as an external source of random errors, but as an internal dynamic factor that changes the balance between restoring and destabilizing moments and, consequently, affects the wobbliness of the system, the magnitude of angular deviation, the frequency of forced corrective actions, and the integral level of risk.

In this formulation, the vertical axis of the spinning top, which in the basic model corresponds to the reference direction of navigation safety, is simultaneously interpreted as the axis of the navigator's internal functional orderliness. A low position of the human factor center of gravity corresponds to a state of high professional composure, adequate situational awareness, stable temporal organization of actions, and low error proneness [1-3]. A high position, by contrast, corresponds to increasing fatigue, tension, information overload, disruption of the response tempo, and a higher probability of erroneous control actions [4-6]. For this reason, the position of this center along the axis should be introduced as a separate variable of the model.

Let:

$$z_h(t) \in [0,1], \quad (1)$$

where $z_h(t)$ is the normalized coordinate of the human factor center of gravity along the spinning-top axis, with $z_h(t) \rightarrow 0$ corresponding to the most stable functional state of the navigator and $z_h(t) \rightarrow 1$ corresponding to the most destabilizing state.

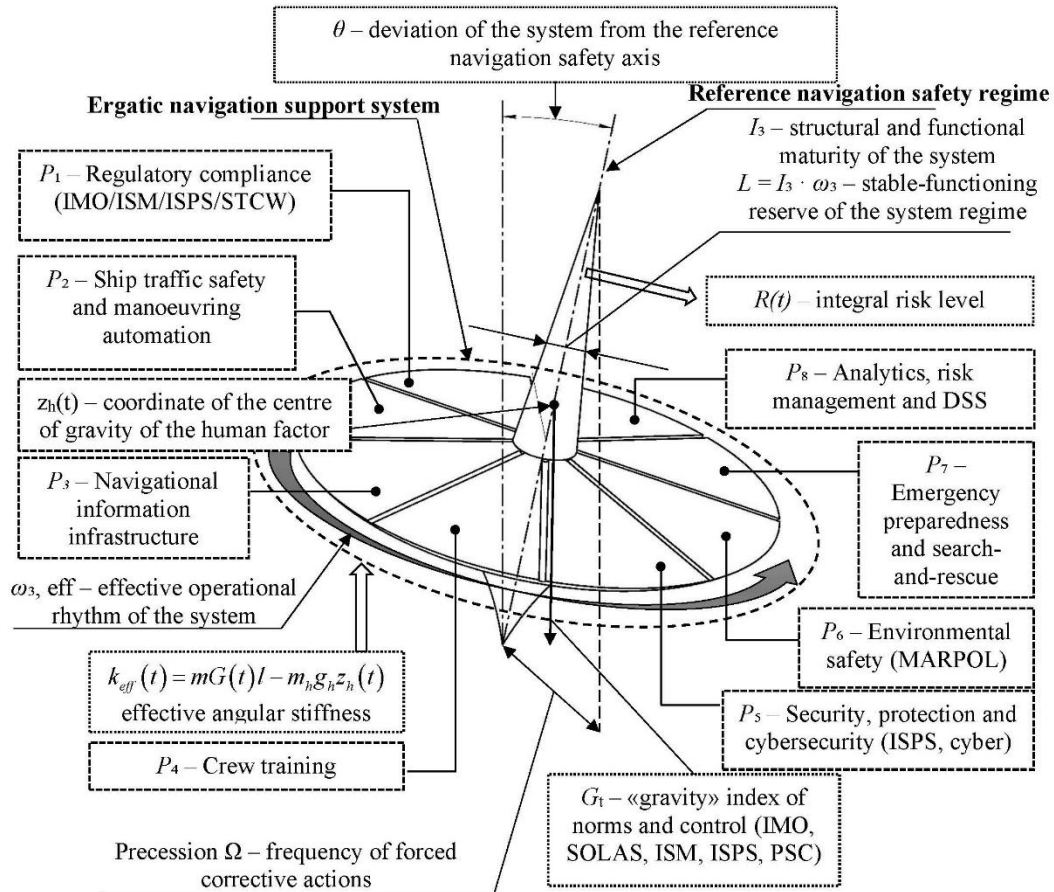


Figure 1 – Gravitational-inertial scheme of the influence of the human-factor center of gravity position on the wobbliness of an ergatic navigation support system

Then, the normative restoring moment that returns the system to the reference mode of navigation safety retains the conventional form used in the gravitational-inertial model:

$$M_N(\theta, t) = mG(t)l\sin\theta \quad (2)$$

where $M_N(\theta, t)$ is the normative restoring moment; m is the conditional system mass; $G(t)$ is the intensity of normative “gravity”; l is the lever arm of the restoring moment; and θ is the angle of deviation of the system from the reference navigation safety axis.

At the same time, the current state of the navigator should be represented as a separate internal destabilizing moment:

$$M_H(\theta, t) = m_h g_h z_h(t) \sin\theta \quad (3)$$

where $M_H(\theta, t)$ is the human-induced destabilizing moment; m_h is the conditional weight of the human factor in the integral dynamics of the system; g_h is the coefficient of anthropogenic sensitivity of the system to the current state of the navigator; $z_h(t)$ – is the coordinate of the human factor center of gravity.

The physical meaning of relation (3) is that an increase in $z_h(t)$ increases the lever arm of the destabilizing influence of the human factor and, accordingly, reduces the stability reserve of the system under the same external conditions.

The total moment that determines the actual angular dynamics of the system can therefore be written as:

$$M_\Sigma(\theta, t) = M_{ext}(t) + M_H(\theta, t) - M_N(\theta, t) \quad (4)$$

where $M_\Sigma(\theta, t)$ is the resultant moment acting on the system; and $M_{ext}(t)$ is the external disturbing moment caused by traffic, weather conditions, environmental uncertainty, technical failures, and other environmental factors.

Then, the equation of the angular dynamics of the system takes the form:

$$J_\theta \ddot{\theta} + c_\theta \dot{\theta} = M_\Sigma(\theta, t), \quad (5)$$

where J_θ is the reduced moment of inertia of the angular oscillations of the system; c_θ is the coefficient of angular damping; and $\dot{\theta}$ and $\ddot{\theta}$ are the first and second time derivatives of the deviation angle.

Substituting (2)–(4) into (5), we obtain:

$$J_\theta \ddot{\theta} + c_\theta \dot{\theta} = M_{ext}(t) + (m_h g_h z_h(t) - mG(t)l) \sin \theta \quad (6)$$

For small deviation angles, when $\sin \theta \approx \theta$, the linearized form becomes

$$J_\theta \ddot{\theta} + c_\theta \dot{\theta} + k_{eff}(t) \theta = M_{ext}(t), \quad (7)$$

where

$$k_{eff}(t) = mG(t)l - m_h g_h z_h(t) \quad (8)$$

is the effective angular stiffness of the system.

It is precisely the value $k_{eff}(t)$ that determines how wobble-prone the system is with respect to the current position of the human factor center of gravity. As $z_h(t)$ increases, the effective stiffness decreases, and the system becomes increasingly sensitive to both external and internal disturbances. If the human factor approaches a critical level, the system loses its ability to return reliably to the region of safe functioning.

The critical position of the human factor center of gravity is determined from the condition of loss of angular stability, $k_{eff}(t) = 0$:

$$z_{h,crit}(t) = \frac{mG(t)l}{m_h g_h} \quad (9)$$

Thus, if $z_h(t) < z_{h,crit}(t)$, the system retains positive stiffness and the ability to restore equilibrium; if $z_h(t) = z_{h,crit}(t)$, it is at the stability boundary; and if $z_h(t) > z_{h,crit}(t)$, the system enters an unstable regime.

To quantify the relative stability margin, it is reasonable to introduce a dimensionless index:

$$\mu_{st}(t) = \frac{k_{eff}(t)}{mG(t)l} = 1 - \frac{m_h g_h z_h(t)}{mG(t)l}, \quad (10)$$

where $\mu_{st}(t)$ is the relative stability index. At $\mu_{st}(t) \approx 1$, the human factor hardly reduces the stabilizing resource of the system; at $0 < \mu_{st}(t) < 1$, the system remains stable but sensitive; at $\mu_{st}(t) = 0$, the stability boundary is reached; and at $\mu_{st}(t) < 0$, the system loses its restoring capability.

Since, in the current model, system stability is also described by the parameters I_3 , ω_3 , and $L=I_3\omega_3$, it is advisable to take into account the deterioration of these parameters under the influence of increasing $z_h(t)$. For this purpose, the following effective values are introduced:

$$I_{3,eff}(t) = I_{3,0}(1 - \alpha_I z_h(t)), \quad (11)$$

$$\omega_{3,eff}(t) = \omega_{3,0}(1 - \alpha_\omega z_h(t)), \quad (12)$$

$$L_{eff}(t) = I_{3,eff}(t)\omega_{3,eff}(t), \quad (13)$$

where $I_{3,0}$ is the baseline value of the structural-functional maturity of the system; $\omega_{3,0}$ is the baseline operational rhythm; α_I and α_ω are the degradation coefficients of maturity and rhythm under the influence of the human factor; and $L_{eff}(t)$ is the effective reserve of stable functioning.

To evaluate the frequency of forced corrections in the pre-emergency regime, it is advisable to use the relation:

$$\Omega(t) \approx \frac{M_{dem}(t)}{L_{eff}(t)}, \quad (14)$$

where $\Omega(t)$ is the precession frequency or the frequency of forced corrective actions; and $M_{dem}(t)$ is the current corrective-demand moment, which for simulation analysis can be represented as the sum of the external disturbance and the human-induced destabilizing moment at a fixed initial deviation.

The integral manifestation of risk can be represented as a normalized logistic function:

$$R(t) = \sigma \left(a_0 + a_1 |\theta(t)| + a_2 |\dot{\theta}(t)| + a_3 \Omega(t) + a_4 (1 - \mu_{st}(t)) \right), \quad (15)$$

where $R(t) \in [0,1]$ is the integral risk level; $\sigma(\cdot)$ is the logistic normalization function; $a_0, \dots, a_4$ are model calibration parameters.

For the purpose of simulation analysis of the influence of the position of the human factor center of gravity on system wobbliness and the manifestation of risk, three characteristic scenarios were considered: low, medium, and high positions of the center of gravity. To ensure comparability, the calculation results were obtained in normalized dimensionless units. The following baseline model parameters were adopted: $mG(t)l = 1.0$, $m_h g_h = 0.9$, $J_\theta = 1.0$, $c_\theta = 0.35$, $M_{ext} = 0.15$, $I_{3,0} = 0.85$, $\omega_{3,0} = 1.0$, $\alpha_I = 0.25$, $\alpha_\omega = 0.15$. To evaluate the precession frequency in all three cases, the initial deviation was taken as $\theta_{ref} = 15^\circ$.

Such a choice of parameters makes it possible to trace specifically the influence of the position of the human factor center of gravity without changing other operating conditions of the system. At the same time, the threshold of the stable regime in terms of the reserve L in the current model is taken at approximately 0.60, which is convenient to use as a reference point in the qualitative interpretation of the results.

For the three scenarios, the following values were adopted:

$$z_h^{(1)} = 0.2, \quad z_h^{(2)} = 0.5, \quad z_h^{(3)} = 0.8 \quad (16)$$

In the first scenario, corresponding to a low position of the human factor center of gravity, the following values were obtained: $k_{eff} = 0.82$, $\mu_{st} = 0.82$, static equilibrium deviation $\theta^* \approx 10.48^\circ$, $I_{3,eff} = 0.8$, $\omega_{3,eff} = 0.970$, $L_{eff} = 0.783$, $\Omega = 0.251$, $R = 0.154$. In this case, the system retains a sufficient relative stability reserve, and the human factor does not create a significant tendency toward wobbling.

In the second scenario, corresponding to a medium position of the center of gravity, the calculations yield $k_{eff} = 0.55$, $\mu_{st} = 0.55$, $\theta^* \approx 15.63$, $I_{3,eff} = 0.744$, $\omega_{3,eff} = 0.925$, $L_{eff} = 0.688$, $\Omega = 0.387$, $R = 0.336$. These results indicate a noticeable decrease in system stiffness, an increase in the deviation angle, and an almost one-and-a-half-fold increase in the frequency of forced corrections compared to the previous case. The system remains stable, but enters a more stressed operating regime.

In the third scenario, corresponding to a high position of the human factor center of gravity, the following values were obtained: $k_{eff} = 0.28$, $\mu_{st} = 0.28$, $\theta^* \approx 30.69$, $I_{3,eff} = 0.680$, $\omega_{3,eff} = 0.880$, $L_{eff} = 0.598$, $\Omega = 0.562$, $R = 0.702$. In this case, the system is already functioning close to the stability limit in terms of the reserve L , since L_{eff} practically reaches the threshold value of approximately 0.60. At the same time, the deviation angle increases sharply, the frequency of forced corrections nearly doubles compared to the first scenario, and a high integral risk level is formed (Table 1).

Table 1 – Results of the simulation modeling

Scenario of human factor manifestation	$z_h(t)$	k_{eff}	μ_{st}	θ^*	$I_{3,eff}$	$\omega_{3,eff}$	L_{eff}	Ω	R	Qualitative state
Low center-of-gravity position	0.20	0.82	0.82	10.48	0.808	0.970	0.783	0.251	0.154	Stable regime, low
Medium center-of-gravity position	0.50	0.55	0.55	15.63	0.744	0.925	0.688	0.387	0.336	Tense but controllable
High center-of-gravity position	0.80	0.28	0.28	30.69	0.680	0.880	0.598	0.562	0.702	Boundary regime, high risk

Thus, the results of the simulation modeling confirm that the position of the human factor center of gravity along the axis of the spinning top is one of the key internal parameters determining the wobbliness of an ergatic navigation support system. At a low position of this center, the system possesses sufficient angular stiffness, a relatively small deviation from equilibrium, and a low level of risk. At a medium position, a reduction in the stability reserve is observed, together with a transition to a tense operating regime. At a high position of the human factor center of gravity, the system approaches the boundary of stability loss, the deviation angle increases significantly, the need for forced corrective actions grows, and a high level of risk is formed. Thus, the proposed formalization makes it possible to quantitatively describe the mechanism of transition from the internal functional state of the navigator to the dynamic change in the stability of the ergatic system and to the manifestation of navigational risk.

Conclusion. The simulation results showed that, as the coordinate of the human factor center of gravity increases, the effective angular stiffness and the relative stability of the system decrease, while the deviation angle, the frequency of corrective actions, and the integral risk level increase. At a low center-of-gravity position, the system remains in a stable operating regime; at a medium position, it shifts to a tense but controllable regime; and at a high position, it approaches the boundary of stability loss. Therefore, the position of the human factor center of gravity can be used as a formalized indicator of system wobbliness and as an early predictor of navigational risk.

REFERENCES

1. Nosov, P., Zinchenko, S., Plokhikh, V., Popovych, I., Prokopchuk, Y., Makarchuk, D., Mamenko, P., Moiseienko, V., & Ben, A. (2021). Development and experimental study of analyzer to enhance maritime safety. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4/3(112), 27–35. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239093>.
2. Nosov P.S., Zinchenko S.M., Prokopchuk Yu.A., Popovych I.S., Litovchenko V.I. Influence human factor on safety's planning route of water transport // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал. – Херсон: Херсонська державна морська академія, 2021. №3(21). С. 36-51. 10.33815/2313-4763.2021.1.24.057–070.
3. Никитюк, П. В., & Носов, П. С. (2026). Інтегративна модель статистичної класифікації навігаційних рейсів на основі фрактальних підписів та кодових патернів мікрорухів. *Наука і техніка сьогодні*, 2(56), 2064–2082. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-2\(56\)-2064-2082](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2026-2(56)-2064-2082).
4. Nosov, P., Koretsky, O., Zinchenko, S., Prokopchuk, Y., Gritsuk, I., Sokol, I., Kyrychenko, K. (2023). Devising an approach to safety management of vessel control through the identification of navigator's state. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (3 (124)), 19–32. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286156>.
5. Nosov, P., Melnyk, O., Malaksiano, M., Shumylo, O., Onishchenko, O., Yarovenko, V., Zinchenko, S., & Popovych, I. (2026). A Unified Fractal Processing Framework for Normalized AIS and ECDIS Ship Trajectories. *Digital*, 6(1), 11. <https://doi.org/10.3390/digital6010011>.
6. Nosov, P., Melnyk, O., Malaksiano, M., Mamenko, P., Onyshko, D., Fomin, O., Píštěk, V., & Kučera, P. (2025). Machine Learning-Based Semantic Analysis of Scientific Publications for Knowledge Extraction in Safety-Critical Domains. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 7(4), 150. <https://doi.org/10.3390/make7040150>.

BI-OBJECTIVE MODEL OF MULTI-PORT CONTAINER STOWAGE PROBLEM WITH REVENUE MAXIMIZATION AND RE-HANDLING MINIMIZATION BY RE-HANDLING CONSTRAINTS LINEARIZATION

Romanuke V.

Vinnitsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics
(Ukraine)

Introduction. Maritime container transportation remains the backbone of global trade, with over 80 % of world merchandise being transported by sea [1]. The operational efficiency of container vessels directly influences freight costs, schedule reliability, port congestion, and environmental performance. In particular, multi-port liner services, where a vessel sequentially visits several ports, introduce substantial operational complexity in container stowage planning.

The container stowage problem refers to the allocation of containers to specific shipboard positions subject to structural, stability, and operational constraints [2]. In multi-port routes, improper stowage decisions may lead to re-handlings (also called re-shuffles), where containers must be temporarily unloaded to access other containers destined for earlier ports. These additional moves increase: port handling time, terminal operating costs, fuel consumption due to prolonged port stay, and the risk of schedule disruption. At the same time, shipping companies seek to maximize voyage revenue by selecting and optimally placing containers with different freight rates and destination ports. Thus, a structural conflict arises between: revenue maximization and operational efficiency in terms of minimizing re-handlings. This conflict is particularly relevant for feeder services operating in regional networks, medium-sized container vessels serving dense port sequences, and hub-and-spoke systems where schedule reliability is critical [2].

Unlike classical single-port knapsack-type formulations, the multi-port stowage problem is combinatorial and inter-temporal in nature: a decision made at the loading stage influences unloading complexity at multiple future ports. The problem belongs to the class of NP-hard combinatorial optimization problems, and it is naturally bi-objective as it integrates financial performance and operational risk indicators. Modern maritime logistics increasingly relies on digital decision support systems capable of solving such structured optimization problems in near real time. Therefore, developing and computationally evaluating a bi-objective model suitable for implementation in engineering software environments such as MATLAB is both scientifically and practically justified.

Background. The container stowage problem has been extensively studied in maritime logistics and operations research due to its high economic relevance and computational complexity [2]. Early research primarily focused on single-port loading scenarios, where the objective was to assign containers to vessel slots while satisfying weight, stability, and structural constraints. These formulations were typically modeled as integer programming problems closely related to bin-packing and three-dimensional knapsack problems. With the growth of liner shipping networks and hub-and-spoke systems, attention shifted toward the multi-port container stowage problem (MPCSP). In this setting, vessels sequentially visit several ports, and containers destined for different discharge ports must be arranged in a way that minimizes operational inefficiencies at intermediate stops. Unlike single-port formulations, multi-port stowage introduces an interdependent temporal structure: decisions taken at the initial loading stage directly affect unloading complexity at future ports.

A central operational issue in MPCSP is the phenomenon of re-handlings (also referred to as re-shuffles). A re-handling occurs when a container destined for a later port is stacked above a container that must be discharged earlier, forcing additional crane moves. The minimization of such re-handlings has been recognized as a key operational objective because it increases port turnaround time, raises terminal handling costs, increases crane workload, and negatively affects

schedule reliability. There are three basic modeling approaches proposed so far: the exact optimization methods, heuristics, and multi-objective formulations. Mixed-Integer Linear Programming (MILP) models have been widely used to represent stacking constraints, port sequences, and structural limitations. These formulations often rely on binary decision variables indicating container-slot assignments and additional constraints to enforce stacking feasibility. However, due to the NP-hard nature of the problem, exact methods are typically limited to moderate-sized instances. To address scalability issues, researchers have developed constructive heuristics, tabu search, simulated annealing, and genetic algorithms. These approaches avoid full linearization of complex stacking logic and allow direct modeling of nonlinear or combinatorial penalty terms. Genetic algorithms are particularly attractive because container assignments can be naturally encoded as chromosomes representing stacking configurations. However, more recent studies recognize that container stowage is inherently multi-objective. Besides minimizing re-handlings, researchers consider vessel stability and trim optimization, crane intensity balancing, hazardous cargo separation, fuel efficiency implications, and revenue maximization.

Despite the growing body of research, relatively fewer studies explicitly integrate voyage revenue maximization and re-handling minimization into a unified bi-objective framework suitable for practical implementation within engineering optimization software environments. Many works either assume a fixed container set or treat operational efficiency independently from freight-rate heterogeneity. Hence, the goal is to propose a bi-objective optimization model for multi-port container stowage that simultaneously maximizes revenue and minimizes the number of re-handlings, and assess its solution quality, computational efficiency, and practical applicability within maritime decision-support systems.

Model. Denote the set of N containers by $C = \{c\}_{c=1}^N$, the set of M stacks (horizontal positions on the vessel) by $S = \{s\}_{s=1}^M$, and the set of K tiers (vertical levels within the stack) by $T = \{t\}_{t=1}^K$ (tier numbering increases from bottom to top; every stack has the same number of tiers). Let $P = \{p\}_{p=1}^R$ be an ordered set of ports in the vessel route. Each container $c \in C$ is characterized by a revenue r_c obtained by transporting container c , and by a discharge port index $d_c \in P$.

The primary binary assignment variable is the container placement indicator:

$$x_{cst} \in \{0, 1\} \quad \forall c \in C \text{ and } \forall s \in S \text{ and } \forall t \in T, \quad (1)$$

where $x_{cst} = 1$ if container c is placed in stack s at tier t , and $x_{cst} = 0$ otherwise. The total number of the container placement indicators is $N \cdot M \cdot K$. To account for operational conflicts, a re-handling indicator is defined:

$$y_{chs} \in \{0, 1\} \quad \forall c \in C \text{ and } \forall h \in C \setminus \{c\} \text{ and } \forall s \in S, \quad (2)$$

where $y_{chs} = 1$ if container c is below container h in stack s and $d_c < d_h$, and $y_{chs} = 0$ otherwise. Variable (2) captures a potentially re-handling situation: container h must be moved in port d_c in order to unload container c . At first glance, it seems irrational to place an earlier-discharge container below a later one. However, in real operations this happens quite often. The reason is that stowage decisions are global, while discharge order is local. The simple and realistic scenarios of such situations are grouped into capacity pressure across multiple ports, incomplete information at initial loading, stability and weight constraints, revenue-dominant decisions.

The revenue function to be maximized is

$$v(\mathbf{X}) = \sum_{c=1}^N r_c \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^K x_{cst} \quad \text{by } \mathbf{X} = \left\{ \left\{ \left\{ x_{cst} \right\}_{c \in C} \right\}_{s \in S} \right\}_{t \in T} \in X. \quad (3)$$

A matrix $\mathbf{X}^* \in X$ such that

$$\max_{\mathbf{X} \in X} v(\mathbf{X}) = v(\mathbf{X}^*) = v^* \quad (4)$$

maximizes total voyage revenue generated by transported containers. If the set of containers is fixed and all must be loaded, objective (3) becomes constant. However, in a realistic booking selection setting, not all containers may be accepted, and this makes objective (3) meaningful.

A re-handling occurs when two containers are placed in the same stack, one is positioned above the other, and the lower container must be discharged earlier. Formally, the total number of re-handlings to be minimized is

$$g(\mathbf{Y}) = \sum_{s=1}^M \sum_{c=1}^N \sum_{h=1}^N y_{chs} \quad \text{by } \mathbf{Y} = \left\{ \left\{ \left\{ y_{chs} \right\}_{c \in C} \right\}_{h \in C} \right\}_{s \in S} \in Y. \quad (5)$$

A matrix $\mathbf{Y}_* \in Y$ such that

$$\min_{\mathbf{Y} \in Y} g(\mathbf{Y}) = g(\mathbf{Y}_*) = g_* \quad (6)$$

minimizes operational inefficiency across all ports.

Objective (3) is subject to three constraints. First, each container can occupy at most one slot:

$$\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^K x_{cst} \leq 1 \quad \forall c \in C. \quad (7)$$

Inequalities (7) require unique placement of each container. Second, each slot can contain at most one container:

$$\sum_{c=1}^N x_{cst} \leq 1 \quad \forall s \in S \text{ and } \forall t \in T. \quad (8)$$

Inequalities (8) constitute a slot capacity constraint. Third, a container cannot be placed at tier t unless tier $t-1$ is occupied:

$$\sum_{c=1}^N x_{cst} \leq \sum_{c=1}^N x_{cs,t-1} \quad \forall s \in S \text{ and } \forall t \in T \setminus \{1\}. \quad (9)$$

Inequalities (9) ensure physical feasibility of stacking or, in short, stack integrity (no floating containers).

The problem of maximizing objective (3) by (7) — (9) and minimizing objective (5) can be converted into a bi-objective optimization model for MPCSP with a weighted-sum formulation:

$$f(\mathbf{X}, \mathbf{Y}; \alpha, \beta) = \alpha v(\mathbf{X}) - \beta g(\mathbf{Y}), \quad (10)$$

where α is a revenue weight ($\alpha > 0$), β is a re-handling penalty weight ($\beta > 0$), and function (10) is to be maximized. This is a static pre-loading model, in which all containers for all ports are loaded at the initial port and, during the voyage, only discharge operations occur. The model determines an optimal initial stowage plan (ISP). The model assumes that the full container set and their respective discharge ports are known at the planning stage. This assumption transforms a dynamic multi-stage problem into the static combinatorial optimization problem while preserving the essential structure of re-handling conflicts.

Linearization of re-handling constraints for MILP implementation. It is easy to see that constraints (7) – (9) can be linearly embedded into the MATLAB function «intlinprog» by flattening variables $\mathbf{X}$ in (3) and (4). However, re-handling indicator (2) should be linearized. First of all, a five-dimensional re-handling index map is built. Let

$$\mathbf{U} = [u_{chstk}]_{N \times N \times M \times K \times K}$$

be an $N \times N \times M \times K \times K$ matrix of zeros. A counter q is set to 0. If $d_c < d_h$ then for every $s = \overline{1, M}$ by every $t = \overline{1, K}$ and every $k = \overline{t+1, K}$ counter q is incremented by 1 and entry

$$u_{chstk} = N \cdot M \cdot K + q. \quad (11)$$

Upon having run through those two loops of $c = \overline{1, N}$ and $h = \overline{1, N}$ with checking condition $d_c < d_h$ followed by three loops of $s = \overline{1, M}$, $t = \overline{1, K}$, $k = \overline{t+1, K}$, and re-assignment (11), the last value of counter q is factually equal to the number of all possible re-handlings. Then

$$V = N \cdot M \cdot K + q \quad (12)$$

is the total number of variables. Subsequently, they are flattened into a vector $\mathbf{V} = [\theta_v]_{V \times 1}$, whose first $N \cdot M \cdot K$ entries are a flattened matrix $\mathbf{X} \in X$.

Let $\mathbf{A}_1 = [a_{cv}^{(1)}]_{N \times V}$ be an $N \times V$ matrix of zeros. Then for every $c = \overline{1, N}$ by every $s = \overline{1, M}$ for every $t = \overline{1, K}$ entry

$$a_{cv}^{(1)} = 1 \text{ by } v = (c-1) \cdot M \cdot K + (s-1) \cdot K + t. \quad (13)$$

Thereupon matrix $\mathbf{A}_1$ and vector $\mathbf{B}_1 = [1]_{N \times 1}$ correspond to constraint (7) as

$$\mathbf{A}_1 \mathbf{V} \leq \mathbf{B}_1 \text{ by } \mathbf{V} = [\theta_v]_{V \times 1}. \quad (14)$$

Let $\mathbf{A}_2 = [a_{qv}^{(2)}]_{(M \cdot K) \times V}$ be an $(M \cdot K) \times V$ matrix of zeros. A counter q is set to 0. Then for every $s = \overline{1, M}$ by every $t = \overline{1, K}$ counter q is incremented by 1 and for every $c = \overline{1, N}$ entry

$$a_{qv}^{(2)} = 1 \text{ by } v = (c-1) \cdot M \cdot K + (s-1) \cdot K + t. \quad (15)$$

Thereupon matrix $\mathbf{A}_2$ and vector $\mathbf{B}_2 = [1]_{(M \cdot K) \times 1}$ correspond to constraint (8) as

$$\mathbf{A}_2 \mathbf{V} \leq \mathbf{B}_2 \text{ by } \mathbf{V} = [\theta_v]_{V \times 1}. \quad (16)$$

Let $\mathbf{A}_3 = [a_{qv}^{(3)}]_{(M \cdot (K-1)) \times V}$ be an $(M \cdot (K-1)) \times V$ matrix of zeros. Then for every $s = \overline{1, M}$ by every $t = \overline{1, K-1}$ a $1 \times V$ vector of zeros $\mathbf{L}_3 = [l_v^{(3)}]_{1 \times V} = [0]_{1 \times V}$ is created, whereupon

$$l_v^{(3)} = 1 \text{ by } v = (c-1) \cdot M \cdot K + (s-1) \cdot K + t + 1 \quad \forall c = \overline{1, N} \quad (17)$$

and

$$l_v^{(3)} = -1 \text{ by } v = (c-1) \cdot M \cdot K + (s-1) \cdot K + t \quad \forall c = \overline{1, N}. \quad (18)$$

Upon having calculated (17) and (18) in vector $\mathbf{L}_3$, row v of matrix $\mathbf{A}_3$ is changed into the new vector $\mathbf{L}_3$. Thereupon matrix $\mathbf{A}_3$ corresponds to constraint (9) as

$$\mathbf{A}_3 \mathbf{V} \leq 0 \text{ by } \mathbf{V} = [\theta_v]_{V \times 1}. \quad (19)$$

The re-handling activation constraint with re-handling indicator (2) should consider containers c and h in stack s by checking condition $d_c < d_h$, where it is useful to add tier t at which container c is placed and tier k at which container h is placed. Hence, consider a modified re-handling indicator z_{chstk} such that, if

$$x_{cst} = 1, x_{hsk} = 1, t < k \text{ and } d_c < d_h, \quad (20)$$

then $z_{chstk} = 1$; if (20) is not true then $z_{chstk} = 0$. This constraint can be linearized as

$$z_{chstk} \geq x_{cst} + x_{hsk} - 1 \text{ for } t < k \text{ and } d_c < d_h. \quad (21)$$

Let $\mathbf{A}_4$ be an empty matrix of size $0 \times V$. Then for every $c = \overline{1, N}$ by every $h = \overline{1, N}$, if $d_c < d_h$ then for every $s = \overline{1, M}$ by every $t = \overline{1, K}$ and every $k = \overline{t+1, K}$ an index

$$q = u_{chstk} \quad (22)$$

is calculated. If (22) is positive then a $1 \times V$ vector of zeros $\mathbf{L}_4 = [l_v^{(4)}]_{1 \times V} = [0]_{1 \times V}$ is created, whereupon

$$l_v^{(4)} = 1 \text{ by } v = (c-1) \cdot M \cdot K + (s-1) \cdot K + t, \quad (23)$$

$$l_v^{(4)} = -1 \text{ by } v = (h-1) \cdot M \cdot K + (s-1) \cdot K + k, \quad (24)$$

$$l_q^{(4)} = -1, \quad (25)$$

and the new row $\mathbf{L}_4$ is added to matrix $\mathbf{A}_4$. Upon having run through those two loops of $c = \overline{1, N}$ and $h = \overline{1, N}$ with checking condition $d_c < d_h$ followed by three loops of $s = \overline{1, M}$, $t = \overline{1, K}$, $k = t + 1, K$, a matrix $\mathbf{A}_4 = [a_{qv}^{(4)}]_{Q \times V}$ with Q rows is formed, whereupon matrix $\mathbf{A}_4$ and vector $\mathbf{B}_4 = [1]_{Q \times 1}$ correspond to the re-handling activation constraint (21) as

$$\mathbf{A}_4 \mathbf{V} \leq \mathbf{B}_4 \text{ by } \mathbf{V} = [\theta_v]_{V \times 1}. \quad (26)$$

Finally, objective function (10) is re-written as

$$f(\mathbf{X}, \mathbf{Z}; \alpha, \beta) = \alpha \sum_{c=1}^N r_c \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^K x_{cst} - \beta \sum_{c=1}^N \sum_{h=1}^N \sum_{s=1}^M \sum_{k=t+1}^K \sum_{t=1}^K z_{chstk}, \quad (27)$$

where $\mathbf{Z}$ is a set of all possible modified re-handling binary indicators.

Exact and approximate solutions. Objective function (27) is to be minimized by constraints (14), (16), (19), (26), (1) and $z_{chstk} \in \{0, 1\}$. This can be done via MATLAB function «intlinprog», which provides an exact solution (the MPCSP can have a few exact solutions). Nevertheless, solving the MILP via «intlinprog» is extremely slow as this is a combinatorial optimization problem whose computational complexity depends on three numbers – N containers, M stacks, and K tiers. The MPCSP is obviously NP-hard having $N \cdot M \cdot K$ binary variables with domination of modified re-handling binary indicators (but their maximum number $N^2 \cdot M \cdot K^2$ is hardly reachable). The worst-case complexity is exponential in the number of binary variables, i. e. it is $O(2^{N \cdot M \cdot K})$, although real runtime is usually much smaller owing to solvers use branch-and-bound, cutting planes, and other presolve reductions. Meanwhile, modern container vessels contain between 100 and 500 stacks and up to 20 vertical tiers, resulting in thousands of container slots, that makes the static MPCSP intractable in searching an exact solution. An approximate solution can be found using the respective genetic algorithm [1], where container assignments can be naturally encoded as chromosomes representing stacking configurations. Then, instead of full pairwise linearization, the genetic algorithm directly evaluates re-handlings from decoded stacks. It is a computationally efficient approach. For instance, MPCSPs with 1000 slots (200 stacks) are approximately solved within 23 s without much worsening the solution quality (the number of re-handlings is below 165); solving MPCSPs with 2000 slots (400 stacks) takes no longer than 43 s (by fewer than 200 re-handlings).

Managerial and operational implications. The computational results suggest that the genetic algorithm can provide high-quality approximate solutions to large instances of the MPCSP within seconds (up to a minute). From a managerial perspective, this means that terminal operators can support near-real-time decision making for yard planning even when the number of slots becomes large. From an operational standpoint, the short computation times (e. g., a few tens of seconds for problems with a few thousand slots) make it feasible to frequently recompute ISPs as new containers arrive or operational conditions change.

Conclusion. The suggested bi-objective model is intended for solving MPCSPs with revenue maximization and re-handling minimization by re-handling constraints linearization, which is expected to have a positive impact on maritime transportation management and operational efficiency. Although searching for exact MPCSP solutions is practically unrealistic, the model formulation allows building computationally efficient heuristic algorithms of searching for approximate solutions. One of such heuristic approaches is the genetic algorithm, which has to be fine-tuned via its parameters of population, chromosome evolution, options of selection, reproduction, mutation, crossover, migration. Fine-tuning of the revenue weight and re-handling penalty weight in objective function (10) is an additional option to obtain the maximized revenue and the minimized number of re-handlings in a rational combination.

REFERENCES

1. Romanuke Vadim, Romanov Andrii & Malaksiano Mykola (2023). A genetic algorithm improvement by tour constraint violation penalty discount for maritime cargo delivery. *System Research and Information Technologies*, 2, 104–126, <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2023.2.08>.
2. Caserta Marco, Schwarze Silvia & Voß Stefan (2012). A mathematical formulation and complexity considerations for the blocks relocation problem. *European Journal of Operational Research*, 219:1, 96–104, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.12.039>.

AI-BASED SITUATIONAL AWARENESS IN MODERN SHIPPING: THE ORCA AI APPROACH

Ternovsky V. B., Ternovsky Y. V.
Odessa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. Maritime transportation remains one of the most important components of global trade, carrying the majority of the world's goods. At the same time, maritime operations are associated with significant safety challenges. Studies of maritime accidents consistently show that human error remains one of the main contributing factors to collisions, groundings, and other navigational incidents [1,2]. Increasing traffic density in busy sea routes and port approaches further complicates the task of maintaining safe navigation.

In recent years, the maritime sector has begun integrating advanced digital technologies in order to enhance operational safety. Artificial intelligence, sensor systems, and digital navigation tools are increasingly used to support ship officers in monitoring the surrounding environment and making navigational decisions. The development of autonomous and semi-autonomous vessels has accelerated research on intelligent systems capable of perceiving the maritime environment and assisting in collision avoidance [3,4].

Situational awareness plays a critical role in safe navigation. It refers to the ability of a navigator to perceive elements in the environment, understand their meaning, and predict their future status [5]. Maintaining situational awareness on the bridge can be challenging, especially in conditions of limited visibility, high workload, or dense traffic.

One example of such technology is the Orca AI situational awareness platform [6], which combines computer vision and machine learning to detect vessels, obstacles, and navigational hazards. The system analyzes visual data obtained from onboard sensors and provides navigators with additional information about surrounding traffic conditions. An illustration of the operational concept of such a system is presented in Figure 1.

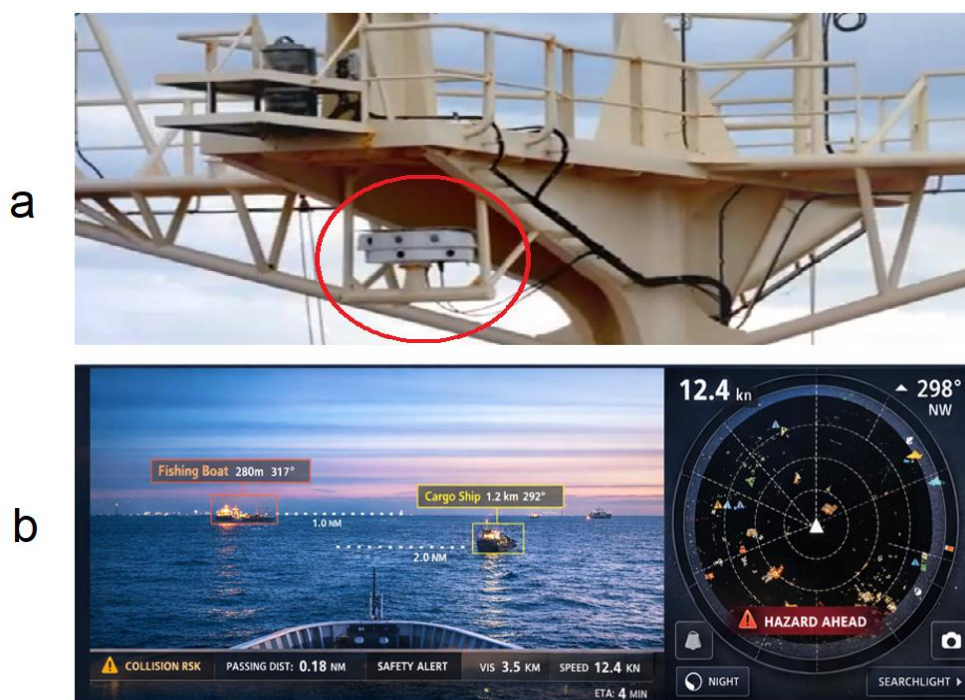


Figure 1 – The Orca AI system's: a – High-resolution cameras; b – Example interface of an AI-based situational awareness system for ship navigation

The integration of computer vision technologies with radar and AIS information enables

the creation of advanced situational awareness systems capable of supporting safer navigation. A conceptual representation of AI-assisted maritime situational awareness is shown in Figure 2.

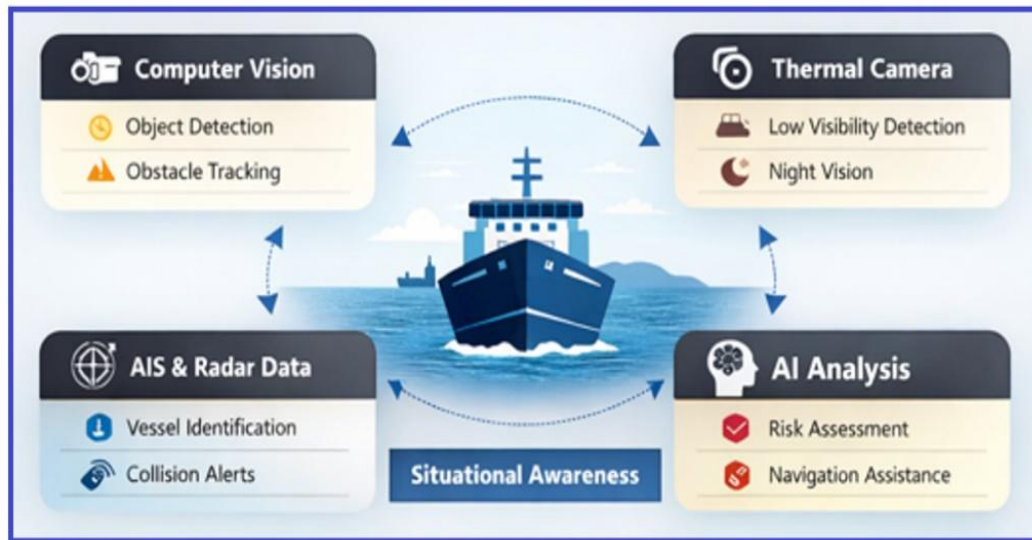


Figure 2 – Conceptual structure of AI-assisted maritime situational awareness combining computer vision, AIS, radar and thermal sensors

Relevance of the Research. Improving maritime safety remains an important research topic due to the increasing complexity of modern shipping operations. Maritime traffic density continues to grow in many regions of the world, particularly in narrow waterways and port approaches. In such environments, navigators must continuously monitor multiple sources of navigational information while maintaining safe maneuvering of the vessel.

Previous research has demonstrated that failures in situational awareness may significantly increase the risk of maritime accidents. According to studies on maritime transportation safety, human-related factors remain a dominant cause of collisions and groundings [1, 2]. These factors often include misinterpretation of available data, insufficient monitoring of surrounding traffic, or delayed reaction to emerging hazards.

Human-factor studies in maritime navigation emphasize that operators must process information from multiple systems simultaneously. Radar, AIS, electronic charts, and visual observation provide important information about the surrounding environment. However, the large volume of information may increase the cognitive workload of the navigator, especially during complex navigation situations [5].

For this reason, researchers increasingly focus on technological solutions capable of supporting human operators. Artificial intelligence technologies offer the possibility of automatically detecting objects, analyzing environmental conditions, and assisting navigators in identifying potential risks in real time.

Problem Statement. Despite the presence of modern navigation equipment on ships, certain limitations remain in the detection and interpretation of environmental information. Radar systems are effective for detecting large objects but may fail to identify small vessels or floating debris. AIS systems rely on transmitted signals and therefore cannot detect objects that do not carry AIS transmitters.

Visual observation from the bridge remains an essential component of navigation; however, it is influenced by environmental conditions such as darkness, fog, or heavy precipitation. Additionally, human operators may experience fatigue or distraction during long navigation periods.

These challenges create a need for advanced technological solutions capable of improving the perception of the maritime environment and supporting navigational decision-

making processes. Artificial intelligence, particularly computer vision technology, provides opportunities to enhance object detection and situational awareness through automated analysis of visual data [7].

Therefore, the objective of this study is to analyze the application of AI-based situational awareness systems in maritime navigation and to examine the Orca AI platform as an example of such technology.

Main Material. Artificial intelligence technologies are increasingly integrated into modern navigation systems. Computer vision algorithms are capable of processing images captured by optical and thermal cameras and detecting objects such as vessels, buoys, and other obstacles present in the maritime environment.

In order to examine the practical application of AI-assisted situational awareness in maritime navigation, the operational characteristics of the Orca AI system were analysed based on available technical documentation, operational reports, and previously published studies on AI-supported navigation systems. Particular attention was given to the integration of optical sensors, radar, and AIS data within a unified situational awareness interface available to navigators on the bridge.

The Orca AI platform uses multiple high-resolution cameras installed on different parts of the vessel in order to ensure wide visual coverage of the surrounding environment. These cameras continuously capture visual data, which is processed by computer vision algorithms capable of identifying maritime objects such as vessels, small boats, navigation buoys, and floating obstacles. The system automatically classifies detected objects and displays them on the situational awareness interface used by the bridge team.

During operation, the system performs continuous monitoring of the surrounding maritime environment. Detected objects are tracked and their movement relative to the vessel is analysed. This allows navigators to receive additional information about surrounding traffic conditions and potential navigation hazards. The integration of visual detection with radar and AIS data creates a unified information environment that supports improved situational awareness on the bridge.

In order to evaluate the potential advantages of AI-based situational awareness systems, the operational capabilities of Orca AI were compared with traditional navigation methods used on ships. These include radar observation, AIS monitoring, and visual watchkeeping performed by bridge personnel. The comparison focused on the ability of each method to detect surrounding objects, the limitations associated with environmental conditions, and the potential improvements achieved through the use of AI-supported perception technologies.

In addition, operational performance indicators reported in fleet-level studies were analysed in order to assess the influence of AI-assisted situational awareness systems on maritime safety. Particular attention was given to indicators such as the frequency of close-encounter situations between vessels, the number of sharp collision-avoidance manoeuvres, and the minimum passing distance between ships during navigation. These indicators allow the assessment of potential safety improvements associated with the implementation of AI-based navigation support systems.

The obtained observations and analysed performance indicators are presented and discussed in the following section.

Research Results. The comparison of traditional navigation methods with AI-assisted situational awareness systems highlights several operational differences in the detection and monitoring of surrounding maritime traffic. These differences are summarized in Table 1. In addition to qualitative comparisons, operational data reported in fleet studies provide quantitative indicators of the safety improvements associated with AI-based situational awareness systems. Selected performance indicators are presented in Table 2. The introduction of AI-assisted monitoring systems also affects the human-factor aspects of bridge operations. The main differences between traditional watchkeeping practices and AI-supported navigation are

presented in Table 3.

Table 1 – Situational Awareness Capability Comparison

Navigation Method	Detection Capability	Limitations	Improvement with AI Situational Awareness
Radar	Detects large targets and vessels at long range	Small objects, wooden boats, debris or buoys may not be detected	AI visual systems detect small vessels and obstacles using cameras and machine learning
AIS	Provides identity, course and speed of AIS-equipped ships	Cannot detect vessels without AIS transmitters (fishing boats, small craft)	AI identifies vessels visually even if AIS is absent
Visual watchkeeping	Human lookout detects objects and navigation hazards	Limited visibility at night, fog, fatigue, workload	AI uses optical and thermal cameras and continuous monitoring
Integrated AI system (Orca AI)	Combines cameras, computer vision, AIS and radar data	Requires installation and integration with bridge systems	Provides automated detection, risk alerts and situational awareness

Table 2 — Safety Performance Improvement (Operational Studies)

Indicator	Result with Orca AI	Data Source
Reduction in close-encounter events	-27% decrease	Fleet study of 110 commercial vessels
Reduction in sharp collision-avoidance manoeuvres	-22% decrease	Operational navigation data
Reduction in extreme speed drops	-18% decrease	Fleet performance analysis
Increase in minimum passing distance	-20-26% improvement	Operational case studies
Reduction in crossing events	-40% decline	Fleet operational analysis
Total CO ₂ reduction due to smoother navigation	-66,000 tonnes	2022 operational data

Table 3 – Human Factor Reduction Indicators

Human-factor challenge	Traditional bridge operation	AI-assisted navigation
Watchkeeper fatigue	Continuous monitoring required	Automated visual monitoring reduces workload
Situational awareness in dense traffic	Manual interpretation of radar/AIS	AI alerts for potential hazards
Detection of non-AIS targets	Depends on visual lookout	AI visual recognition detects small craft
Reaction time to collision risk	Depends on officer experience	AI identifies risk patterns earlier
Information overload	Multiple displays and instruments	Integrated situational awareness interface

Conclusions. Artificial intelligence technologies are playing an increasingly important role in the modernization of maritime navigation systems. AI-based situational awareness platforms provide new possibilities for improving environmental perception and supporting

navigators in monitoring vessel surroundings.

The Orca AI approach demonstrates how computer vision, machine learning, and sensor integration can be applied to assist ship officers in detecting vessels, obstacles, and potential hazards during navigation. These systems function as decision-support tools that complement traditional navigation equipment.

Improved situational awareness may significantly contribute to reducing human-error-related incidents and improving overall maritime safety. As digital technologies continue to evolve, AI-assisted navigation systems are expected to become an integral component of future maritime operations.

REFERENCES

1. Goerlandt, F., & Montewka, J. (2015). Maritime transportation risk analysis: Review and analysis in light of some foundational issues. *Reliability Engineering & System Safety*, 138, 115-134. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.005>
2. Kujala, P., Hänninen, M., Arola, T., & Ylitalo, J. (2009). Analysis of marine traffic safety in the Gulf of Finland. *Reliability Engineering & System Safety*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832009000568>
3. Wróbel, K., Montewka, J., & Kujala, P. (2017). Towards the development of a system-theoretic model for maritime autonomous surface ships safety. *Reliability Engineering & System Safety*, 165, 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.020>
4. Levander, O. (2017). Autonomous ships on the high seas. *IEEE Spectrum*, 54(2), 26–31.
5. Porathe, T., Prison, J., & Man, Y. (2014). Situation awareness in remote control centres for unmanned ships. *Human Factors in Ship Design & Operation Conference*.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7833502>
6. Hossain K. A, (2024). Artificial intelligence (AI) is the smart solution for ocean resources preservation and maritime industry operation in modern era. *Scientific Research Journal (SCIRJ)*, Volume XII, Issue X, 13-59.
<http://dx.doi.org/10.31364/SCIRJ/v12.i10.2024.P10241001>
7. Prasad, D., Rajan, D., Rachmawati, L., Rajabally, E., & Quek, C. (2017). Video processing from electro-optical sensors for object detection and tracking in maritime environments. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7812788>

УДК 358.42:623.76 (477)

ШІ-КАПТАН: ГУЧНЕ ГАСЛО ЧИ ОБ'ЄКТИВНА ПОТРЕБА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУЧАСНОГО СУДНОВОДІННЯ

¹Маменко П. П., ²Рева О.М., ²Камишин В.В., ¹Кириченко К. В.

¹Херсонська державна морська академія
(Україна)

²Український інститут науково-технічної експертизи та інформації
(Україна)

Вступ. Відповідно до веб-сайту Міжнародної морської організації (ІМО) та останніх статистичних даних ICS | Shipping and World Trade, 90% світової торгівлі на сьогодні забезпечується перевезенням відповідних вантажів водними та морськими шляхами. Тому внесок морського та річкового транспорту оцінюється в мільярди євро/долларів на рік, що забезпечує зайнятість мільйонам людей (рис. 1) [1].



Рисунок 1 – Прогнозоване зростання ВВП та населення світової морської торгівлі

Внаслідок наведеного щороку спостерігається позитивна динаміка щільності руху на основних морських шляхах. Що особливо стосується зон внутрішнього плавання (тобто проток, каналів районів наближення до портів) де ймовірність морських навігаційних аварій (зіткнення, посадка на мілину, навала) є досить високою (рис. 2). Судна стають більшими (за розміром) та швидшими (незважаючи на стратегію повільного руху для економії палива), а екіпажі часто перевантажені (як когнітивно, так і з точки зору мінімізації чисельності екіпажу).

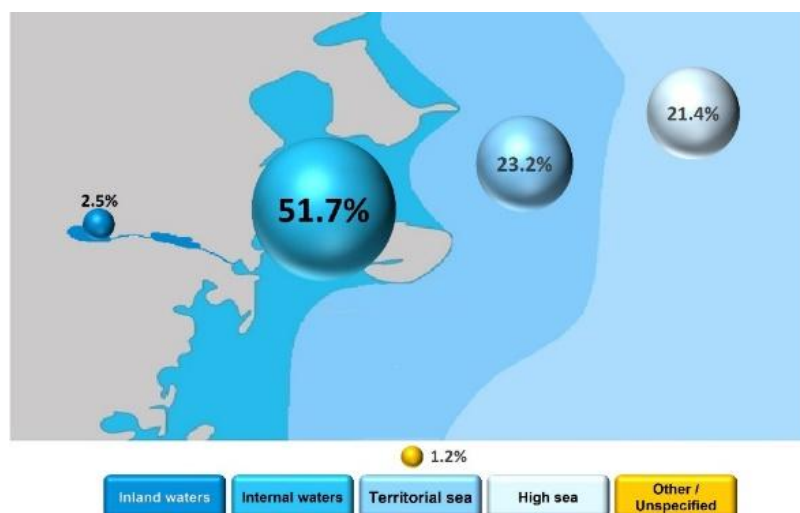


Рисунок 2. – Відсоток морських аварій та інцидентів, упорядкований за навігаційним районом (звіт EMSA 2025-2024)

Незважаючи на десятиліття прогресу в проектуванні суден та навігаційних систем, впровадження штучного інтелекту (ШІ) тощо, основи запобігання зіткненням суден у морі мало змінилися. Від судноводіїв вимагається [2–4]:

- дотримання глобально застосовних правил COLREG;
- належного спостереження та рішучих дій для зменшення виниклих ризиків.

Однак, при цьому не повною мірою враховується, що сучасне операційне середовище є більш вимогливим до професійних здібностей судноводія.

Актуальність дослідження. Морські аварії та катастрофи, особливо виникли з причин людського чинника (ЛЧ), продовжують бути актуальною проблемою в морській галузі, створюючи серйозні загрози для суден, навколишнього середовища та безпеки людей. Автономні навігаційні системи суднопластва завдяки можливості працювати з різним ступенем втручання людини, значно знижують ризик людської помилки, що робить їх важливим інструментом сучасної навігації. На сьогодні морська індустрія стоїть на порозі масштабної трансформації, оскільки штучний інтелект продовжує змінювати галузь від А до Ω. Але при цьому порушується питання, наскільки морська та річна галузь насправді близькі до повністю автономного суднопластва?

Оперативна реальність для команди ходового містку сучасних суден складнішає, оскільки судноплавні шляхи перевантажені, ніж будь-коли., а регуляторне середовище стає все більш вимогливим. Цифрові системи – радар, AIS, ECDIS, GPS та ін. – генерують постійний потік даних, які офіцери мають інтерпретувати в режимі реального часу. Все це відбувається на тлі жорсткіших режимів комплектування екіпажів, зокрема скорочення їх чисельності.

Системи запобігання зіткненням суден (VCAS) на основі комп'ютерного зору, системи ситуаційної обізнаності ORCA-AI та автономного цифрового спостережувального пункту SeaPod, що працюють цілодобово і об'єднують дані датчиків для оцінки ризиків у режимі реального часу, значною мірою підвищують безпеку суднопластва в цілому та зменшують вплив людської помилки. Платформа Orca на базі AI на сьогодні функціонує на понад 1500 суднах по всьому світу і є єдиною системою на ринку, що забезпечує такі можливості. Важливо, що зазначена система спеціально експлуатується як інструмент підтримки прийняття рішень (ПР), а не як заміна екіпажу. Принцип експлуатації системи ґрунтується на традиційному морепластві, де належне спостереження – це перший рівень ситуаційної обізнаності. AI додає впевненості в умовах, коли зорові здібності судноводія обмежені і не забезпечують ефективне судново-діння: туман, темрява, сліпучі відчуття або щільний рух. Мета полягає не в тому, щоб віддавати накази, а в тому, щоб зменшити когнітивне навантаження, позначити потенційні ризики та дозволити судноводіям зосередитися на прийнятті обґрунтованих навігаційних рішень [5-7].

Постановка задачі. На початку 2010-х років морський сектор пережив значних змін, обумовлених прийняттям нормативного документу «Морське суднопластво 4.0», що призвело до безперешкодної інтеграції даних у режимі реального часу в процес ПР методами автоматизації. Зростання успішних випробувань автономних суден збіглося з досягненнями в галузі морської ситуаційної обізнаності та комп'ютерного зору на основі ШІ. З розвитком цих технологій автономна навігація стає більш надійною та практичною для різних судноплавних маршрутів, що ще більше стимулює її впровадження в галузі. Цифровізація в морській галузі переосмислює безпеку та продуктивність суден, від навігаційних даних у режимі реального часу до прогнозного обслуговування та дистанційної діагностики, цифрові судна забезпечують безпечніші та розумніші операції.

Поточний стан навігації та автоматизації суден на основі ШІ, а також очікувані перспективи змін у професійній діяльності моряків та операторів суден, визначаються певними рівнями, особливості яких наочно ілюструє рис. 3.

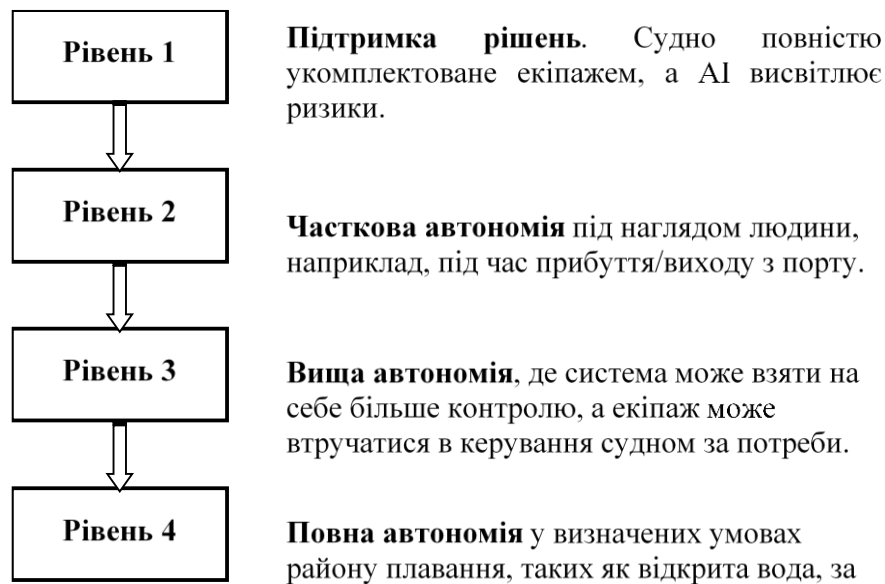


Рисунок 3 – Послідовність впровадження засобів AI в процеси експлуатації суден

Перелік вирішуваних питань: Платформа Orca AI, у комплексі з тепловізійними та інфрачервоними датчиками візіалізації SeaPod, розширила можливості ситуаційної обізнаності, щоб забезпечити 360-градусне поле зору (FOV) навколо судна для покращення прогнозування зіткнень та автономної навігації. Принцип роботи системи, той самий, що й у Правилі 5 COLREG («Спостереження»): вживати «всіх доступних засобів» для підтримки безпеки. Застосування системи AI ORCA-AI у комплексі з датчиками візіалізації SeaPod розширює можливості ходового містка та доповнює традиційні навігаційні інструменти для забезпечення безпечного судноводіння:

- ситуаційна обізнаність на базі радара та III;
- верифікація за допомогою AIS та III;
- ЕКНІС та прогнозна навігація;
- людське спостереження, BRM та когнітивна підтримка рішень;
- бізнес-кейс: рентабельність інвестицій та вплив на безпеку.

Суть дослідження. За допомогою різних навігаційних систем (глобальна система позиціонування (GPS), автоматична система ідентифікації (AIS), RADAR тощо), визначається фактичне положення судна та інформація про курс і швидкість. Аналізуючи ці дані, алгоритми AI можуть PR, пов'язані з керуванням судном, уникненням зіткнень та оптимізацією маршруту. Використовуючи технологію морських перевезень на основі AI, судноплавні компанії можуть динамічно коригувати маршрути судноплавства, щоб уникнути небезпечних погодних зон, зменшити споживання палива та шкідливі викиди, забезпечуючи водночас безпечне перевезення вантажів [8-10].

Висновки. Перехід від статичної звітності до оперативної підтримки PR в реальному часі – це більше, ніж просто технологічна тенденція, це структурна еволюція в тому, як PR в морській сфері. Це свідчить, що автономне судноплавство не є далекою перспективою – воно вже присутнє на сучасних судах у формі підтримки PR на основі AI. Це розширює обізнаність людини, зменшує втому та, у випадку Orca AI, помітно знижує частоту майже промахів. Такі системи створюють основу для поступового підвищення рівня автономності, при цьому оператори-люди повністю контролюють ситуацію.

Для судновласників переваги ситуаційної обізнаності на основі AI виходять за рамки безпеки та включають нижчі профілі ризику та потенційне зниження страхових внесків. Для моряків цінність полягає в тому, щоб зробити їхню роботу безпечнішою та керованішою.

ЛІТЕРАТУРА

1. ICS | Shipping and World Trade. (n.d.). Retrieved May 2, 2019, from <http://www.ics-shipping.org/shipping-facts/shipping-and-world-trade>.
2. European Maritime Safety Agency. ANNUAL OVERVIEW OF MARINE CASUALTIES AND INCIDENTS 2025. Date: 15th of July 2025. <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5562-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2025.html>
3. Бойко А.Д., Демінський А.В. Аналіз стану аварійності водного транспорту в Україні і постановка завдання з удосконалення методів оцінки та управління ризиками виникнення і запобігання аварійних морських подій. Водний транспорт: Збірник наукових праць. Випуск 1(37). 2023. doi.org/10.33298/2226-8553.2023.1.37.09.
4. Стовба Т.А. Фронезіс використання штучного інтелекту в морській галузі. Наукові перспективи. 2023. № 7(37). С. 387-398. DOI: [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2023-7\(37\)-387-398](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2023-7(37)-387-398)
5. Сагін С.С., Сагін С.В. Використання штучного інтелекту в ситуаціях надмірного зближення суден. Водний транспорт: зб. наук. пр. 2024. Вип. 1 (39). С. 215-225. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.22>
6. Калініченко І., Богуславський Є. Використання штучного інтелекту безпілотних суден для визначення перешкод при плаванні. International Science Journal of Engineering & Agriculture. 2024, Vol. 3, No. 3, pp. 92-103. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20240303.09>
7. Онищенко О.А., Мельник О.М., Курдюк С.В., Дрозденко О.І., Гаврилюк Т.К., Бурлаченко Д.А. Застосування методів машинного навчання для оптимізації маршрутів і завдань надводних автономних суден. Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка». 2024. № 12(40). С. 1372-1386. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12\(40\)-1372-1386](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-12(40)-1372-1386)
8. Mamenko, P. (2023). Minimization of ships' passing path in the field of risks. Technology Audit and Production Reserves, 2 (2 (70)), 21–25. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.276419>.
9. Jialun Liu, Fan Yang, Shijie Li, Yaqiong Lv, Xinjue Hu. Testing and evaluation for intelligent navigation of ships: Current status, possible solutions, and challenges. Ocean Engineering. 2024. Vol. 295. Article 116969. DOI:10.1016/j.oceaneng.2024.116969
10. Бажак О.В. Квасников П.К. Рижков Ю.В. Система BEIDOU як інноваційне рішення для морської навігації: комплексний аналіз можливостей та перспектив впровадження. Наука і техніка сьогодні. Серія «Техніка». 2024. № 13(41). С. 875-888. DOI: [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13\(41\)-875-888](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2024-13(41)-875-888)

КОНЦЕПЦІЯ МОДЕЛІ ІНТЕГРАЦІЇ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ДАНИХ У КЕРУВАННІ ГІДРОАКУСТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ СУДЕН

Рудніченко М.Д., Шибасєва Н.О., Шведов Д.В.
Національний університет «Одеська політехніка»
(Україна)

Вступ. Сучасний розвиток морського транспорту супроводжується стрімким зростанням обсягів інформації, що надходить від бортових сенсорних систем, навігаційних комплексів та засобів технічного контролю [1]. Особливе місце серед них займають гідроакустичні системи, які забезпечують навігаційну безпеку, виявлення перешкод, моніторинг підводного середовища та підтримку маневрування судна. Водночас традиційні підходи до оброблення гідроакустичних сигналів переважно орієнтовані на аналіз одного типу даних і не враховують повною мірою потенціал інтеграції різномірних джерел інформації [2]. У цьому контексті перспективним напрямом є розроблення моделей та методів інтеграції мультимодальних даних для підвищення якості керування гідроакустичними процесами в системах морського транспорту.

Актуальність досліджень. Підвищення вимог до безпеки судноплавства, зростання інтенсивності морських перевезень і ускладнення гідрологічних умов експлуатації зумовлюють необхідність створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, здатних працювати в умовах невизначеності та інформаційної надлишковості. Гідроакустичні процеси характеризуються значною варіативністю через вплив температурної стратифікації, солоності, турбулентності та шумового фону. Традиційні алгоритми фільтрації і детекції сигналів демонструють обмежену ефективність за наявності складних перешкод [3].

Сучасні підходи глибинного навчання і мультимодальної інтеграції дозволяють поєднувати акустичні сигнали, навігаційні параметри, дані інерціальних систем та метеорологічну інформацію в єдиному аналітичному просторі, що сприяє підвищенню достовірності оцінювання стану підводного середовища та параметрів руху судна

Постановка задачі. Метою дослідження є розроблення концептуальної моделі інтеграції мультимодальних даних для керування гідроакустичними процесами судна в умовах змінного акустичного середовища.

Основний матеріал. Для досягнення поставленої мети передбачено формування багатовимірного простору ознак, що поєднує спектральні характеристики гідроакустичних сигналів, параметри руху судна, дані гідрометеорологічних сенсорів та контекстну інформацію про навігаційну обстановку. Передбачається створення гібридної архітектури на основі глибинних нейронних мереж з механізмами уваги, здатної виконувати як задачі класифікації підводних об'єктів, так і регресійне оцінювання параметрів акустичного каналу. Особлива увага приділяється забезпеченню адаптивності моделі до зміни умов експлуатації та обмежень обчислювальних ресурсів бортових систем.

Запропонована модель ґрунтується на поєднанні конволюційних та рекурентних нейронних мереж, що забезпечують виділення просторово-часових ознак гідроакустичних сигналів. На першому етапі здійснюється попередня обробка акустичних даних із застосуванням спектрального перетворення та нормалізації енергетичних характеристик. Отримані спектрограми подаються на вхід конволюційного блоку для автоматичного формування інваріантних ознак. Паралельно формується вектор навігаційних і контекстних параметрів, який включає швидкість судна, курс, глибину, температуру води та рівень фонового шуму. Для інтеграції різномірних ознак використовується механізм кросмодальної уваги, що дозволяє моделі визначати вагомість кожного джерела інформації залежно від поточної ситуації.

Архітектура системи передбачає реалізацію двох режимів функціонування. У

режимі навчання модель оптимізується на основі історичних даних, отриманих під час експлуатації суден у різних гідрологічних умовах. У режимі реального часу здійснюється безперервне оновлення параметрів із використанням механізмів онлайн-адаптації, що забезпечує стійкість до дрейфу даних. Для зменшення обчислювальних витрат застосовано методи знання-дистиляції та квантування вагових коефіцієнтів, що дозволяє інтегрувати модель у бортові інформаційні системи без втрати точності.

Особливу роль відіграє підсистема оцінювання невизначеності, яка базується на байєсівській апроксимації вихідних розподілів. Це дозволяє формувати довірчі інтервали для прогнозованих параметрів та передавати їх до систем підтримки прийняття рішень. Таким чином забезпечується підвищення рівня обґрунтованості управлінських рішень у складних навігаційних ситуаціях.

Результати досліджень. Експериментальна перевірка моделі проводилася на вибірці даних, що включала записи гідроакустичних сигналів різної частотної структури та супровідні навігаційні параметри. Результати оцінки точності класифікації підводних об'єктів наведено на рис.1.



Рисунок 1 – Точність класифікації підводних об'єктів

Порівняння з базовими одно модальними підходами продемонструвало зростання точності класифікації підводних об'єктів у середньому на 12 відсотків та зменшення середньоквадратичної похибки оцінювання параметрів акустичного каналу на 15 відсотків. Похибка оцінювання параметрів акустичного каналу наведена на рис.2.



Рисунок 2 – Похибка оцінювання параметрів акустичного каналу

Отримані результати підтверджують доцільність використання мультимодальної інтеграції для підвищення надійності функціонування гідроакустичних систем.

Додатково встановлено, що застосування механізмів уваги сприяє зменшенню впливу шумових компонентів та підвищенню інтерпретованості моделі. Аналіз вагових коефіцієнтів показав, що в умовах підвищеного фоновому шуму система надає більшої ваги навігаційним та гідрологічним параметрам, тоді як у стабільних умовах домінують спектральні ознаки сигналу. Це свідчить про адаптивний характер запропонованої архітектури.

У контексті подальшого розвитку запропонованої концепції інтеграції мультимодальних даних доцільно деталізувати механізми формування спільного латентного простору ознак, який виступає ядром системи керування гідроакустичними процесами. Формування такого простору передбачає узгодження часових масштабів, нормалізацію діапазонів вимірювань та усунення кореляційної надлишковості між каналами даних. Гідроакустичні сигнали, що характеризуються високою частотою дискретизації та значною варіативністю амплітудних параметрів, синхронізуються з навігаційними та гідрометеорологічними показниками шляхом інтерполяції та агрегування у ковзних часових вікнах. Це дозволяє забезпечити коректне поєднання спектральних, кінематичних і середовищних характеристик у межах єдиної аналітичної моделі.

Суттєвим аспектом є врахування фізичної природи поширення акустичних хвиль у водному середовищі. Швидкість звуку залежить від температури, солоності та тиску, що формує складну нелінійну структуру впливів на параметри сигналу. У межах запропонованої архітектури ці залежності імпліцитно відображаються через навчання нейронної мережі на даних різних гідрологічних профілів. Однак додатково доцільно включати фізично інтерпретовані ознаки, зокрема оцінки градієнтів температури та глибини термокліну, що підвищує стабільність моделі в умовах обмеженого навчального набору. Поєднання емпіричного глибинного навчання та фізично обґрунтованих параметрів формує гібридний підхід, здатний забезпечити кращу узагальнювальну здатність.

Інтеграція мультимодальних даних також потребує вирішення задачі вагового балансування джерел інформації. В умовах підвищеного рівня шуму або тимчасової втрати частини сенсорів система повинна адаптивно перерозподіляти значущість доступних каналів. Для цього використовується механізм самонавчальної уваги, який оцінює інформативність кожної модальності на основі поточного контексту. Такий підхід дозволяє зменшити ризик домінування некоректних або зашумлених даних у процесі прийняття рішень. Крім того, застосування регуляризаційних стратегій сприяє запобіганню перенавчанню та підвищує робастність системи.

Висновки. У роботі обґрунтовано доцільність інтеграції мультимодальних даних для підвищення якості керування гідроакустичними процесами суден. Запропонована модель забезпечує підвищення точності і стійкості до зовнішніх збурень завдяки поєднанню глибинного навчання та механізмів кросмодальної уваги.

У процесі експериментальних досліджень було проведено моделювання різних сценаріїв експлуатації, включаючи змінні швидкісні режими судна, варіації глибини та наявність штучних акустичних перешкод. Отримані результати свідчать про стійкість моделі до помірних змін статистичних характеристик сигналу. Зокрема, при зростанні рівня фоновому шуму на 20 відсотків зниження точності класифікації не перевищувало 3 відсотків, що свідчить про ефективність мультимодальної компенсації. Водночас одно модальні підходи демонстрували істотніше погіршення показників, що підтверджує переваги інтегративної стратегії.

Додатково було оцінено часові затрати на оброблення даних у режимі реального часу. Оптимізація архітектури та зменшення розмірності латентного простору дозволили

досягти прийнятної затримки обчислень, що не перевищує допустимих меж для навігаційних задач. Це є критично важливим для впровадження системи у практику судноплавання, де оперативність реагування визначає рівень безпеки.

Отримані результати підтверджують перспективність використання інтелектуальних технологій у системах морського транспорту та створюють передумови для подальшого розвитку адаптивних систем підтримки прийняття рішень у судноплаванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Li Yuxin, Zhang Haibin, Wang Ying & Chen Xudong (2022). Multimodal deep learning for underwater acoustic target recognition. *Applied Acoustics*, 189, 108597, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108597>
2. Zhao Zhen, Chen Wei, Wu Xingming, Chen Peng & Liu Jing (2021). LSTM network for underwater acoustic signal classification. *IEEE Access*, 9, 10450-10460, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051234>
3. Yang Ming, Li Jian, Xu Qiang & Wang Rui (2020). Deep learning based sonar image classification A review. *Remote Sensing*, 12 3, 470, <https://doi.org/10.3390/rs12030470>

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ АДАПТИВНОЇ АРХІТЕКТУРИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ЗНАКІВ У СУДНОПЛАВСТВІ

Рудніченко М.Д., Шибасєва Н.О., Шведов Д.В.
Національний університет «Одеська політехніка»
(Україна)

Вступ. Цифрова трансформація морського транспорту зумовлює зростання ролі інтелектуальних систем, здатних автономно аналізувати великі масиви даних та приймати рішення в умовах динамічного середовища [1]. Процеси розпізнавання в судноплаванні охоплюють ідентифікацію навігаційних ситуацій, класифікацію технічних станів обладнання, виявлення аномалій у функціонуванні енергетичних систем та інтерпретацію візуальних і сенсорних потоків інформації [2]. Традиційні централізовані алгоритми розпізнавання характеризуються обмеженою гнучкістю, складністю масштабування та залежністю від попередньо визначених сценаріїв. У цьому контексті актуальним є синтез адаптивної архітектури інтелектуальних агентів, здатних до самоорганізації, кооперації та безперервного навчання в умовах змінної інформаційної структури..

Актуальність досліджень. Зростання автономності суден, впровадження концепцій e-Navigation та інтеграція кіберфізичних систем у морській галузі формують потребу у розподілених інтелектуальних середовищах [3]. Автоматизоване розпізнавання процесів має забезпечувати своєчасне виявлення відхилень, прогнозування небезпечних станів та підтримку прийняття рішень екіпажем або автономною системою керування. Проте більшість сучасних рішень базуються на статичних архітектурах нейронних мереж або експертних правилах, що не враховують еволюційний характер середовища та можливість зміни структури задачі [4]. Адаптивні інтелектуальні агенти, які здатні перебудовувати власну архітектуру залежно від контексту, відкривають нові можливості для підвищення надійності та ефективності розпізнавання в судноплаванні.

Постановка задачі. Метою роботи є розроблення методологічних засад синтезу адаптивної багаторівневої архітектури інтелектуальних агентів для розпізнавання навігаційних знаків у системах морського транспорту.

Основний матеріал. Запропонована методика базується на концепції ієрархічної агентної системи, у якій кожен агент виконує локальні функції розпізнавання, а надрівень забезпечує глобальну координацію. На відміну від класичних нейромережових підходів, у роботі застосовано принципи когнітивного моделювання та теорії активного сприйняття. Агент формує внутрішню модель середовища у вигляді динамічної байєсівської мережі, яка відображає причинно-наслідкові зв'язки між спостережуваними подіями та прихованими станами системи.

Процес адаптації реалізується через механізм структурного навчання, що дозволяє агенту змінювати топологію графа залежно від нових даних. На відміну від статичних моделей, запропонований підхід передбачає можливість додавання або видалення вузлів і зв'язків у процесі експлуатації. Це забезпечує еволюційну гнучкість архітектури та дозволяє враховувати появу нових типів ситуацій або відмов обладнання.

Важливим компонентом є модуль метакогніції, який здійснює моніторинг власної продуктивності агента. Він оцінює рівень невизначеності прогнозів, аналізує частоту помилок та приймає рішення щодо ініціації процедур самонавчання або звернення до інших агентів системи. Таким чином реалізується механізм саморефлексії, що підвищує стійкість до деградації якості розпізнавання.

Для забезпечення кооперації між агентами використано протокол узгодження на основі теорії ігор та механізмів консенсусу. Кожен агент передає оцінки ймовірностей розпізнавання у спільний простір, після чого формується агреговане рішення з

урахуванням ваг довіри до кожного учасника. Ваги визначаються адаптивно на основі історії точності та стабільності роботи агента. Такий підхід дозволяє уникнути централізованої точки відмови та забезпечує масштабованість системи.

Пропонована схема архітектури ієрархічної агентної системи наведено на рис.1.



Рисунок 1 – Архітектура ієрархічної агентної системи

Особливу увагу приділено механізмам енергетичної та обчислювальної адаптації. У суднових умовах ресурси можуть бути обмеженими, тому агент здатний перемикатися між різними режимами складності моделі. За умов достатніх ресурсів використовується повна байєсівська структура з глибоким аналізом контексту, тоді як у режимі обмежень застосовується спрощена апроксимація. Перехід між режимами відбувається автоматично на основі оцінки завантаження системи.

У межах експериментального дослідження архітектуру було реалізовано для задачі розпізнавання навігаційних ситуацій на основі потоків даних від радіолокаційних станцій, систем автоматичної ідентифікації та датчиків технічного стану. Було сформовано агентну мережу з декількох функціональних підсистем, кожна з яких спеціалізувалася на окремому класі ознак. Взаємодія агентів дозволила досягти більшої узгодженості рішень у порівнянні з ізольованими моделями.

Результати досліджень. Експериментальні випробування продемонстрували підвищення середньої точності розпізнавання складних навігаційних ситуацій на 14 відсотків у порівнянні з централізованою нейромережевою моделлю. Рівень помилкових спрацювань зменшився на 18 відсотків, що свідчить про ефективність механізмів консенсусу та метакогнітивного контролю. Аналіз показав, що структурна адаптація дозволила системі коректно інтегрувати нові типи подій без повного перенавчання всієї моделі.

Додатково встановлено, що використання розподіленої архітектури забезпечує кращу стійкість до відмов окремих модулів. При відключенні одного з агентів загальна точність зменшувалася не більше ніж на 4 відсотки, тоді як централізована система втрачала до 20 відсотків ефективності. Отримані результати підтверджують доцільність застосування адаптивних агентних підходів у задачах автоматизованого розпізнавання процесів морського транспорту.

У межах експериментальної перевірки адаптивної агентної архітектури було

проведено серію обчислювальних експериментів з варіюванням інтенсивності вхідних потоків даних, рівня шуму та ступеня структурної адаптації. Узагальнені кількісні результати наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати дослідження

№ експери- менту	Точність розпізнавання, %	Рівень помилкових спрацювань, %	Середній час обробки, мс
1	86,4	9,8	142
2	88,1	8,7	150
3	90,5	7,9	163
4	91,2	7,1	158
5	92,8	6,4	171
6	93,6	6	176
7	89,7	8,2	149
8	94,1	5,6	182
9	92,3	6,8	168
10	95	5,1	190

Висновки. У роботі розроблено методику синтезу адаптивної архітектури інтелектуальних агентів для розпізнавання навігаційних знаків у судноплаванні. Запропонований підхід відрізняється від традиційних моделей використанням динамічних байєсівських структур, механізмів метакогнітивного контролю та розподіленого консенсусу. Результати експериментальних досліджень підтвердили підвищення точності, стійкості та масштабованості системи. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію механізмів пояснюваного штучного інтелекту та впровадження федеративного навчання в межах флоту суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wooldridge Michael (2021). An Introduction to MultiAgent Systems Third Edition. Wiley, <https://doi.org/10.1002/9781119415934>
2. Zhang Kai, Yang Zhuoran & Basar Tamer (2021). MultiAgent Reinforcement Learning A Selective Overview of Theories and Algorithms. Handbook of Reinforcement Learning and Control, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-030-60990-0_12
3. Chen Yaran, Li Xiaoyan, Geng Wei & Wang Hong (2022). Adaptive Bayesian Network Structure Learning for Dynamic Systems. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems, 52 7, 4301-4312, <https://doi.org/10.1109/TSMC.2021.3071234>
4. Kraus Sarit, Fiore Marco, Bazzan Ana & Torroni Paolo (2020). Ten Challenges for MultiAgent Systems. Artificial Intelligence, 278, 103174, <https://doi.org/10.1016/j.artint.2019.103174>

ЗАСТОСУВАННЯ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КЕРУЮЧИХ РІШЕНЬ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ОБРОБКИ НЕКОНВЕНЦІЙНИХ ДАНИХ СКЛАДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Шибасєва Н.О., Рудніченко М.Д., Шибасєв Д.С.
Національний університет «Одеська політехніка»
(Україна)

Вступ. Розвиток складних технічних систем, зокрема транспортних інфраструктур, енергетичних комплексів, мережових кіберфізичних платформ та інтелектуальних виробничих об'єктів, супроводжується зростанням обсягів різномірної сенсорної інформації, що потребує оперативної обробки та використання для формування керуючих рішень. Особливого значення набувають неконвенційні сенсорні дані, отримані з відеопотоків, мобільних пристроїв, бездротових сенсорних мереж, розподілених телематичних модулів, акустичних та радарних систем, зокрема, на морському транспорті.

На відміну від традиційних детермінованих вимірювань, такі дані характеризуються неоднорідністю, високим рівнем шуму, неповнотою та варіативністю часових інтервалів надходження. У зв'язку з цим виникає необхідність розроблення нових підходів до оптимізації керуючих рішень, що здатні враховувати стохастичну природу вхідної інформації та динаміку функціонування об'єкта керування.

Одним із перспективних напрямів є використання методів ройового інтелекту, які імітують колективну поведінку біологічних систем та забезпечують ефективний пошук оптимальних рішень у багатовимірних просторах із численними локальними екстремумами. Їх адаптивність, розподілений характер та здатність до самоорганізації роблять їх доцільними для інтеграції у комп'ютерно-інтегровані системи керування на основі сенсорних даних.

Актуальність досліджень. Сучасні автоматизовані системи маршрутизації та управління динамічними процесами функціонують в умовах неповної визначеності та постійної зміни параметрів середовища. Неконвенційні сенсорні джерела дозволяють отримувати більш повну картину стану об'єкта, однак водночас ускладнюють процедуру прийняття рішень через необхідність інтеграції великих обсягів слабкоструктурованих даних.

Класичні методи оптимізації, зокрема градієнтні або лінійні підходи, демонструють обмежену ефективність у задачах з нелінійними залежностями та багатокритеріальною природою. У таких умовах методи ройового інтелекту, зокрема алгоритми частинок, мурашині алгоритми та алгоритми штучних бджолиних колоній, забезпечують більш гнучке налаштування процесу пошуку рішень.

Актуальність дослідження визначається необхідністю розроблення концептуальних засад інтеграції ройових алгоритмів у системи обробки неконвенційних сенсорних даних для формування оптимальних керуючих впливів у складних технічних системах.

Постановка задачі. Метою дослідження є визначення специфіки використання методів ройового інтелекту для оптимізації керуючих рішень у системах, що обробляють неконвенційні сенсорні дані в складних транспортних системах.

Основний матеріал. Неконвенційні сенсорні дані характеризуються високою частотою оновлення, нерівномірністю просторового покриття та різним ступенем достовірності. У складних транспортних системах ці дані надходять у вигляді потоків, що потребують попередньої обробки, фільтрації та агрегування.

У процесі формування керуючого рішення виникає задача оптимізації, що включає кілька критеріїв: мінімізацію часу реакції системи, зменшення енергетичних витрат, підвищення точності прогнозування та забезпечення стійкості до зовнішніх збурень. Такі

задачі мають нелінійний характер і часто містять обмеження, пов'язані з фізичними параметрами системи.

Методи ройового інтелекту реалізують паралельний пошук оптимальних рішень шляхом моделювання взаємодії множини агентів. Кожен агент представляє потенційне рішення та адаптує свою поведінку на основі локальної та глобальної інформації.

У контексті автоматизованих систем маршрутизації транспортних потоків агенти можуть відповідати різним варіантам розподілу потоків або параметрам налаштування регулюючих пристроїв. Інформація, отримана з відеосенсорів, GPS-модулів та інших джерел, використовується для оцінювання якості кожного варіанта рішення.

Специфіка застосування ройових алгоритмів у таких системах полягає в необхідності адаптивного налаштування параметрів пошуку залежно від рівня невизначеності сенсорних даних. За умов високої варіативності доцільним є підвищення коефіцієнта дослідження простору рішень, тоді як при стабільному середовищі акцент переноситься на експлуатацію знайдених оптимальних рішень.

Інтеграція ройового оптимізатора у комп'ютерно-інтегровану систему передбачає наявність модулів збору даних, оцінювання стану, генерації альтернативних рішень та механізму зворотного зв'язку. Важливою складовою є забезпечення синхронізації обчислювальних процесів із часовими характеристиками сенсорних потоків.

Для зменшення обчислювальних витрат доцільно використовувати ієрархічну структуру оптимізації, де на нижньому рівні вирішуються локальні задачі, а на верхньому – глобальна координація. Такий підхід дозволяє масштабувати систему та підвищити її надійність.

Пропонована структура ядра ройового оптимізатора наведено на рис.1.

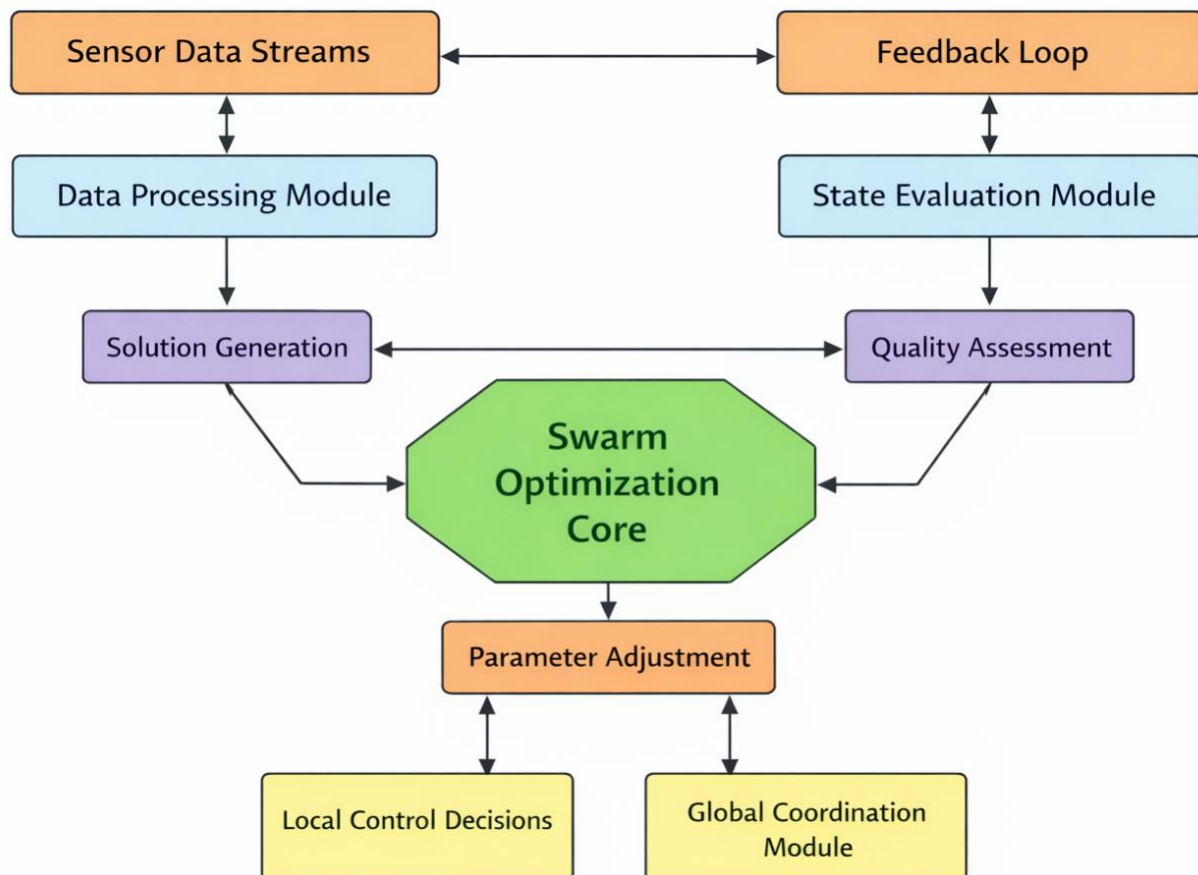


Рисунок 1 – Структура ядра ройового оптимізатора

Особливу увагу приділено механізмам енергетичної та обчислювальної адаптації. У

суднових умовах ресурси можуть бути обмеженими, тому агент здатний перемикається між різними режимами складності моделі. За умов достатніх ресурсів використовується повна байєсівська структура з глибоким аналізом контексту, тоді як у режимі обмежень застосовується спрощена апроксимація. Перехід між режимами відбувається автоматично на основі оцінки завантаження системи.

У межах експериментального дослідження архітектуру було реалізовано для задачі розпізнавання навігаційних ситуацій на основі потоків даних від радіолокаційних станцій, систем автоматичної ідентифікації та датчиків технічного стану. Було сформовано агентну мережу з декількох функціональних підсистем, кожна з яких спеціалізувалася на окремому класі ознак. Взаємодія агентів дозволила досягти більшої узгодженості рішень у порівнянні з ізольованими моделями.

Результати досліджень. Проведений аналіз свідчить, що застосування ройових алгоритмів забезпечує підвищення ефективності оптимізації керуючих рішень у системах з високим рівнем невизначеності сенсорних даних. У порівнянні з традиційними методами спостерігається краща адаптивність до змінних умов та зниження ризику потрапляння в локальні екстремуми.

Імітаційне моделювання показало скорочення часу пошуку прийнятного рішення та підвищення стабільності роботи системи при різких змінах параметрів середовища. Особливо помітний ефект спостерігається у багатокритеріальних задачах, де необхідно одночасно враховувати кілька суперечливих показників ефективності.

Разом із тим встановлено, що результативність ройових алгоритмів значною мірою залежить від правильної параметризації та організації обміну інформацією між агентами. Надмірна інтенсивність обміну може призвести до передчасної конвергенції, тоді як недостатня – до уповільнення процесу оптимізації.

Висновки. Досліджено специфіку використання методів ройового інтелекту для оптимізації керуючих рішень у складних транспортних системах, що обробляють неконвенційні сенсорні дані. Показано, що інтеграція ройових алгоритмів у комп'ютерно-інтегровані системи керування сприяє підвищенню адаптивності та стійкості до невизначеності. Обґрунтовано доцільність використання ієрархічної структури оптимізації та адаптивного налаштування параметрів пошуку залежно від характеристик сенсорних потоків. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення механізмів гібридизації ройових методів із предиктивними моделями машинного навчання та оцінювання їх ефективності у реальних умовах експлуатації складних транспортних систем на морі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
2. Dorigo, M., & Birattari, M. (2010). Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 28–39. <https://doi.org/10.1109/MCI.2006.329691>
3. Poli, R., Kennedy, J., & Blackwell, T. (2007). Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence*, 1, 33–57. <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0>
4. Li, Y., Yu, R., Shahabi, C., & Liu, Y. (2020). Diffusion convolutional recurrent neural network: Data-driven traffic forecasting. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 3455–3466. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3011826>

THE ROLE OF MODEL CONTEXT PROTOCOL IN THE FUNCTIONING OF MARITIME TRANSPORTATION INFORMATION SYSTEMS

Romanov A.
Odesa National Maritime University
(Ukraine)

Introduction. The maritime industry is currently undergoing a digital transformation. The increasing volume of data generated by shipboard sensors, satellite systems, and port infrastructure demands new approaches to information processing. Traditional methods of information processing and analysis are becoming less effective due to the highly dynamic nature of the maritime environment and the complexity of supply chains. The integration of Artificial Intelligence (AI) into maritime transportation information systems is becoming an increasingly obvious necessity to ensure navigational safety and economic profitability. Specifically, the implementation of the Model Context Protocol (MCP) ensures the efficient processing of large volumes of data by Large Language Models (LLMs). MCP, developed by Anthropic in 2025 as an open standard, is based on JSON-RPC 2.0 for the seamless communication of LLMs with external data servers [1].

Research relevance. The relevance of this study is dictated by the critical need to bridge the gap between rapidly advancing AI capabilities and legacy maritime data systems. The inability of traditional systems to process high-velocity data in real-time severely limits the potential of predictive analytics, necessitating the adoption of modern, standardized integration protocols.

In the Ukrainian maritime industry, where the government is implementing a digital shipping transformation in 2026, MCP is set to play a key role in the formation of the Maritime Single Window and Port Community Systems, which is extremely important for navigation and the country's economy [2, 3].

Most maritime transportation information systems function as a collection of heterogeneous tools that utilize specific data transmission protocols [4, 5].

One of the prevalent problems in organizing the operation of transportation information systems is the difficulty of combining and analyzing information from various sources in real-time. The inefficient use of AI tools typically looks as follows: data is first exported, processed, and then passed to the model. This creates delays and the risk of the information losing its relevance. Among modern maritime standards, SignalK stands out – an open platform for aggregating NMEA, AIS, and sensor data, which already features an MCP server for read-only access [6].

Problem statement. The main objective of this research is to investigate and analyze existing approaches to data organization and processing within maritime transportation information systems. Based on investigation results, another goal is to develop and substantiate a unified architectural approach for integrating LLMs into maritime transportation systems using MCP. The goal is to eliminate data silos, overcome latency issues, and enable real-time, context-aware decision-making without the need for manual data preprocessing.

Main content. The Model Context Protocol is a universal, open standard designed to ensure seamless communication between AI models and external data sources or tools. Unlike standard retrieval-augmented generation methods, where the AI merely searches for information within data sources, MCP allows it to:

- Independently initiate queries to a sensor or database via a standardized MCP server.
- Differentiate access rights, which is extremely important when working with critical shipboard infrastructure.
- Integrate with various AI models (Claude, GPT, Gemini, or custom local models), which eliminates dependence on a single AI service provider [7].

The use of MCP ensures a substantial enhancement in operational efficiency through the

automation of key processes that have traditionally required manual intervention by the crew. Rather than relying on static planning or reactive measures, MCP provides the AI with direct, standardized access to real-time data, thereby minimizing human error and optimizing resource allocation. Specifically, the following processes are automated:

- Instead of static planning, AI gains direct access to meteorological servers, vessel loading data, and fuel characteristics via MCP. This allows the route to be adjusted in real-time to comply with IMO requirements regarding the Carbon Intensity Indicator (CII) [8].
- An AI assistant, having access via MCP to engine data and vibration sensors, can detect pre-critical equipment states long before the emergency alarm triggers, automatically check the availability of spare parts in the warehouse, and prepare a repair request for the next port.
- Through MCP, AI can continuously analyze traffic within shipboard networks. In the event of abnormal activity detection (for example, AIS signal spoofing), the AI instantly compares the data with the radar and visual sensors via the respective protocol servers, warning the crew of a potential attack.

MCP is a key protocol for integrating AI with shipboard infrastructure. Unlike existing information transportation systems, where the crew manually monitors dashboards, MCP servers (e.g., SignalK MCP Server) grant AI read-only access to data: navigation, AIS targets, alarms, battery sensors, wind, temperature – all through standardized JSON-RPC requests. This enables leveraging all the advantages of AI in the workflow: the crew formulates a request, the AI automatically selects tools, interprets the data within the ship's context and issues recommendations (Fig. 1).

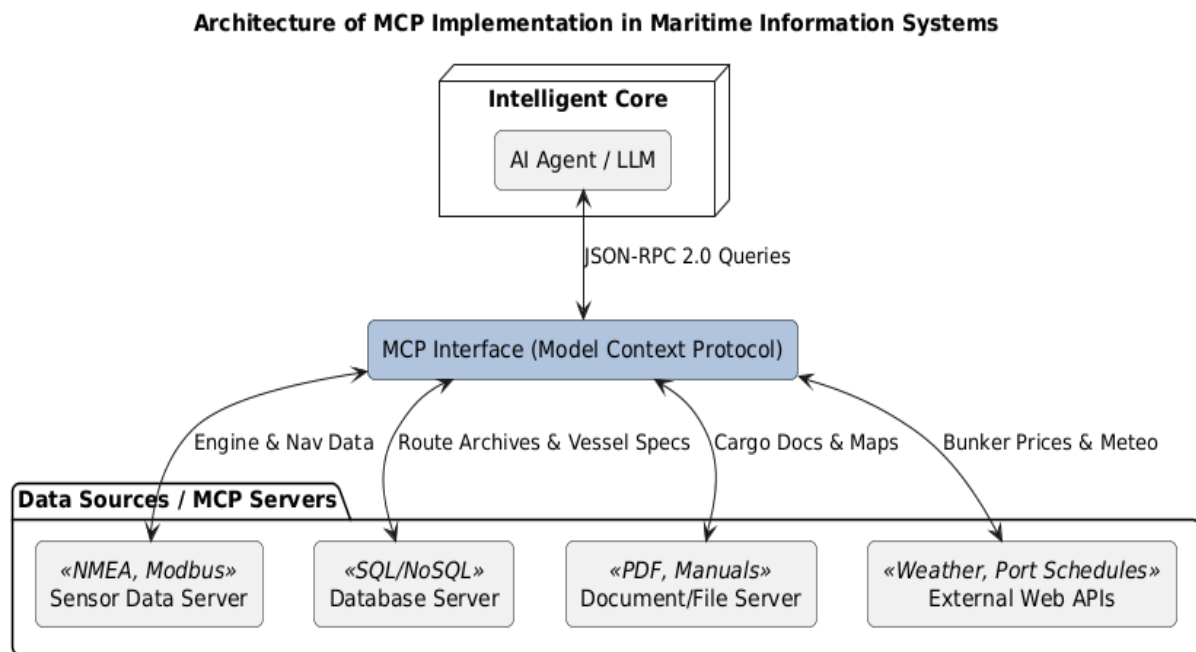


Figure 1 – The general scheme of interaction of the information system with LLM through the MCP

Let's consider a scenario of a ship entering a port under conditions of restricted visibility (Fig. 2):

1. Query generation – the captain formulates a query in the AI-integrated system: «Assess the safety of mooring given the current wind and the technical condition of the thrusters».
2. Communication with LLM via MCP.
 - MCP Server #1 (External Web APIs) retrieves the current wind speed.
 - MCP Server #2 (Sensor data server) checks the power output and operational

- status of the engines.
- MCP Server #3 (Document/File server) checks the terminal's restrictions.
3. Aggregation – the aggregated data is sent for processing to the integrated LLM.
 4. Recommendation – the AI issues an accurate recommendation based on factual data rather than an outdated knowledge base.

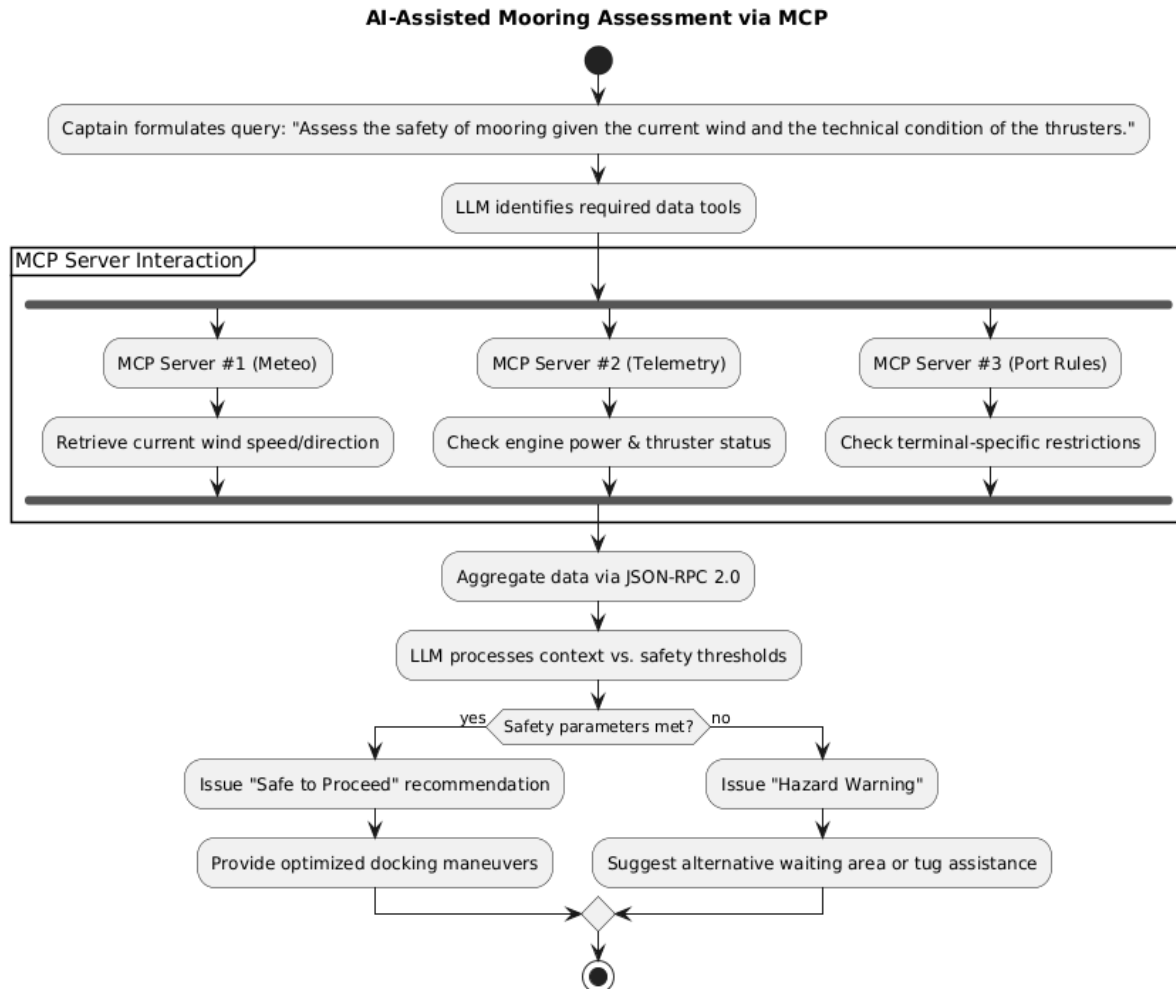


Figure 2 – MCP use-case example

The implementation of the MCP in maritime transportation information systems is a technical shift in fleet management that enables direct communication between LLMs and shipboard operational infrastructure. This protocol facilitates the integration of AI into maritime processes, transitioning from isolated analytical tools to integrated systems capable of responding to dynamic environmental changes in real time.

Research results. As a result of this research, a conceptual interaction model was formulated and validated against operational maritime scenarios, demonstrating how MCP acts as a key protocol for integrating AI with shipboard infrastructure.

Furthermore, the secondary results of this research highlight the potential superior performance of MCP-integrated LLMs in addressing complex maritime optimization problems. By establishing direct data streams through the SignalK MCP Server, the system achieves higher precision in addressing most common maritime transportation tasks, including the Travelling Salesman Problem (TSP) and multiple Travelling Salesman Problem (mTSP) for fleet coordination, potentially outperforming traditional heuristic algorithms in both time and fuel efficiency. However, these findings are preliminary, and more empirical studies are needed to confirm whether LLMs consistently surpass established heuristics in real-world maritime

conditions. [9, 10].

Conclusions. The findings of this study indicate that the implementation of the Model Context Protocol represents a fundamental paradigm shift in maritime digital architecture, extending well beyond simple logistical routing and fleet coordination. By providing a standardized bridge between AI and operational hardware, MCP transforms critical shipboard operations. Specifically, by enabling the continuous, automated analysis of shipboard network traffic, radar and visual sensors data, MCP allows AI systems to detect potential risks.

In predictive maintenance, direct interaction with MCP servers allows AI to detect anomalies in engine and system operations earlier than conventional methods, reducing the risk of unexpected downtime and increasing operational reliability. LLMs connected via MCP to dynamic data sources, including NMEA, Modbus, and AIS sensors, show promise for higher efficiency than traditional algorithms in solving complex maritime planning optimization problems. Specifically, MCP allows LLMs to address TSP and mTSP, which are fundamental for fleet coordination in complex logistical scenarios. Recent studies highlight how LLMs via MCP can access sensor data streams, providing high-precision, real-time route optimization for the TSP and suggesting potential advantages over heuristic methods in terms of time and resource efficiency. For mTSP, the combination of LLMs, genetic algorithms, and MCP integration with port APIs optimizes resource allocation for vessel groups more effectively than classical computational strategies. This architecture, supported by the SignalK MCP Server, ensures consistent access to AIS targets and meteorological data, allowing for adaptive route adjustments based on navigational conditions and regulatory requirements.

Nevertheless, the claim that LLMs outperform heuristics in TSP and mTSP requires further investigation through benchmarking, large-scale simulations, and on-vessel trials to validate performance across diverse scenarios.

Furthermore, this study directly aligns with Ukraine's strategic initiatives for the digitalization of the maritime sector and its seamless integration into the Maritime Single Window, Port Community Systems transport and data-sharing networks.

REFERENCES

1. Introducing the Model Context Protocol URL: <https://www.anthropic.com/news/model-context-protocol> (Date of access: 27.02.2026)
2. Smentyna, N. (2025). Digitalization of the maritime industry of ukraine: economic effects and strategic priorities of competitiveness. Kyiv Economic Scientific Journal, (9), 248-256. <https://doi.org/10.32782/2786-765X/2025-9-33>
3. USPA has launched a single maritime window in test mode at the Pivdennyi port URL: <https://www.uspa.gov.ua/news/ampu-zapustyla-yedyne-morske-vikno-v-testovomu-rezhymi-v-portu-pivdennyj> (Date of access: 1.03.2026)
4. Essaadali, Riadh & Jebali, Chokri & Grati, Khaled & Kouki, Ammar. (2015). AIS data exchange protocol study and embedded software development for maritime navigation. DOI: 10.1109/CCECE.2015.7129519.
5. Khan, Muhammad & Ab-Rahim, Rossazana & Yeng, Sin. (2025). A Conceptual Overview of Enterprise Resource Planning Systems. International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences. DOI: 10.6007/IJARBS/v15-i5/25490.
6. Signal K Specification. URL: <https://signalk.org/specification/1.7.0/doc/> (Date of access: 2.03.2026)
7. Choi, Wan Chong & Chang, Chi In & Choi, Iek & Lam, Lai Chu. (2025). A Review of Large Language Models (LLMs) Development: A Cross-Country Comparison of the US, China, Europe, UK, India, Japan, South Korea, and Canada. DOI: 10.20944/preprints202504.2136.v1
8. CII – Carbon Intensity Indicator. URL: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/CII-carbon-intensity-indicator/> (Date of access: 4.03.2026)

9. Da Ros, Francesca & Soprano, Michael & Di Gaspero, Luca & Roitero, Kevin. (2025). Large Language Models for Combinatorial Optimization: A Systematic Review. DOI: 10.48550/arXiv.2507.03637
10. Elhenawy, M., Abutahoun, A., Alhadidi, T. I., Jaber, A., Ashqar, H. I., Jaradat, S., Abdelhay, A., Glaser, S., Rakotonirainy, A. (2024). Visual Reasoning and Multi-Agent Approach in Multimodal Large Language Models (MLLMs): Solving TSP and mTSP Combinatorial Challenges. Machine Learning and Knowledge Extraction, 6(3), 1894-1920. DOI: <https://doi.org/10.3390/make6030093>

АНАЛІЗ AIS-ДАНИХ У СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА

Степанюк К.С., Розум М.В.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Моніторинг морського простору є ключовим елементом для забезпечення економічної та стратегічної безпеки, а також для контролю за дотриманням екологічних та правових норм у акваторіях. Основним джерелом даних [1] для відстеження руху суден є автоматична ідентифікаційна система (AIS) яка надає великі масиви даних про динамічні, статичні та рейсові характеристики суден, що відкриває можливості для аналізу морського трафіку за допомогою методів обробки великих даних та машинного навчання [2].

Актуальність досліджень. Сучасні системи підтримки прийняття рішень у морській галузі критично залежать від якості навігаційних даних. Проте кооперативна природа AIS робить її вразливою до апаратних збоїв та навмисного вимкнення транспондерів екіпажами з метою приховування своєї діяльності (нерегульований промисел, порушення зон судноплавства, тощо) [3]. Це призводить до появи так званих «темних суден» у моніторингу акваторій. Супутникові радіолокаційні технології (SAR) дозволяють ефективно фіксувати наявність об'єктів на воді незалежно від активності AIS та погодних умов. Однак, «сирі» детекції SAR не дають вичерпної інформації про тип та призначення судна. У зв'язку з цим виникає потреба у розробці інтелектуальних методів за допомогою методів машинного навчання.

Постановка задачі. Проблема ідентифікації типу судна за умов навмисного вимкнення AIS або маніпуляції з реєстровими даними потребує створення методів класифікації, що базуються на об'єктивних параметрах поведінки. Метою роботи є розробка та дослідження ефективності моделі інтелектуальної ідентифікації типів риболовних суден на основі алгоритму Gradient Boosting для автоматизованої класифікації типів риболовних суден шляхом інтеграції різномірних даних (AIS, SAR та батиметрії).

Для досягнення мети сформульовано наступні завдання:

1. Виконати попередню обробку та просторове злиття навігаційних треків з геопросторовими растровими шарами.
2. Сформулювати набір комплексних ознак (Feature Engineering), що описують як фізичні, так і поведінкові особливості суден [4].
3. Навчити класифікаційну модель на базі алгоритму Gradient Boosting для розділення флоту на цільові класи (траулери та сейнери).
4. Оцінити практичну придатність моделі шляхом її застосування до масиву неідентифікованих детекцій (категорія «Undefined fishing») з метою класифікації потенційно «темних» суден виключно за їх поведінковими характеристиками.

Основний матеріал. Дослідження проводилось на базі агрегованих відкритих даних міжнародної організації Global Fishing Watch [5]. Інструментальною базою для розробки моделі було обрано мову програмування Python із використанням спеціалізованих бібліотек машинного навчання. Масив даних було просторово відфільтровано виключно для акваторії Чорного моря. Після етапу очищення даних від аномалій та дублікатів було сформовано збалансовану вибірку, що складається з 935 унікальних риболовних суден (470 сейнерів та 465 траулерів).

Процес конструювання ознак (Feature Engineering) полягав у просторовому злитті динамічних треків AIS та даних з SAR із растровими картами батиметрії та віддаленості від берега. Для вирішення задачі бінарної класифікації було обрано ансамблевий алгоритм Gradient Boosting. З метою максимізації прогностичної здатності та уникнення перенавчання, налаштування гіперпараметрів моделі здійснювалося автоматизовано за допомогою методу перехресної перевірки (GridSearchCV).

Результати досліджень. Оцінка ефективності розробленого підходу проводилася у два етапи. На першому етапі модель навчалася на повному наборі даних. Оптимізована модель (`learning_rate=0.1`, `max_depth=4`, `n_estimators=500`) продемонструвала високу загальну точність (Accuracy) на рівні 86.48%. Аналіз важливості предиктора (рис. 1) підтвердив, що ключову роль у цій конфігурації відіграють фізичні властивості: потужність головного двигуна в кіловатах (`engine_power_kw`) та довжина судна на основі аналізу радіолокаційної сигнатури на знімку (`sar_measured_length`).

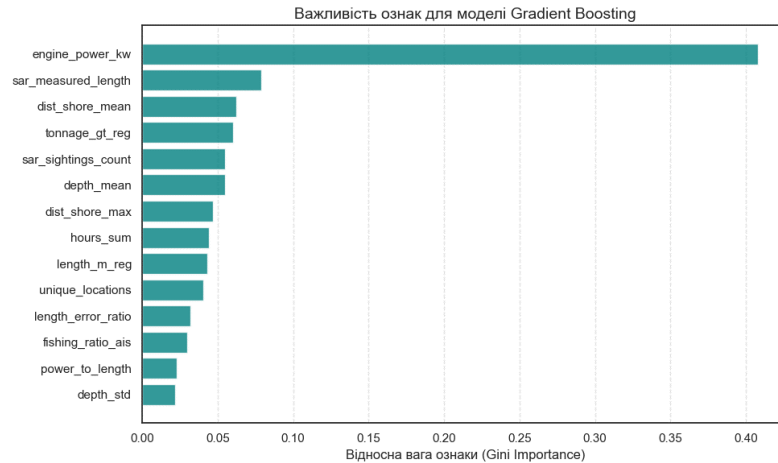


Рисунок 1 – Результати ідентифікації суден (повний набір ознак)

На другому етапі було змодельовано ситуацію моніторингу «темного судна», коли офіційні реєстрові дані недоступні або сфальсифіковані. З навчальної вибірки було вилучено всі статичні характеристики, змушуючи алгоритм спиратися виключно на просторово-поведінкові патерни (глибина, відстань до берега, тривалість лову) та незалежні радіолокаційні детекції SAR. Для цієї задачі GridSearchCV визначив оптимальну кількість дерев на рівні 50 (`max_depth=5`). Незважаючи на критичне скорочення вхідної інформації, модель продемонструвала точність 85.41% на тестовій вибірці. Зміна ієрархії ознак (рис. 2) засвідчила, що за відсутності фізичних параметрів модель успішно переорієнтовується на геопросторовий контекст: середню глибину (`depth_mean`) та віддаленість від берега (`dist_shore_mean`).

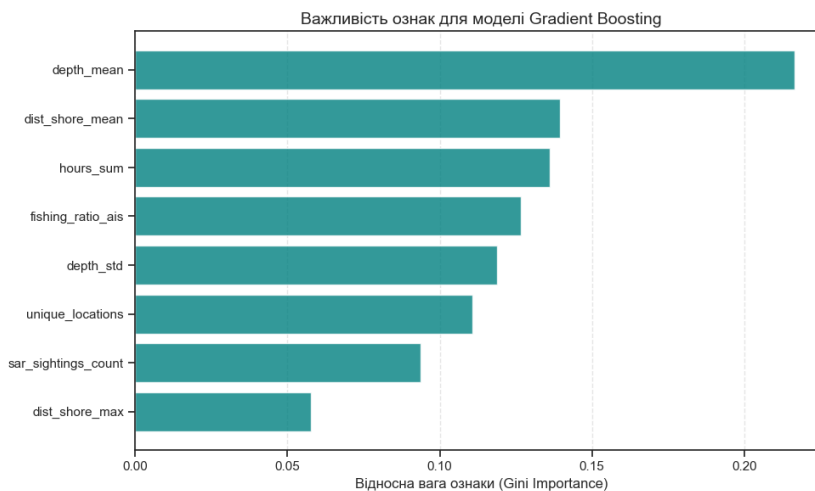


Рисунок 2 – Результати ідентифікації суден (поведінковий набір ознак)

Висновки. Проведене дослідження підтверджує високу ефективність методів машинного навчання у задачах інтеграції різномірних навігаційних даних. Отримані

результати доводять, що відсутність або навмисне приховування ідентифікаційних даних судна через вимкнення AIS не є критичною перешкодою для його класифікації. Розроблена модель здатна ідентифікувати тип риболовного судна (траулер або сейнер) виключно за його просторовою поведінкою з точністю понад 85%. Впровадження подібних алгоритмів Data Fusion у системи підтримки прийняття рішень дозволить автоматизувати процес виявлення «тіньового флоту», що є фундаментальним кроком для підвищення рівня безпеки судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Maritime Organization (IMO). International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974 [Electronic resource]. Available at: [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-\(solas\)%2c-1974.aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-safety-of-life-at-sea-(solas)%2c-1974.aspx)
2. Yang Y., Liu Y., Li G., Zhang Z., Liu Y. Harnessing the power of Machine learning for AIS Data-Driven maritime Research: A comprehensive review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2024. Vol. 183. Art. 103426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103426>.
3. Singh, S. K., & Heymann, F. (2020). Machine learning-assisted anomaly detection in maritime navigation using AIS data. *arXiv preprint arXiv:2002.05013*. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.05013>
4. Nielsen, J. K. (2025). Machine learning-based classification of vessel types in straits using AIS tracks. *arXiv preprint arXiv:2509.18109*. DOI: <https://arxiv.org/abs/2509.18109>
5. Global Fishing Watch. Datasets & Code [Electronic resource]. Available at: <https://globalfishingwatch.org/datasets-and-code/>

ЗАСТОСУВАННЯ LIDAR-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРСЬКОГО ДНА

Томчаковський Г. Г.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Світовий океан займає понад 70 % поверхні Землі та відіграє ключову роль у функціонуванні глобальної кліматичної системи, формуванні біологічного різноманіття та забезпеченні ресурсної бази людства. Незважаючи на фундаментальне значення океанічного середовища для розвитку цивілізації, значна частина морського дна досі залишається недостатньо дослідженою. Детальне картографування підводного рельєфу є важливою передумовою для розвитку морської навігації, управління прибережними територіями, дослідження геологічних процесів, моніторингу екосистем і раціонального використання морських ресурсів.

Батиметричні дані лежать в основі більшості сучасних океанографічних досліджень, а також є критично важливими для планування інженерних робіт, прокладання підводних комунікацій, розвідки корисних копалин і забезпечення безпеки судноплавства. Упродовж тривалого часу основними інструментами дослідження морського дна залишалися акустичні методи, що базуються на використанні гідроакустичних систем різних типів. Однак розвиток оптичних технологій дистанційного зондування призвів до появи альтернативних підходів до отримання батиметричних даних, серед яких особливе місце займають системи лазерного сканування.

Одним із найбільш перспективних напрямів розвитку сучасних технологій морського картографування є застосування LiDAR-систем. Ця технологія базується на використанні лазерного випромінювання для визначення відстані до об'єктів і формування високоточної тривимірної моделі поверхні. LiDAR-системи широко використовуються в топографічних дослідженнях, геодезії, атмосферних вимірюваннях та дистанційному зондуванні Землі [1]. Водночас застосування таких систем у підводному середовищі має ряд технічних особливостей, пов'язаних із фізичними властивостями води, що істотно впливають на поширення світлового випромінювання.

Сучасні підводні LiDAR-системи здатні забезпечувати надзвичайно високу просторову роздільну здатність та точність вимірювань, що відкриває нові можливості для детального дослідження рельєфу морського дна. Однак висока вартість обладнання, складність інтеграції з морськими платформами та обмеження, пов'язані з умовами водного середовища, стримують широке впровадження таких систем у практику регулярних батиметричних досліджень.

Враховуючи сучасні тенденції розвитку океанографічних досліджень, актуальним є пошук технологічних рішень, які дозволять створити доступні та ефективні підводні LiDAR-системи, здатні працювати в умовах мілководних і прибережних районів. Такі системи можуть стати важливим доповненням до існуючих методів картографування морського дна та забезпечити отримання високоточної інформації про структуру підводного рельєфу.

Актуальність досліджень. Попри значні досягнення в галузі океанографії, морське дно залишається однією з найменш досліджених частин планети. За сучасними оцінками, значна частина океанічного рельєфу відома лише з низькою просторовою роздільною здатністю, що обмежує можливості точного аналізу геологічних структур, підводних ландшафтів та екосистем.

Міжнародна ініціатива Seabed 2030 спрямована на створення повної карти морського дна до 2030 року [2]. Реалізація цього проєкту передбачає значне збільшення обсягів батиметричних досліджень і використання нових технологічних рішень, здатних підвищити ефективність збору даних. Водночас аналіз наявної інформації свідчить про те,

що найбільші труднощі виникають саме під час картографування мілководних районів, глибина яких не перевищує 200 м [3].

Ці райони мають особливе значення, оскільки саме в прибережних водах зосереджена значна частина біологічного різноманіття океану, а також більшість об'єктів господарської діяльності людини. Крім того, мілководні зони характеризуються складною морфологією дна, наявністю численних природних та антропогенних об'єктів, що потребує використання методів з високою просторовою роздільною здатністю.

Традиційні акустичні методи картографування, зокрема багатопроменеві ехолоти, демонструють високу ефективність у глибоководних районах, проте їх застосування в прибережних водах часто ускладнюється умовами навігації, обмеженими глибинами та складною конфігурацією берегової лінії. Крім того, акустичні системи мають обмежену просторову роздільну здатність, що може бути недостатнім для детального аналізу дрібномасштабних структур морського дна [4].

Оптичні методи дистанційного зондування також широко використовуються для дослідження прибережних акваторій. Пасивна оптична зйомка дозволяє отримувати інформацію про структуру донного покриття, однак її ефективність суттєво залежить від прозорості води та освітленості [5].

У цьому контексті активні оптичні методи, зокрема LiDAR-технології, мають значний потенціал для вирішення проблеми високоточного картографування мілководних районів. Підводні LiDAR-системи здатні забезпечувати високу щільність точок вимірювання та отримувати детальні тривимірні моделі морського дна навіть у складних умовах дослідження.

Таким чином, розроблення доступних і ефективних підводних LiDAR-систем є важливим науковим і технологічним завданням, що має значний потенціал для розвитку сучасних методів дослідження морського середовища.

Постановка задачі. Основною проблемою сучасного батиметричного картографування є необхідність поєднання високої точності вимірювань, великої площі покриття та економічної ефективності досліджень. Існуючі технології, хоча й забезпечують отримання якісних даних, часто потребують значних фінансових витрат і складної технічної інфраструктури.

З огляду на це виникає потреба у створенні нових технічних рішень, здатних забезпечити ефективне картографування мілководних і прибережних районів із використанням компактних і відносно недорогих систем.

Основними задачами дослідження є:

- аналіз сучасних методів отримання батиметричних даних;
- визначення обмежень існуючих технологій у мілководних районах;
- дослідження принципів роботи підводних LiDAR-систем;
- оцінка можливостей використання різних методів лазерного вимірювання відстані;
- визначення технічних параметрів перспективної підводної LiDAR-системи для батиметричних досліджень.

Вирішення цих задач дозволить сформувати науково-технічні передумови для створення доступних систем підводного лазерного сканування, які можуть використовуватися як на дослідницьких судах, так і на автономних підводних апаратах.

Основний матеріал. Батиметричне картографування морського дна є складним міждисциплінарним завданням, що поєднує методи гідроакустики, оптичного зондування, навігації та комп'ютерної обробки даних. Сучасні технології отримання батиметричної інформації можна умовно поділити на три основні групи: акустичні, пасивні оптичні та активні оптичні методи.

Найбільш поширеним інструментом морських досліджень залишаються багатопроменеві ехолоти, які формують віялоподібний акустичний сигнал і дозволяють

отримувати інформацію про глибину на значній площі морського дна під час одного проходу судна. Сучасні системи здатні формувати сотні акустичних променів і охоплювати смугу шириною, що в декілька разів перевищує глибину води [6].

Проте акустичні системи мають обмеження щодо просторової роздільної здатності. Як правило, вертикальна точність таких вимірювань становить приблизно 1 % від глибини, що є достатнім для глибоководних досліджень, але може бути недостатнім для детального аналізу мілководних структур [4].

Іншим важливим напрямом розвитку батиметричних технологій є застосування оптичних методів. Пасивна оптична зйомка дозволяє отримувати інформацію про структуру морського дна на основі аналізу відбитого сонячного світла. Такий підхід широко використовується у супутниковому дистанційному зондуванні, проте має суттєві обмеження, пов'язані з прозорістю води та складністю інтерпретації отриманих даних [7].

Активні оптичні системи, до яких належить LiDAR, дозволяють усунути частину цих обмежень завдяки використанню власного джерела випромінювання. Принцип роботи LiDAR базується на вимірюванні часу проходження лазерного імпульсу до об'єкта і назад, що дозволяє з високою точністю визначати відстань до досліджуваної поверхні [1].

У підводному середовищі найчастіше використовують лазери зеленого спектрального діапазону з довжиною хвилі близько 532 нм, що забезпечує максимальну глибину проникнення світла у воду [8].

Існує кілька основних методів визначення відстані у LiDAR-системах:

- метод часу прольоту (Time of Flight);
- метод триангуляції;
- метод фазового зсуву.

Метод часу прольоту є найбільш поширеним у батиметричних системах. Він базується на вимірюванні інтервалу часу між випромінюванням лазерного імпульсу та реєстрацією відбитого сигналу. Висока швидкість поширення світла дозволяє отримувати значно точніші вимірювання порівняно з акустичними методами на малих дистанціях [9].

Метод триангуляції використовує геометричні співвідношення між джерелом випромінювання, об'єктом і приймачем сигналу. Він забезпечує надзвичайно високу точність на коротких дистанціях, однак його ефективність зменшується зі збільшенням відстані до об'єкта.

Метод фазового зсуву базується на аналізі різниці фаз між випроміненим та відбитим сигналом і дозволяє отримувати високоточні вимірювання при використанні безперервного лазерного випромінювання [10].

Результати досліджень. Проведений аналіз показує, що підводні LiDAR-системи мають значний потенціал для використання у батиметричних дослідженнях, особливо у мілководних районах. Завдяки високій просторовій роздільній здатності такі системи здатні формувати детальні тривимірні моделі морського дна та виявляти дрібномасштабні морфологічні структури.

Порівняльний аналіз існуючих методів вимірювання відстані свідчить про те, що найбільш універсальним для батиметричних досліджень є метод часу прольоту, який забезпечує оптимальне поєднання точності та робочої дистанції.

Водночас для дослідження об'єктів на малих відстанях доцільним може бути використання триангуляційних систем, що забезпечують міліметрову точність вимірювань.

Результати аналізу також показують, що ефективність підводних LiDAR-систем значною мірою залежить від характеристик водного середовища, зокрема прозорості, концентрації зважених частинок та оптичних властивостей води.

Інтеграція LiDAR-систем із сучасними навігаційними технологіями, такими як інерціальні системи навігації, алгоритми SLAM та фотограмметричні методи обробки даних, дозволяє значно підвищити точність позиціонування і створювати високоякісні цифрові моделі морського дна.

Висновки. Проведений аналіз сучасних методів батиметричного картографування показав, що існуючі технології мають суттєві обмеження під час дослідження мілководних і прибережних районів. Акустичні системи забезпечують ефективне зондування на великих глибинах, однак їх просторової роздільної здатності часто недостатньо для детального дослідження складних морфологічних структур.

Оптичні методи дистанційного зондування дозволяють отримувати більш детальні дані, проте їх ефективність значною мірою залежить від умов водного середовища.

Підводні LiDAR-системи поєднують переваги активного оптичного зондування та високої просторової точності, що робить їх перспективним інструментом для дослідження морського дна.

Створення доступних підводних LiDAR-систем може значно підвищити ефективність батиметричних досліджень у мілководних районах і зробити можливим регулярний моніторинг прибережних екосистем.

Подальші дослідження у цьому напрямі мають бути спрямовані на оптимізацію технічних параметрів систем, зниження вартості обладнання та інтеграцію LiDAR-технологій із сучасними автономними морськими платформами.

ЛІТЕРАТУРА

1. P. Chazette, J. Totems, L. Hespel, and J.-S. Bailly Principle and Physics of the LiDAR Measurement in Optical Remote Sensing of Land Surface. 2016. pp. 201–247.
2. Seabed 2030 Project [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://seabed2030.org/>.
3. L. Mayer et al., «The Nippon Foundation — GEBCO Seabed 2030 Project: The Quest to See the World's Oceans Completely Mapped by 2030», Geosciences, vol. 8, no. 2, 2018.
4. K. Colbo, T. Ross, C. Brown, and T. Weber A review of oceanographic applications of water column data from multibeam echosounders, Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 145, pp. 41–56, 2014.
5. C. Finkl and C. Makowski, Seafloor Mapping along Continental Shelves: Research and Techniques for Visualizing Benthic Environments (Coastal Research Library). Springer, 2016.
6. Mayer L. A. Frontiers in Sea Floor Mapping and Visualization, Marine Geophysical Researchers, vol. 27, no. 1, pp. pp. 7–17, March 2006.
7. C. Shintani and M. A. Fonstad, "Comparing remote-sensing techniques collecting bathymetric data from a gravel-bed river," International Journal of Remote Sensing, vol. 38, no. 8-10, pp. 2883-2902, 2017.
8. L. Rumbaugh, A 532 nm Chaotic Fiber Laser Transmitter for Underwater Lidar, Master of Science (Electrical Engineering), Department of Electrical and Computer Engineering, Clarkson University, 2013.
9. R. C. Zimmerman, C. I. Sukenik, and V. J. Hill, Subsea LIDAR systems, in Subsea Optics and Imaging, 2013, pp. 471–488e.
10. S. C. Popescu, Lidar Remote Sensing (Chapter 3), in Advances in Environmental Remote Sensing, Q. Weng, Ed.: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2011.

СПЕЦИФІКА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ГЛИБИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РИЗИКІВ ВІДМОВ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

Шведов Д.В.

Національний університет «Одеська політехніка»
(Україна)

Вступ. Стрімкий розвиток цифрових технологій у морській галузі супроводжується накопиченням великих масивів даних про функціонування суднових енергетичних установок, навігаційних систем, допоміжного обладнання та портової інфраструктури. Системи моніторингу генерують безперервні часові ряди параметрів температури, тиску, вібрацій, електричних навантажень і експлуатаційних режимів [1]. Ці дані відображають складну динаміку технічних процесів і містять інформацію про потенційні ризики відмов, аварій та позаштатних ситуацій. Традиційні методи аналізу технічних ризиків, що базуються на статистичних моделях або експертних оцінках, не забезпечують достатньої точності в умовах високої розмірності та нелінійності даних [2]. У цьому контексті глибоке навчання постає як перспективний інструмент інтелектуального аналізу великих обсягів інформації з технічних ризиків у системах морського транспорту.

Актуальність досліджень. Підвищення вимог до безпеки судноплавства, зростання автономності суден та інтеграція кіберфізичних систем формують потребу у створенні адаптивних інтелектуальних моделей прогнозування ризиків [3]. Наявність прихованих залежностей між параметрами обладнання, часових лагів та кумулятивних ефектів навантаження ускладнює застосування класичних підходів до оцінювання надійності. Великі обсяги даних, що накопичуються у процесі експлуатації, містять латентні закономірності, які можуть бути виявлені за допомогою багатoshарових нейронних мереж, здатних до автоматичного формування ознак. Глибинні архітектури дозволяють моделювати складні нелінійні взаємозв'язки та здійснювати прогнозування технічних ризиків з урахуванням багатовимірного контексту [4].

Постановка задачі. Метою роботи є формалізація специфіки застосування глибокого навчання для інтелектуального аналізу великих обсягів даних з ризиків відмов суднових технічних систем.

Основний матеріал. Запропонований підхід базується на використанні гібридної глибокої архітектури, що поєднує рекурентні нейронні мережі з механізмами довготривалої пам'яті та трансформерні модулі для аналізу довгострокових залежностей.

Пропонована схема формалізації ключових етапів пропонованого підходу до аналізу ризиків наведена на рис.1.



Рисунок 1 – Схема формалізації етапів пропонованого підходу до аналізу ризиків

На першому етапі здійснюється попередня підготовка даних, що включає очищення від пропусків, нормалізацію масштабів та синхронізацію різнорідних сенсорних потоків. Для зменшення розмірності застосовується автоенкодер, який формує компактне латентне представлення технічного стану системи.

Рекурентний блок моделі відповідає за аналіз короткострокової динаміки параметрів, зокрема швидких змін температури або вібраційних характеристик. Трансформерний модуль забезпечує виявлення довгострокових трендів і кумулятивних ефектів зношування обладнання. Поєднання цих компонентів дозволяє враховувати як локальні, так і глобальні закономірності розвитку технічних процесів.

Особливу увагу приділено моделюванню технічного ризику як імовірності переходу системи у критичний стан протягом визначеного інтервалу часу. Для цього використано підхід до прогнозування залишкового ресурсу обладнання на основі регресійної глибинної моделі. Додатково впроваджено механізм калібрування невизначеності прогнозів із використанням ансамблю моделей, що дозволяє формувати довірчі інтервали оцінок.

Важливою складовою є адаптація моделі до концепції безперервного навчання. У процесі експлуатації судна модель отримує нові дані, які можуть відображати зміну умов навантаження або модернізацію обладнання. Запропоновано механізм інкрементального оновлення вагових коефіцієнтів без повного перенавчання, що зменшує обчислювальні витрати та запобігає втраті раніше набутих знань.

Розроблений прототип інтерфейсу програмного забезпечення аналізу прогнозних значень ризиків суднових технічних систем наведено на рис.1.

Інтелектуальний аналіз ризиків суднових систем

Гібридна модель: Autoencoder + LSTM + Transformer

Параметри моніторингу (Input Stream)

Температура вихлопних газів (°C)

425

Рівень вібрації (мм/с)

4,2

Тиск масла (bar)

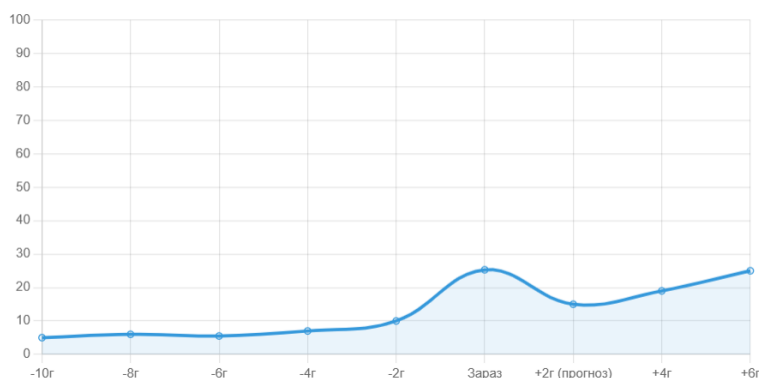
5,1

Навантаження ГД (%)

85

Запустити аналіз ризику

Прогноз імовірності відмови (Time Series)



Поточний статус

Імовірність відмови (24г):

25.3%

СТАН НОРМАЛЬНИЙ

RUL: 1420 мотогодин

Невизначеність: $\pm 2.1\%$

Рисунок 2 – Прототип інтерфейсу програмного забезпечення аналізу прогнозних значень ризиків

Для підвищення інтерпретованості результатів застосовано метод аналізу важливості ознак на основі градієнтних оцінок. Це дозволяє визначити, які саме параметри мають найбільший вплив на прогнозований рівень ризику. Такий підхід забезпечує можливість використання моделі у практичних системах технічного

обслуговування та планування ремонтів.

Результати досліджень. Експериментальна перевірка моделі проводилася на масиві даних, що містив багаторічні записи параметрів суднових дизель-генераторів та допоміжних систем. Порівняння з класичними статистичними методами продемонструвало зниження середньоквадратичної похибки прогнозу залишкового ресурсу на 17 відсотків. Точність виявлення передаварійних станів зросла на 15 відсотків у порівнянні з традиційною регресійною моделлю.

Аналіз роботи трансформерного блоку показав його здатність ідентифікувати довгострокові кореляції між режимами навантаження та подальшими відмовами обладнання. Використання автоенкодера забезпечило скорочення розмірності даних без суттєвої втрати інформативності, що сприяло підвищенню швидкодії системи.

Дослідження стійкості моделі до шумів і неповноти даних продемонструвало, що ансамблевий підхід дозволяє зменшити вплив випадкових коливань параметрів на прогноз. Отримані результати підтверджують доцільність застосування глибинного навчання для аналізу технічних ризиків у великих даних морської галузі.

Висновки. У роботі формалізовано підхід до інтелектуального аналізу великих обсягів даних з ризиків відмов суднових технічних систем на основі застосування глибинного навчання. Запропонована гібридна архітектура забезпечує врахування коротко- та довгострокових залежностей, адаптивність до нових умов експлуатації та можливість оцінювання невизначеності прогнозів. Результати експериментів свідчать про підвищення точності та надійності оцінювання технічного стану обладнання. Перспективи подальших досліджень пов'язані з інтеграцією методів федеративного навчання та розширенням спектра аналізованих технічних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhang Yifan, Chen Xi, Li Wei & Wang Jun (2022). Remaining Useful Life Prediction Using Deep Learning A Review. IEEE Transactions on Reliability, 71 3, 1236-1256, <https://doi.org/10.1109/TR.2021.3093555>
2. Li Xinyu, Ding Qiang & Sun Jian-Qiao (2020). Remaining Useful Life Estimation in Prognostics Using Deep Convolution Neural Networks. Reliability Engineering and System Safety, 172, 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.11.021>
3. Wen Long, Gao Liang & Li Xinyu (2021). A New Deep Transfer Learning Based on Sparse AutoEncoder for Fault Diagnosis. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics Systems, 51 6, 3679-3689, <https://doi.org/10.1109/TSMC.2019.2954632>
4. Babu G. Saikumar, Zhao Peilin & Li Xiaoli (2020). Deep Convolutional Neural Network Based Regression Approach for Estimation of Remaining Useful Life. Journal of Intelligent Manufacturing, 31, 389-400, <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1432-0>

СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Ситник Т.Г., Розум М.В.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Сучасні логістичні системи функціонують в умовах зростаючої складності транспортних процесів, зокрема в морській галузі, диверсифікації типів вантажів, нестабільності ринкових умов та підвищених вимог до ефективності використання ресурсів. У таких умовах традиційні підходи до планування і контролю транспортних перевезень, що базуються на фрагментарному аналізі показників або статичних розрахунках, виявляються недостатніми для забезпечення оптимальної організації логістичних процесів. Це зумовлює необхідність розробки інформаційних систем, здатних здійснювати комплексний аналіз транспортних перевезень, оцінювати ефективність логістичних операцій та підтримувати прийняття управлінських рішень на основі об'єктивних даних.

Концепція проєктування системи з аналізу транспортних перевезень та логістичних процесів, реалізованої у вигляді веб-застосунку. Запропонована система орієнтована на підтримку логістичних перевезень для різних типів вантажів із урахуванням специфіки їх транспортування, вимог до техніки та умов виконання замовлень. Основна ідея розробки полягає у створенні єдиного аналітичного середовища, яке забезпечує збір, обробку та інтерпретацію даних про перевезення, дозволяючи оцінювати їх результативність і формувати обґрунтовані управлінські рішення [1].

Ідеологія системи базується на інтеграції даних про виконанні логістичні операції, параметри перевезень, використану техніку та результати виконання замовлень. На відміну від локальних облікових рішень, що фіксують лише факт виконання перевезення, розроблюваний веб-застосунок орієнтований на аналітичну інтерпретацію транспортних процесів у динаміці. Це дозволяє виявляти закономірності, оцінювати вплив окремих факторів на ефективність перевезень та аналізувати взаємозв'язки між характеристиками вантажу, вибором техніки і кінцевим результатом логістичної операції.

Важливим функціональним аспектом є підтримка логістичних перевезень для різних типів вантажу, що потребує урахування їх масогабаритних характеристик, умов транспортування та обмежень, пов'язаних із використанням транспортних засобів. У межах системи ці параметри розглядаються як вхідні дані для аналітичних модулів, що дозволяє оцінювати доцільність вибору конкретного типу техніки або варіанту перевезення. Такий підхід сприяє зниженню витрат і підвищенню загальної ефективності логістичних процесів.

Окрему увагу приділено модулю підбору та оренди техніки для виконання власних перевезень [2]. У контексті дослідження цей модуль розглядається не лише як сервісна складова, а як елемент аналітичної системи, що впливає на результативність транспортних операцій. Аналіз даних про використання техніки дозволяє оцінювати ефективність її залучення, виявляти надлишкові або нераціональні рішення та формувати рекомендації щодо оптимізації транспортного парку.

Ключовим компонентом системи є модуль аналітики ефективності перевезень, який забезпечує багатофакторний аналіз логістичних процесів. Ефективність перевезень розглядається як інтегральна характеристика, що формується з урахуванням кількісних і якісних показників виконання замовлень. У межах системи вводиться поняття складового коефіцієнта ефективності, який відображає вплив окремих параметрів перевезення на загальний результат. Такий підхід дозволяє перейти від узагальнених оцінок до деталізованого аналізу, що є важливим для прийняття обґрунтованих управлінських рішень [3].

Аналітична обробка даних у системі ґрунтується на використанні інформації про виконані замовлення, результати перевезень, часові та ресурсні характеристики логістичних операцій. Накопичення історичних даних створює основу для порівняльного аналізу, виявлення тенденцій та оцінки стабільності логістичних процесів. Такий підхід дозволяє не лише оцінювати поточний стан системи перевезень, але й формувати аналітичні висновки щодо її розвитку в середньо- та довгостроковій перспективі.

Архітектурно система реалізована у вигляді веб-застосунку, що забезпечує доступ до функціональних і аналітичних можливостей через стандартні веб-інтерфейси. Веб-орієнтована реалізація сприяє зручності використання, масштабованості та інтеграції з іншими інформаційними системами логістичного та управлінського призначення. Розмежування рівнів зберігання даних, аналітичної обробки та представлення результатів підвищує гнучкість системи і дозволяє адаптувати її до змін бізнес-вимог без суттєвих програмних модифікацій [4].

Практична значущість розробленої системи полягає у можливості її застосування для підвищення ефективності управління транспортними перевезеннями та логістичними процесами. Використання аналітичних інструментів дозволяє зменшити вплив суб'єктивних факторів у прийнятті рішень, оптимізувати використання транспортних ресурсів і підвищити прозорість логістичної діяльності. Для підприємств, що здійснюють перевезення власними силами або із залученням орендованої техніки, система може стати інструментом комплексної оцінки результативності логістичних операцій.

Висновки. Наукова складова роботи полягає в узагальненні підходів до аналізу транспортних перевезень і їх адаптації до умов інтегрованої інформаційної системи. Запропонований підхід демонструє можливість поєднання логістичної аналітики, оцінки ефективності та підтримки прийняття рішень у межах єдиного програмного рішення. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших досліджень у сфері інтелектуальних логістичних систем і цифрової трансформації транспортних процесів у морській галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бауерсокс, Д.Дж. (2019). Логістика. Інтегрований ланцюг постачання. Київ: Олімп-Бізнес. 640 с.
2. Ларіна, Р.Р., & Мельничук, О.В. (2020). Управління транспортно-логістичними системами (навч. посібник). Київ : Центр учбової літератури. 304 с.
3. Christopher, M. (2016). Logistics and Supply Chain Management. (5th ed). Harlow: Pearson Education. 336 p.
4. Sheffi, Y. (2013) Logistics Clusters: Delivering Value and Driving Growth Cambridge: MIT Press. 352 p.

ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У СУДНОВОДІННІ: МЕЖІ ДОВІРИ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ

Байрамова О.В.

Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного транспорту
Національного транспортного університету»
(Україна)

Вступ. Стрімке впровадження систем штучного інтелекту (ШІ) в операційне середовище морського транспорту відкриває нові можливості для підвищення безпеки та ефективності судноплавства. Системи підтримки прийняття рішень (СППР) на основі ШІ – зокрема, інтелектуальні системи уникнення зіткнень, оптимізації маршрутів, прогностичного технічного обслуговування та моніторингу навігаційної обстановки – набувають дедалі ширшого поширення на сучасних судах. Водночас їх інтеграція у практику судноводіння породжує принципово нові виклики для людського фактора: виникають запитання про межі довіри до рекомендацій ШІ, механізми їх верифікації та розподіл відповідальності між людиною й автоматизованою системою.

Актуальність досліджень. Незважаючи на технологічний прогрес у сфері автоматизації, людський чинник залишається визначальним у забезпеченні безпеки морських перевезень. За даними Щорічного огляду морських аварій та інцидентів EMSA 2024, людський елемент причетний до 80,1 % досліджених морських аварій та інцидентів за період 2014–2023 рр. [1]. Водночас активне впровадження ШІ-систем у судноводіння формує якісно новий тип ризику: не традиційну помилку оператора, а системну похибку у взаємодії між людиною та інтелектуальною системою – надмірну довіру або невинуватене ігнорування рекомендацій ШІ. Це явище залишається недостатньо дослідженим у контексті морського судноводіння, що обумовлює актуальність представленого дослідження.

Постановка задачі. Метою дослідження є аналіз когнітивних і поведінкових механізмів взаємодії вахтового офіцера з ШІ-системами підтримки прийняття рішень у судноводінні, а також розробка концептуальних підходів до верифікації рекомендацій цих систем в умовах реального операційного середовища. Досягнення мети передбачає вирішення таких завдань: систематизацію теоретичних моделей взаємодії людини з автоматизованими системами; аналіз специфіки довіри до ШІ-систем у морському контексті; формулювання критеріїв і процедур верифікації рекомендацій системи підтримки прийняття рішень для забезпечення належного рівня ситуаційної обізнаності екіпажу.

Основний матеріал. Теоретичну основу аналізу взаємодії людини з автоматизованими системами закладено у класичній роботі Parasuraman & Riley [2], які виокремили чотири патологічні форми такої взаємодії: використання, зловживання, відмову від використання та неправомірне застосування. У контексті ШІ-асистованого судноводіння найбільш критичними є перші дві форми: надмірна довіра до рекомендацій системи та їх невинуватене ігнорування. Обидві можуть призводити до помилкових рішень за умов, коли ШІ-система функціонує поза межами своєї навчальної вибірки або обробляє неякісні сенсорні дані.

Parasuraman, Sheridan & Wickens [3] запропонували таксономію рівнів автоматизації (Levels of Automation, LoA), що охоплює десять ступенів – від повністю ручного керування до повної автономії без участі людини. Сучасні ШІ-системи підтримки прийняття рішень у судноводінні здебільшого відповідають проміжним рівням цієї шкали: вони генерують рекомендації та в окремих конфігураціях здатні виконувати обмежені маневрові дії, зберігаючи за людиною функцію кінцевого схвалення або відхилення рішення. Саме ці проміжні рівні автоматизації є найбільш проблематичними для ситуаційної обізнаності оператора, оскільки зменшують його активну участь у процесі

прийняття рішень, не звільняючи при цьому від кінцевої відповідальності.

Ключовою проблемою у взаємодії вахтового офіцера з ІШ-системою є непрозорість алгоритмічних рекомендацій – так звана проблема «чорного ящика». На відміну від традиційних детерміністичних систем автоматизації, системи машинного навчання генерують вихідні дані через процеси, недоступні для безпосереднього аналізу оператором. Madsen & Kim [4] у систематичному огляді прозорості рішень ІШ в автономному судноплаванні встановили, що відсутність інтерпретованості рекомендацій є одним із головних чинників, що перешкоджає формуванню каліброваної довіри до ІШ-систем серед морських операторів. Надмірна довіра виникає саме тоді, коли оператор не має інструментів для оцінки надійності конкретної рекомендації в конкретному контексті.

Van de Merwe et al. [5] дослідили вплив прозорості агента та складності завдання на ситуаційну обізнаність і когнітивне навантаження операторів морських систем. Отримані результати свідчать, що вищий рівень прозорості алгоритмічних рекомендацій позитивно корелює з якістю ситуаційної обізнаності, однак водночас підвищує когнітивне навантаження. Це свідчить про те, що простий доступ до пояснень рішень ІШ не є достатньою умовою для їх ефективної верифікації – необхідно також відповідне когнітивне та професійне підготування операторів.

Lützhöft & Dekker [6] у своєму дослідженні автоматизації на містку зафіксували стійку тенденцію до надмірної залежності офіцерів від електронних навігаційних систем, яка виявляється у зниженні критичного аналізу навігаційної ситуації та ослабленні традиційних навичок ручного управління. Ця тенденція, задокументована стосовно ECDIS та AIS, набуває якісно нової гостроти у зв'язку із впровадженням ІШ-систем, рекомендації яких можуть сприйматися як більш авторитетні саме через їхню технологічну складність.

Міжнародна морська організація у рамках регуляторного дослідження щодо морських автономних надводних суден визначила чотири ступені автономії: від суден із системами автоматизації та підтримки рішень до повністю автономних суден [7]. Переважна більшість суден, що нині перебувають в експлуатації, відповідає першому ступеню, тобто оснащена системами підтримки рішень при збереженні людського екіпажу на борту. Саме цей стан «напіваавтономії» є найбільш вразливим з точки зору виникнення помилок внаслідок неналежної взаємодії людини та ІШ.

Результати досліджень. На основі проведеного аналізу запропоновано концептуальну тривимірну модель верифікації рекомендацій ІШ-систем у судноводінні.

Перший вимір – технічний – передбачає оцінку якості вхідних даних, на основі яких ІШ-система сформувала рекомендацію. Офіцер верифікує актуальність та точність сенсорної інформації (AIS, радар, ECDIS, метеодані), оскільки деградація якості вхідних даних безпосередньо знижує надійність вихідних рекомендацій системи. Цей вимір корелює з першим рівнем ситуаційної обізнаності за Endsley – сприйняттям елементів навколишнього середовища [8].

Другий вимір – контекстуальний – полягає в оцінці відповідності рекомендації ІШ конкретному операційному контексту: гідрологічним та метеорологічним умовам, характеристикам маршруту, трафіковій ситуації та вимогам МППЗС. Оскільки системи машинного навчання функціонують у межах своєї навчальної вибірки, атипові або граничні ситуації можуть генерувати ненадійні рекомендації, що не відображають реального ризику.

Третій вимір – регуляторно-правовий – передбачає перевірку відповідності рекомендованих дій вимогам МППЗС та внутрішнім процедурам безпеки судна. Будь-яка рекомендація ІШ, що суперечить чинним правилам або здоровому глузду офіцера, підлягає відхиленню незалежно від технічної точності її генерування. Цей вимір відображає принцип збереження кінцевої відповідальності людини-оператора, закріплений у Конвенції ПДНВ та підтверджений у концепції MASS IMO.

Запропонована модель може слугувати основою для розробки стандартизованих

операційних процедур роботи з ІІІ-системами на містку та для формування змістового наповнення навчальних програм підготовки офіцерів.

Висновки. ІІІ як система підтримки прийняття рішень у судноводінні відкриває значний потенціал для підвищення безпеки морських перевезень, однак породжує нові ризики, пов'язані з некоректною взаємодією людини та автоматизованої системи. Надмірна довіра до рекомендацій ІІІ та їх не виправдане ігнорування є взаємопов'язаними патологіями, що виникають за відсутності у офіцера інструментів і навичок критичної оцінки алгоритмічних рекомендацій. Запропонована тривимірна концептуальна модель верифікації – технічний, контекстуальний та регуляторно-правовий виміри – забезпечує системний підхід до оцінки рекомендацій ІІІ-систем в умовах реального операційного середовища. Подальший розвиток напряду потребує розробки симуляційно-орієнтованих навчальних сценаріїв для відпрацювання навичок верифікації в умовах, максимально наближених до реального судноводіння. Запропонований підхід може бути імплементований у освітні програми морських закладів освіти України в контексті їх модернізації відповідно до вимог цифрової трансформації морської галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. EMSA. (2024). Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2024. European Maritime Safety Agency. <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5352-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2024.html>
2. Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Humans and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors*, 39(2), 230–253. <https://doi.org/10.1518/001872097778543886>
3. Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2000). A Model for Types and Levels of Human Interaction with Automation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 30(3), 286–297. <https://doi.org/10.1109/3468.844354>
4. Madsen, A. N., & Kim, T. E. (2024). A State-of-the-Art Review of AI Decision Transparency for Autonomous Shipping. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping*, 8(1–2), 2336751. <https://doi.org/10.1080/25725084.2024.2336751>
5. van de Merwe, K., Mallam, S., Nazir, S., & Engelhardt, Ø. (2024). The Influence of Agent Transparency and Complexity on Situation Awareness, Mental Workload, and Task Performance. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 18(2), 156–184. <https://doi.org/10.1177/15553434231208>
6. Lützhöft, M. H., & Dekker, S. W. A. (2002). On Your Watch: Automation on the Bridge. *Journal of Navigation*, 55(1), 83–96. <https://doi.org/10.1017/S0373463301001588>
7. IMO. (2022). MSC.1/Circ.1638 – Interim Guidelines for MASS Trials. International Maritime Organization.
8. Endsley, M. R. (1995). Toward a Theory of Situation Awareness in Dynamic Systems. *Human Factors*, 37(1), 32–64. <https://doi.org/10.1518/001872095779049543>

ІДЕНТИФІКАЦІЯ КОРИСТУВАЧІВ В МОРСЬКИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Даус Ю.В.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Сучасні інформаційні системи забезпечують безперебійне функціонування як галузі в цілому, так і окремих великих підсистем: портова інформаційна система, внутрішньосуднова система, інформаційна система окремих компаній перевізників вантажів. Такі системи значно зменшують кількість персоналу з одної сторони, але збільшують ризики стороннього втручання зловмисників. Втручання в таку систему може призвести до дуже великих економічних втрат, але ще більших репутаційних. Іноді, після втрати репутації, компанії не можуть економічно відновити свою діяльність.

Найбільш вразливим місцем у будь якій інформаційній системі є людина. Іноді це неухважність та нехтування своїми посадовими обов'язками, а іноді – це цілеспрямоване втручання для отримання неправомірної вигоди. Часто таке несанкціоноване втручання здійснюється з логіном та паролем іншої людини для відвертання уваги від зловмисника. Отримати логін та пароль для зловмисника досить легка задача через відкрите зберігання паролів у деяких користувачів, а також через підглядання під час введення паролю.

Зараз мобільні пристрої мають багато датчиків та сенсорів для ідентифікації користувачів за біометричними параметрами: відбиток пальця, ідентифікація по обличчю, сканер сітківки. При застосуванні таких датчиків ми безпомилково можемо ідентифікувати користувача та авторизувати. Але, як правило, більшість персоналу працює на звичайних десктопних системах, які не мають таких сенсорів.

Пропонуємо як додаткову міру ідентифікації, застосувати поведінкову біометрію – клавіатурний почерк. Кожна людина має свій унікальний набір технічних характеристик при наборі паролю, який пов'язаний з фізичними та психологічними особливостями конкретної людини [1]. З технічних характеристик клавіатурного почерку можемо виділити такі: час утримання клавіші, час між відпусканням клавіші та натисненням наступної клавіші та інтегральні показники триграфи та диграфи [2, 3, 4].

Одним з найбільш поширених методів побудови моделі клавіатурного почерку є застосування методів розпізнавання образів [3] або побудова нейронної мережі [4, 5]. Побудова нейронної мережі, на наш погляд, є більш сучасним підходом до моделювання складних та не лінійних систем.

Ми отримали (експериментальним шляхом) технічні характеристики клавіатурного почерку при наборі паролю у трьох осіб. Вимогою до паролю була довжина не менше 6 символів, обов'язково наявність великої літери, числа та спеціального символу. Кожна така вибірка становила не менш ніж 100 випадків спостереження. Потім кожен користувач вводив пароль інших користувачів під виглядом «зловмисника» декілька разів. Таким чином, у нас з'явилась вся необхідна інформація для навчання та перевірки нашої нейронної мережі.

Конфігурація нейронної системи складалася з вхідного шару, вихідного шару та прихованих шарів. Саме кількість прихованих шарів та кількість нейронів на кожному такому шарі відповідають за точність та гнучкість нашої моделі. В роботі [4] індійські вчені пропонують три прихованих шари з кількістю нейронів відповідно 100, 400 та 100. Загалом це досить велика кількість вагових коефіцієнтів – 81 000. Ми спробували зменшити цю кількість нейронів і виявили що схема 50, 100, 50 на кожному шарі дає високу точність при зменшенні обчислювальних затрат. Кількість вагових коефіцієнтів суттєво зменшилась до 10 550. Це більше ніж в 7 разів менше ніж те, що пропонують індійські вчені, а відповідно у нас збільшилась швидкість обчислення нейронної мережі.

Це досить актуально при навчанні та підборі вагових коефіцієнтів.

Було два програмних комплекси. Один для отримання технічних характеристик клавіатурного почерку таких як час утримання клавіші, міжсимвольний інтервал, загальний час введення пароля, час на введення двох та трьох символів. Комплекс розрахований на необмежену кількість користувачів та довжину паролю до 18 символів. Результати записуються в файл, який зберігається в форматі CSV.

І другий програмний комплекс призначався для навчання та перевірки на незалежному матеріалі нашої нейронної мережі можливості ідентифікації користувачів по клавіатурному почерку. Цей комплекс побудований таким чином, що дані які вводяться перемішуються випадковим чином, потім відбирається 20% вибірки, яка не буде приймати участь у навчанні даної моделі, а 80% – для навчання, потім підбираються вагові коефіцієнти. Після цього йде перевірка на тому матеріалі, що не приймав участі в навчанні та вираховується точність прогнозування, яка розраховується як співвідношення кількості здійснення прогнозів до загальної кількості випадків та виражається в процентах. Оскільки в виході моделі передбачається тільки два значення 0 – не авторське введення паролю, та 1 – авторське введення, то ми зробили інтервальне оцінювання: все, що вище 0.5 оцінювалось як авторське введення, а все, що нижче – не авторське введення.

Окремо ми розглядали питання які саме технічні характеристики клавіатурного почерку використовувати в нашій моделі. Дуже багато користувачів використовує такий параметр як час утримання клавіші DT (Dwell Time) самостійно або в комбінації з іншими технічними характеристиками. Ми розглянули можливість поєднання одразу кількох технічних характеристик клавіатурного почерку і в ході есперименту до DT додавали інші характеристики. Відбувалось значне покращення результатів, якщо до DT ми додавали іншу характеристику як міжклавішний інтервал FT (Flight Time) – це час між відпущенням поточної клавіші та натисненням наступної клавіші. При додаванні інших характеристик покращення спостерігались, але вони були не значними. Тому вважаємо, що найоптимальнішим буде поєднання таких характеристик як час утримання клавіші та міжклавішний інтервал.

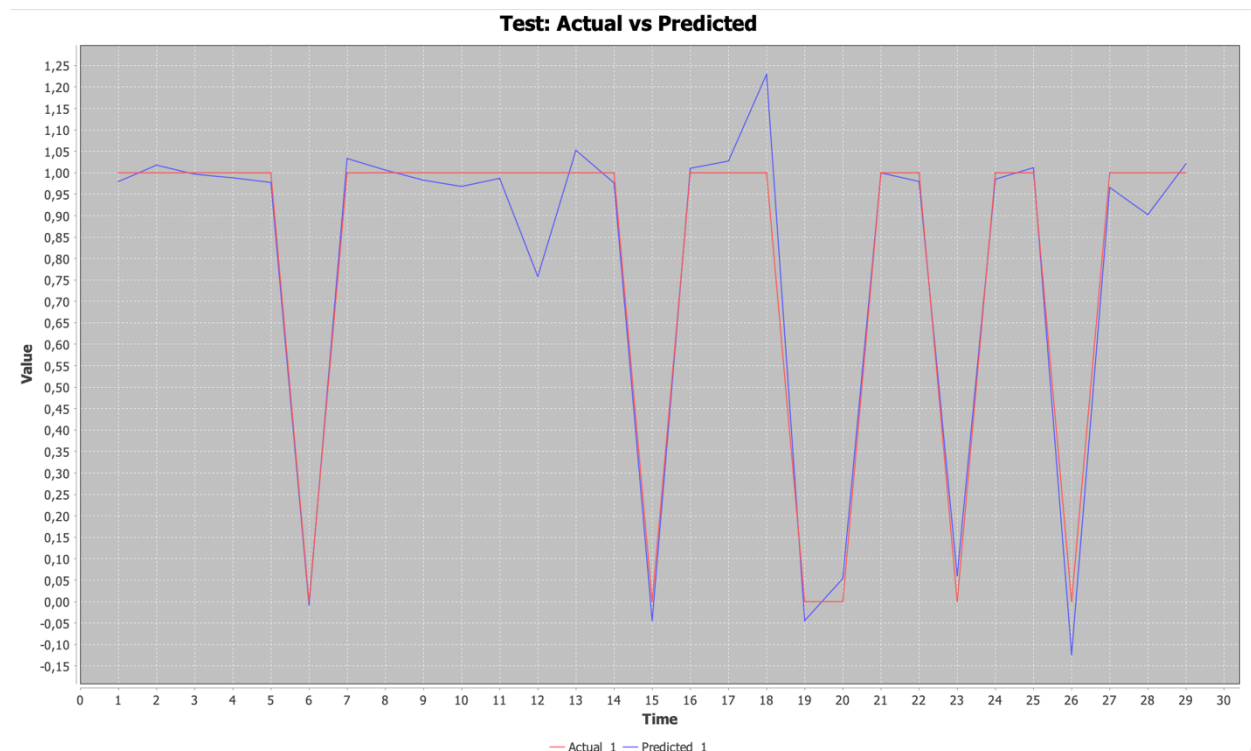


Рисунок 1 – Скріншот роботи програми при перевірці на незалежному матеріалі

Як видно з рис.1 наша модель повністю описує всю не лінійність нашої системи. Точність навчання та перевірки на не залежному матеріалі становить 99.9%. Звичайно нас насторожує отриманий результат і ми будемо перевіряти цю модель на додатковому матеріалі, але зараз це дуже обнадійливі результати.

Окремо хочеться зупинитися на кількості епох навчання. В різних джерелах приводиться зовсім різні числа епох навчання від кількох тисяч до сотні тисяч. В нашому комплексі ми спеціально для аналізу цієї характеристики ми побудували графік залежності величини середньоквадратичної похибки навчання від кількості епох. Цей графік приведений на рис. 2.

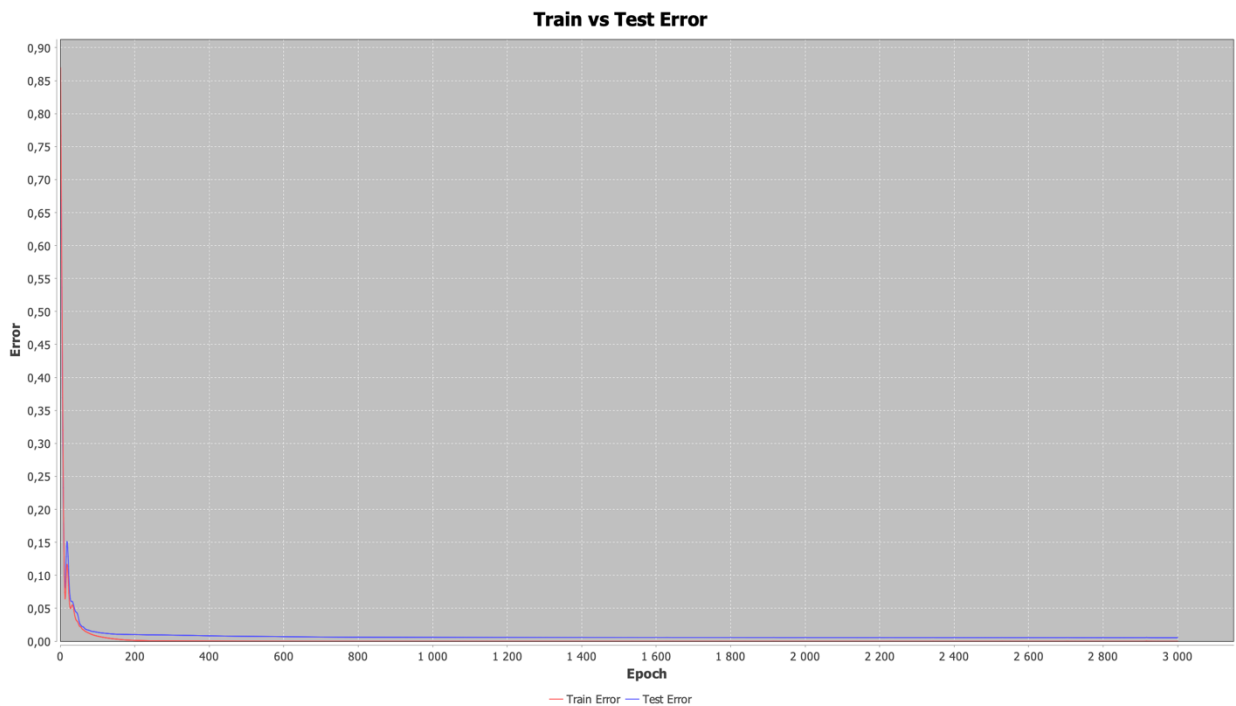


Рисунок 2 – Скріншот роботи програми обчислення середньоквадратичної похибки навчання та перевірки нейромережі

Як видно з рис. 2, величина похибки стрімко знижується всього за 600 епох навчання, а потім дуже повільно продовжує не велике зниження. Таким чином, 3000 епох нам достатньо для гарного навчання нашої мережі. Звертає на себе увагу різкий ріст похибки в районі 50–100 епохи. Це зумовлено складним просторовим рельєфом середньоквадратичної помилки навчання. Але за рахунок зменшення кроків навчання нам вдалося повернутися в потрібному напрямку та знайти ще один локальний мінімум функції витрат.

Висновки. Ми побудували доволі просту але надійну нейронну мережу для розпізнавання клавіатурного почерку людини. Відносно не велика кількість нейронів на кожному прихованому шарі дозволяє проводити розрахунки дуже швидко і практично не помітно для користувача.

Побудована модель може бути використана як додаткова поведінкова біометрична характеристика для ідентифікації користувачів, що значно підвищить надійність та захищеність морських інформаційних систем та дозволить знизити рівень загрози не санкціонованого проникнення до таких систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Bryan, W. L., & Harter, N. (1897). Studies in the physiology and psychology of the telegraphic language. *Psychological Review*, 4(1), 27–53. -<https://doi.org/10.1037/h0073806>

2. Чалая Л.Є. (2004). Модель ідентифікації користувачів по клавіатурному почерку. «Штучний інтелект», №4, 811-817.
3. Shaffer L.H. Reading and Typing https://www.researchgate.net/publication/233266615_Reading_and_Typing
4. Saket Maheshwary, Soumyajit Ganguly, Vikram Pudi. Deep Secure: A Fast and Simple Neural Network based approach for User Authentication and Identification via Keystroke Dynamics. https://www.researchgate.net/publication/322952671_Deep_Secure_A_Fast_and_Simple_Neural_Network_based_approach_for_User_Authentication_and_Identification_via_Keystroke_Dynamics.
5. Даус, Ю., Самойлов, С., Даус, М., & Ларін, Д. (2025). Ідентифікація користувачів за клавіатурним почерком з використанням нейронних мереж. Вісник Одеського національного морського університету, (75), 212-227. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-212-227>

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ЯК ІНСТРУМЕНТ МОНІТОРИНГУ БЕЗПЕКИ СУДНА

Оберто Сантана Л.Е.

Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Стрімка цифровізація морської галузі суттєво змінює підходи до експлуатації суден, управління морськими перевезеннями та забезпечення безпеки судноплавства. Враховуючи розвиток сучасних інформаційних технологій у морській індустрії, перспективним є застосування концепції цифрового двійника (Digital Twin), яка передбачає створення динамічної віртуальної моделі фізичного об'єкта з можливістю постійного обміну даними між реальною системою та її цифровим представленням. Цифровий двійник дозволяє відтворювати поведінку складних технічних систем у режимі реального часу, використовуючи інформацію від численних сенсорів та систем моніторингу. Завдяки цьому забезпечується можливість безперервного аналізу технічного стану обладнання, прогнозування відмов та оптимізації режимів експлуатації судна.

Актуальності ця технологія набуває у зв'язку з розвитком автономних морських надводних суден (Maritime Autonomous Surface Ships – MASS), де значна частина функцій управління та контролю покладається на автоматизовані інформаційні системи. У таких умовах цифровий двійник може виступати ключовим елементом інтегрованої системи безпеки судна, забезпечуючи моніторинг його технічного стану, аналіз навігаційної інформації та підтримку прийняття рішень у складних експлуатаційних ситуаціях.

Актуальність дослідження пов'язана з необхідністю підвищення рівня безпеки мореплавства в умовах зростаючої складності судових технічних систем та активного впровадження цифрових технологій у морській галузі. Аварії на морі можуть призводити до значних економічних втрат, екологічного забруднення та людських жертв. За даними міжнародних досліджень, значна частина морських інцидентів пов'язана з відмовами технічних систем або помилками в роботі судового обладнання. Незважаючи на високий рівень технологічної досконалості, ці системи залишаються вразливими до різних типів технічних несправностей, програмних помилок та зовнішніх впливів, включаючи кіберзагрози та радіочастотні перешкоди. Тому вдосконалення судових технічних систем, підвищення надійності функціонування та своєчасного виявлення їхніх несправностей є одним з актуальних напрямів досліджень у сфері сучасних морських технологій. Особливо акцентується увага на застосування технології цифрових двійників, яка дозволяє інтегрувати фізичні моделі судна, сенсорні дані та аналітичні алгоритми для прогнозування поведінки складних технічних систем.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є аналіз можливостей застосування технології цифрового двійника для підвищення безпеки судноплавства шляхом моніторингу стану навігаційних та технічних систем судна, виявлення аномалій у їх роботі та інтеграції отриманих даних у системи підтримки прийняття рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути принципи побудови цифрових двійників у морській галузі, дослідити методи моніторингу навігаційних систем та проаналізувати можливості використання цієї технології для прогнозування відмов судового обладнання.

Основний матеріал. Цифровий двійник представляє собою динамічну цифрову модель фізичного об'єкта, яка синхронізується з реальним об'єктом за допомогою потоків даних від сенсорів та інформаційних систем [1, 2]. На відміну від традиційних комп'ютерних моделей, цифровий двійник постійно оновлюється на основі реальних експлуатаційних даних, що дозволяє отримувати більш точне уявлення про поточний стан системи та прогнозувати її поведінку.

Узагальнену архітектуру функціонування цифрового двійника судна наведено на

рисунку 1. Вона відображає взаємодію фізичного контуру суднових систем із цифровою моделлю, аналітичним блоком обробки даних та системою підтримки прийняття рішень. Завдяки використанню зворотного зв'язку результати аналізу можуть використовуватися для оптимізації режимів експлуатації судна та підвищення безпеки судноплавства.



Рисунок 1 – Архітектура цифрового двійника в системі забезпечення безпеки судноплавства

Архітектура цифрового двійника у морських системах зазвичай включає кілька функціональних рівнів:

1. перший рівень відповідає за збір даних від сенсорів, встановлених на судні, включаючи параметри руху судна, характеристики роботи енергетичної установки, навігаційну інформацію та показники стану різних технічних систем;
2. другий рівень забезпечує формування цифрової моделі судна, яка відображає його конструктивні характеристики, фізичні процеси та взаємодію окремих систем;
3. третій рівень виконує функції інтеграції та аналітичної обробки даних, де застосовуються методи статистичного аналізу, алгоритми машинного навчання та інші інтелектуальні методи, що дозволяють виявляти аномалії у роботі суднових систем;
4. четвертий рівень забезпечує підтримку прийняття рішень та взаємодію з оператором або екіпажем судна.

На сучасному етапі цифрові двійники широко застосовуються для моніторингу технічного стану суднових систем. Аналіз параметрів роботи енергетичних установок, витрат палива, температурних режимів, навантажень на основні механізми та інших експлуатаційних показників дозволяє своєчасно виявляти ознаки деградації обладнання [3,4,5]. Це створює передумови для переходу від планово-попереджувального обслуговування до предиктивного підходу, за якого рішення щодо технічного обслуговування приймаються на основі фактичного стану систем та прогнозованих змін їх параметрів у часі. Інтеграція сенсорних даних, математичних моделей та алгоритмів обробки інформації забезпечує безперервний контроль функціонування суднових технічних систем. У результаті формується цілісне уявлення про стан обладнання, що дозволяє не лише фіксувати поточні відхилення, але й оцінювати тенденції їх розвитку.

Такий підхід підвищує надійність експлуатації судна, зменшує ймовірність відмов і сприяє оптимізації витрат на технічне обслуговування.

Функціональні можливості цифрових двійників не обмежуються технічним моніторингом. Використання цифрових моделей у поєднанні з навігаційними інформаційними системами створює основу для їх застосування у задачах управління рухом судна та забезпечення безпеки мореплавства. Сучасні навігаційні комплекси базуються на використанні глобальних навігаційних супутникових систем (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), які забезпечують визначення координат, швидкості та курсу судна. Разом із тим такі системи можуть зазнавати впливу радіочастотних перешкод, навмисної підробки сигналів (spoofing) або їх ретрансляції із затримкою, що призводить до зниження точності позиціонування або формування хибної навігаційної інформації [6]. У таких умовах використання цифрового двійника дозволяє підвищити достовірність навігаційних даних за рахунок їх інтегрованого аналізу. Цифрова модель судна забезпечує можливість зіставлення інформації, отриманої з різних джерел, включаючи інерціальні навігаційні системи, радіолокаційні спостереження, дані автоматичної ідентифікаційної системи та інші інформаційні канали. Узгодження цих даних дозволяє виявляти невідповідності, оцінювати їх характер та своєчасно ідентифікувати аномальні ситуації. Це є суттєвим чинником підвищення надійності навігаційного забезпечення судна.

Використання цифрового двійника створює передумови для розширення функцій підтримки судноводіння [7]. На основі цифрової моделі можливе прогнозування параметрів руху судна з урахуванням впливу зовнішніх факторів, таких як вітер, хвилювання, течії, а також особливостей навігаційної обстановки. Обробка великого обсягу даних та використання алгоритмів аналізу цифрова система може формувати рекомендації щодо вибору курсу, швидкості та режимів маневрування [8]. Це сприяє зниженню навантаження на судноводія та підвищує ефективність управління судном, особливо у складних експлуатаційних умовах. Також цифрові двійники можуть застосовуватися для аналізу маневрових характеристик судна, визначення радіусів циркуляції, оцінки гальмівного шляху, прогнозування дрейфу та відхилення від заданої траєкторії руху. Отримані результати можуть використовуватися для обґрунтування рішень щодо вибору параметрів руху та забезпечення безпечного розходження суден у обмежених акваторіях або в умовах інтенсивного судноплавства.

Додаткові можливості відкриває застосування цифрових двійників для сценарного моделювання навігаційних ситуацій. На основі цифрової моделі можуть відтворюватися різні варіанти розвитку подій, включаючи рух у вузькостях, маневрування у портових акваторіях, проходження складних ділянок маршруту або взаємодію з іншими суднами. Попередній аналіз таких сценаріїв дозволяє оцінити можливі ризики та вибрати найбільш безпечні стратегії управління рухом судна. Розширення функціональних можливостей цифрових двійників безпосередньо пов'язане з розвитком морських автономних надводних суден (MASS) [9,10]. У таких системах цифровий двійник може виступати як складова інтегрованої інформаційно-керуючої системи, що поєднує функції моніторингу технічного стану, аналізу навігаційної обстановки та підтримки прийняття рішень. Використання цифрових двійників у цьому контексті створює основу для підвищення рівня автономності суден та забезпечення безпеки їх експлуатації.

Результати досліджень. У результаті проведеного аналізу встановлено, що застосування технології цифрових двійників забезпечує підвищення ефективності моніторингу технічного стану судових систем за рахунок інтеграції даних від сенсорів, математичних моделей та алгоритмів інтелектуального аналізу. Такий підхід дозволяє реалізувати безперервний контроль параметрів експлуатації судна, своєчасно виявляти відхилення у роботі обладнання та здійснювати прогнозування можливих відмов на ранніх стадіях їх розвитку. Отримані результати свідчать, що використання цифрових двійників створює передумови для переходу від планово-попереджувального до

предиктивного технічного обслуговування, що забезпечує зниження експлуатаційних витрат та підвищення надійності функціонування судових систем.

Разом із цим встановлено, що інтеграція цифрового двійника у навігаційні інформаційні системи розширює можливості його застосування у задачах судноводіння. Використання цифрових моделей дозволяє підвищити достовірність навігаційної інформації, забезпечити оцінку параметрів руху судна в умовах впливу зовнішніх факторів, а також реалізувати елементи підтримки прийняття рішень під час управління рухом судна. Крім того, використання цифрових двійників для моделювання навігаційних ситуацій дозволяє здійснювати попередню оцінку можливих сценаріїв розвитку подій та обґрунтовувати вибір безпечних режимів руху. Це сприяє підвищенню рівня безпеки суднопластва та зниженню ймовірності виникнення аварійних ситуацій, особливо в умовах зростання рівня автоматизації та розвитку автономних суден.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує доцільність застосування технології цифрових двійників як ефективного інструменту підвищення безпеки суднопластва. Використання динамічних цифрових моделей забезпечує інтеграцію процесів моніторингу технічного стану судових систем, аналізу навігаційної інформації та підтримки прийняття рішень. Сформований підхід дозволяє підвищити обґрунтованість управлінських рішень, зменшити вплив людського елементу та забезпечити більш високий рівень ситуаційної обізнаності під час управління рухом судна. Застосування цифрових двійників у задачах судноводіння створює передумови для реалізації інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, здатних адаптуватися до змін навігаційної обстановки та враховувати комплекс експлуатаційних факторів.

Інтеграція цифрових двійників у структуру інформаційно-керуючих систем створює основу для подальшого розвитку автономного суднопластва. У цьому контексті цифровий двійник може розглядатися як ключовий елемент, що забезпечує узгодження процесів моніторингу, прогнозування та управління, формуючи єдине інформаційне середовище функціонування судна. У цілому впровадження технології цифрових двійників сприяє підвищенню надійності судових систем, зниженню ризиків аварійних ситуацій та формуванню сучасної концепції безпеки морепластва, орієнтованої на проактивне управління та використання інтелектуальних цифрових технологій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kilinc, Noah. (2025). The Digital Twin in Autonomous Shipping: A Global and Sustainable Architectural Plan Using Aerospace Safety Principles and Multidisciplinary Design. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.15481.74088>.
2. Jugović, A., Sirotić, M., Oblak, R., & Schiozzi, D. (2025). Integration of Maritime Autonomous Surface Ships into Coastal Waters Supply Chains: A Systematic Literature Review of Safety and Autonomy Challenges. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(12), 2346. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse13122346>.
3. Gaute Storhaug (2019) Digital twins and sensor monitoring – DNV GL. URL: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Digital-twins-and-sensor-monitoring/>.
4. Taghavi, Mahmood & Perera, Lokukaluge. (2026). Localized anomaly detection and recovery of marine engine data to support digital twin development in shipping. *Ocean Engineering*. URL: https://www.researchgate.net/publication/400095712_Localized_anomaly_detection_and_recovery_of_marine_engine_data_to_support_digital_twin_development_in_shipping
5. Bulgakov, Mykola & Melnyk, Oleksiy. (2025). Intelligent digital twin utilization for real-time forecasting and optimization of the ship's power system. *Collection of scientific works of the State University of Infrastructure and Technologies series Transport Systems and Technologies*. 121–131. 10.32703/2617-9040-2025-45-9. URL: https://www.researchgate.net/publication/393393664_Intelligent_digital_twin_utilization_

for_real-time_forecasting_and_optimization_of_the_ship's_power_system

6. Rødseth, Ørnulf & Burmeister, Hans-Christoph. (2015). Risk Assessment for an Unmanned Merchant Ship. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 9. 357-364. DOI: 10.12716/1001.09.03.08. URL: https://www.transnav.eu/Article2_Risk_Assessment_for_an_Unmanned_R%C3%B8dseth,35,593.html#

7. Dor Raviv. (2025) A double wave of innovation: digital twins in maritime operations – Complete Guide | ORCA AI. URL: <https://www.orca-ai.io/blog/digital-twins-in-maritime-operations/>

8. Berg, H.S., Menges, D., Tengesdal, T. et al. Digital twin syncing for autonomous surface vessels using reinforcement learning and nonlinear model predictive control. Sci Rep 15, 9344 (2025). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93635-9>.

9. Daniel Menges, Adil Rasheed. (2024) Digital Twin for Autonomous Surface Vessels: Enabler for Safe Maritime Navigation. URL: <https://arxiv.org/html/2411.03465v1>.

10. International Maritime Organization – Autonomous shipping. URL: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/autonomous-shipping.aspx>

ВПЛИВ ПРИРОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ НА ТОЧНІСТЬ РОЗПІЗНАВАННЯ РАКУРСУ СУДЕН ТРЕНОВАНОЮ МОДЕЛЛЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ YOLOv8n

Пашенко О.Л.

Національний університет «Одеська морська академія»
(Україна)

Вступ. Розвиток систем відеоспостереження та методів комп'ютерного зору створює передумови для автоматизації задач морського моніторингу, зокрема виявлення суден і оцінювання параметрів їх руху. Визначення ракурсу судна відносно спостерігача дозволяє оцінити курс і характер його руху, що є важливим для підвищення ситуаційної обізнаності.

Відповідно до COLREG [1], інтерпретація навігаційної ситуації базується на аналізі взаємного розташування суден, їх відносних пеленгів, а також візуальних ознак під час спостереження. Таким чином, визначення ракурсу є наближеним формалізованим представленням цих ознак для задач автоматизованого аналізу. Водночас більшість існуючих досліджень обмежується визначенням типу суден без урахування їх взаємного положення та виконується на підготовлених наборах зображень [2].

Ефективність моделей у реальних умовах відеоспостереження, де якість зображення залежить від освітлення, залишається недостатньо дослідженою, що обумовлює необхідність експериментальної оцінки їх стійкості. У цьому контексті актуальним є дослідження можливостей моделі YOLOv8n для розпізнавання ракурсу суден у відеопотоці та аналізу її ефективності залежно від умов спостереження.

Опис моделі комп'ютерного зору. На основі архітектури YOLOv8n здійснено донавчання моделі комп'ютерного зору із використанням власного спеціалізованого набору даних [3]. Початкова навчальна вибірка містить 925 зображень, у межах яких кожен об'єкт анотовано відповідно до одного з восьми класів ракурсу: forward, port bow, port side, starboard bow, starboard quarter, starboard side, stern, port quarter. Мінімальна роздільна здатність зображень становить 700×700 пікселів.

Формування навчальної вибірки здійснено на основі зображень, що відображають умови реальної експлуатації системи. Вибір даних виконано з урахуванням варіативності часу доби, метеорологічних умов, масштабу об'єктів у кадрі, а також різноманіття типів суден і ракурсів їх спостереження. Географічне охоплення зображень є глобальним.

Для навчання моделі штучного зору були виконані декілька тренувань, отримані після них результати піддавалися аналізу, та приймалося рішення щодо подальшого використання отриманих результатів. В фіналі були обрані лише тренування дев'яти етапів (табл. 1). На першому етапі було виконано грубе тренування моделі, всі зображення були масштабовані до розміру за шириною 416 пікселів. В подальшому для більш тонкого налаштування моделі поступово збільшувався розмір вхідного зображення до 672 пікселів, що дозволило покращити виявлення дрібних об'єктів і є одним із ефективних розмірів для YOLOv8n [4].

Після проведення перших чотирьох етапів тренувань було виявлено, що модель часто плутає навколишнє середовище з реальними цілями-суднами. Набір даних було розширено до 1742 зображень, 115 з яких є negative examples, тобто зображення без анотацій, що відображають навколишнє середовище.

З використанням оновленого набору даних були проведені послідовні 5 тренувань (табл. 1, етап 5–9). Було використано в комбінації такі види аугментації: регулювання насиченості, яскравості та відтінку, зсув та масштабування [5]. Загальна кількість епох тренування – 445.

Таблиця 1 – Результати навчання моделі комп'ютерного зору, що розпізнає ракурс судна

Показник	1 етап	2 етап	3 етап	4 етап	5 етап	6 етап	7 етап	8 етап	9 етап
Загальна кількість епох	100	20	20	25	60	60	60	50	50
Епоха з найкращими показниками	78	19	18	25	56	57	59	28	17
Втрати за межами рамки	0.66735	0.5973	0.00428	0.0045	0.00276	0.00297	0.00293	0.00265	0.00477
Втрати класифікації	0.88926	0.6454	0.67594	0.69631	1.30775	1.32399	1.01176	0.84435	0.73619
Втрати розподільчої фокусної функції	0.92138	0.88461	0.92456	0.93709	0.78449	0.8135	0.80043	0.76718	0.68824
Точність	0.28878	0.36056	0.36422	0.3964	0.59788	0.6379	0.65852	0.67918	0.70344
Повнота	0.51674	0.43925	0.42528	0.41739	0.56667	0.59754	0.6397	0.6445	0.60982
Середня точність при порозі 0.5	0.37481	0.36487	0.35009	0.37135	0.59847	0.64198	0.66873	0.67282	0.67467
Середня точність у діапазоні 0.5:0.95	0.30066	0.29669	0.28509	0.30399	0.47747	0.51513	0.5428	0.54766	0.54036

У підсумку отримано модель із наступними показниками якості: точність (precision) становить 0.70, повнота (recall) – 0.61, середня точність при пороговому значенні IoU 0.5 (mAP@0.5) – 0.67, а показник середньої точності в діапазоні IoU 0.5:0.95 (mAP@0.5:0.95) — 0.54.

Опис дослідження. Для перевірки працездатності моделі було проведено експериментальне дослідження на основі відеоданих, зібраних у період з 10 лютого по 25 лютого 2026 року. Відеозйомка здійснювалася з борту судна-спостерігача, яке перебувало на рейді поблизу порту Chittagong Port (Bangladesh), координати судна: 21°53' N, 91°48' E.

Зйомка виконувалася за допомогою камери з матрицею роздільною здатністю 12 Мп та об'єктивом з діафрагмою f/1,6, що забезпечує достатню світлочутливість під час зйомки за різних умов освітлення. Роздільна здатність відео складає до 1280 × 720 пікселів, частота становить 30 кадрів за секунду. Експериментальна база даних налічує 81 відео. Тривалість відео становить до 7 секунд.

У процесі відеозйомки спостерігалися судна різних типів, переважно балкери та контейнеровози. Судна здебільшого перебували на якорі та не здійснювали поступального руху. Водночас через хвильові коливання морської поверхні та зміну вітрових умов спостерігалася незначне обертання суден навколо якоря, а також мінімальні зміни їх просторового положення відносно камери. Таким чином, попри відносну статичність сцени, розміщення об'єктів спостереження навколо не було сталим. Загалом протягом експерименту переважно фіксувалися одні й ті самі судна, що дало змогу оцінити стабільність роботи моделі штучного зору за умов повторюваних об'єктів, але зі змінними кутами огляду та освітленням.

У процесі дослідження результати роботи моделі порівнювалися з результатом, визначеним дослідником під час аналізу відеоматеріалів. Для кожного кадру встановлювалася відповідність між фактичною наявністю об'єктів у кадрі та результатами виявлення, що отримані за допомогою моделі. Оцінювання результатів проводилося шляхом аналізу точності виявлення об'єктів, а саме правильної локалізації та класифікації, що дозволяє більш точно визначити джерела можливих помилок у роботі системи.

Під час аналізу результатів роботи моделі розглядалися такі можливі варіанти результатів (рис. 1):

1. Правильне виявлення об'єкта (True Positive Correct, TP_c) – вірна локалізація та

класифікація.

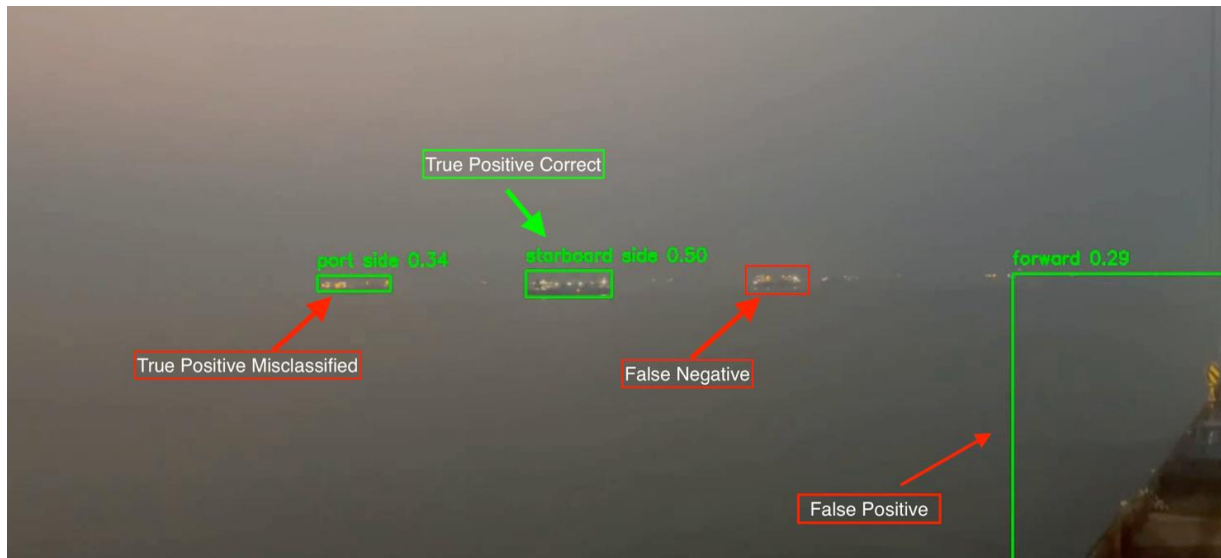


Рисунок 1 – Можливі варіанти результатів роботи моделі

2. Помилка класифікації (True Positive Misclassified, TP_m) – ситуація, коли об'єкт локалізований, проте віднесений до неправильного класу. В подальшому це є джерелом інформації для визначення пеленгу на об'єкт і, як наслідок, підвищення безпеки мореплавства. У межах проведеного дослідження неточність локалізації не розглядалася як окрема категорія.

3. Хибнопозитивне спрацювання (False Positive, FP) – модель визначає наявність об'єкта у кадрі, але об'єкт ідентифікації відсутній.

4. Пропуск об'єкта (False Negative, FN).

Загальна кількість локалізованих об'єктів можна визначити за формулою (1):

$$TP = TP_c + TP_m, \quad (1)$$

де TP_c – кількість об'єктів, що були правильно локалізовані та правильно класифіковані; TP_m – кількість об'єктів, що були локалізовані, але класифіковані помилково.

Результати дослідження. Для кількісної оцінки ефективності роботи моделі у процесі дослідження використовується показник середньої впевненості моделі для правильних виявлень (mean confidence of correct detections), який характеризує рівень впевненості моделі у випадках коректного визначення об'єктів. До розрахунку включаються лише істинно-позитивні виявлення, тобто ті, для яких правильно визначено як клас об'єкта, так і його локалізацію. Значення показника обчислюється як середнє арифметичне оцінок впевненості моделі (2):

$$\overline{C_{TP}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i, \quad (2)$$

де C_i – значення впевненості моделі для i -го правильного виявлення, N – загальна кількість істинно-позитивних виявлень.

Аналізуючи роботу моделі комп'ютерного зору залежно від часу доби (рис. 2), можна зробити висновок, що під час світлового дня, з 06:00 до 18:00 години за місцевим часом, показник середньої впевненості моделі для правильних виявлень подекуди досягає 0.85, за умов хорошої видимості. Резистентність моделі до умов освітлення зумовлена застосуванням технік кольорних аугментацій при тренуванні моделі комп'ютерного зору [5]. При достатньому природному освітленні система забезпечує стабільне та надійне розпізнавання об'єктів до 1.9 морських миль. Пунктирною лінією на графіку показано

згладжену залежність показника, отриману шляхом усереднення значень, що дозволяє виявити загальну тенденцію зміни без впливу випадкових коливань.

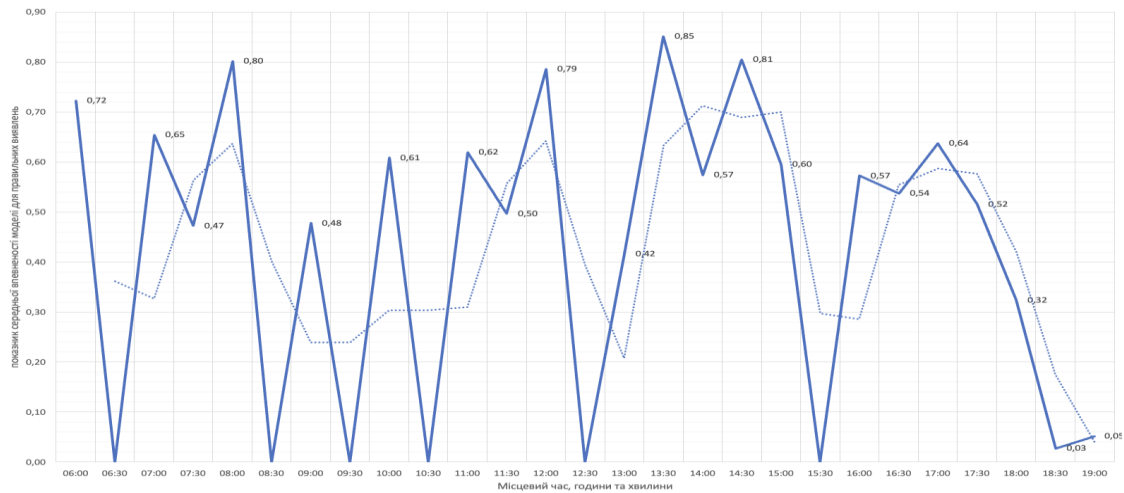


Рисунок 2 – Показник середньої впевненості моделі для правильних виявлень залежно від часу доби

Зниження показника середньої впевненості моделі для правильних виявлень або їх відсутність, за умов достатнього освітлення, спричинено здебільшого ускладненими погодними умовами. У вечірні години, після 18:00, значення показника суттєво зменшуються, а для частини дистанцій наближаються до нульових значень. За рахунок зниження рівня освітленості, спостерігається погіршення контрастності об'єктів та зростання впливу шумів у відеосистемі. В темний час доби формування зображення здійснюється виключно за рахунок наявних джерел світла, таких як місячне освітлення, берегові вогні, навігаційні вогні суден або інші штучні джерела світла. За умов недостатнього освітлення камера автоматично підвищує чутливість сенсора до світла. Збільшення чутливості сенсора дозволяє отримувати зображення навіть за слабого освітлення, однак це призводить до появи цифрового шуму та зниження деталізації зображення. Найбільш помітне зниження впевненості моделі спостерігається на великих відстанях, де навіть незначне погіршення умов видимості призводить до втрати можливості впевненої ідентифікації.

Аналіз залежності результатів від часу доби показав, що з 06:00 до 18:00 модель забезпечує стабільно високий рівень правильних виявлень (рис. 3). Протягом усього світлового дня переважають вірні виявлення та локалізації.

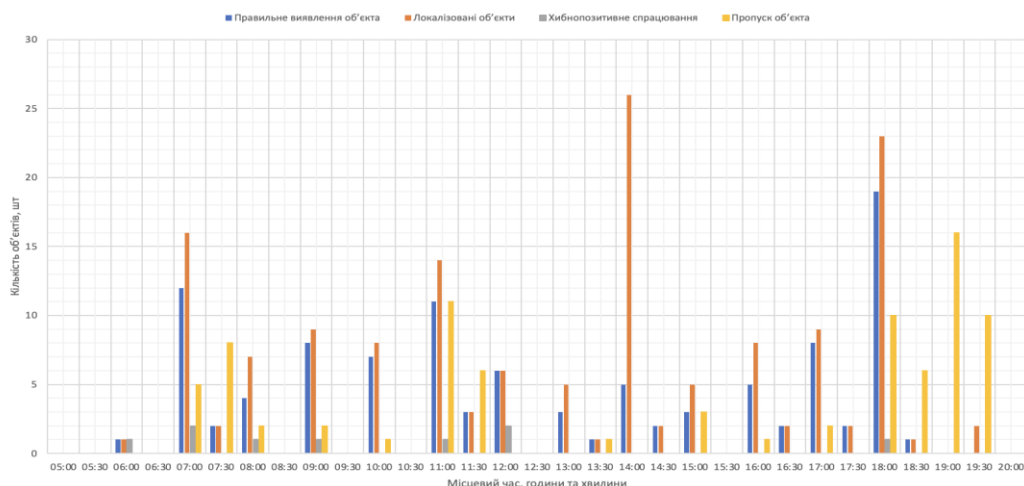


Рисунок 3 – Діаграма залежності результатів роботи моделі від часу доби

Починаючи з 18:30, коли контрастність об'єктів падає, можливість виявлення суден моделлю істотно зменшується. Таким чином, використання камери без тепловізійного каналу може обмежувати ефективність роботи системи в умовах низької освітленості, що необхідно враховувати під час практичного застосування відеосистеми для визначення ракурсу суден. Це також свідчить про те, що рівень освітлення є одним із ключових факторів, що визначають ефективність роботи систем відеоспостереження та алгоритмів автоматичного визначення та локалізації об'єктів.

Висновки. Проведений аналіз показав, що ефективність роботи моделі суттєво залежить від умов освітлення. У світлий час доби модель демонструє стабільну роботу, тоді як у вечірній – ефективність істотно погіршується через погіршення контрастності та зростання рівня шумів у відеозображенні.

Під час аналізу відео були вірно локалізовані 152 об'єкти, для 105 з яких був визначений також вірно ракурс. Кількість пропущених об'єктів становить 84, переважна більшість яких знаходиться на далеких відстанях або за низького рівня освітлення. Спостерігалось 9 хибних спрацювань.

Отримані результати підтверджують можливість використання моделей комп'ютерного зору для задач автоматичної локалізації та класифікації суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (COLREGs). Лондон: IMO, 1972. 48 с.
2. Kanjir U., Greidanus H., Oštir K. Vessel detection and classification from spaceborne optical images: A literature survey. *Remote Sensing of Environment*. 2018. Vol. 207. P. 1–26. DOI: 10.1016/j.rse.2017.12.033
3. Pashenko O. L., Pipchenko O. D. Розробка моделі штучного зору на базі алгоритму YOLO для визначення ракурсу судна. *Судноводіння | Shipping & Navigation*. 2025. № 38. URL: <http://navjournal-nuoma.learnmarine.com/>
4. Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H.-Y. M. From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLO-NAS: A comprehensive review of the YOLO series. arXiv preprint arXiv:2304.00501. 2024. URL: <https://arxiv.org/pdf/2304.00501.pdf>
5. Pashenko O. L. Використання аугментації для покращення якості навчання моделі штучного зору для визначення ракурсу судна. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2025. № 2 (31). С. 52–63. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.052-063

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕЙРОМЕРЕЖНЕВИХ І СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Григорчук К. С., Полетаєв М. І.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Аналітика часових рядів є базовим інструментом підтримки прийняття рішень [1]. На морському транспорті точне прогнозування експлуатаційних показників (попиту на перевезення, коливань цін, витрат палива енергетичними установками) або раннє виявлення аномалій у роботі систем дозволяє суттєво оптимізувати операційні процеси. Зростання обсягів даних стимулює поширення алгоритмів машинного навчання: ансамблевих методів та архітектур глибокого навчання, які дедалі активніше конкурують із класичними статистичними підходами [2]. Судноплавство безперервно продукує різноманітні дані: від макроекономічних тенденцій до телеметрії бортових систем у режимі реального часу [3]. Оскільки некоректний вибір методу аналізу безпосередньо позначається на безпеці рейсів та операційних витратах, критично важливо визначити, для яких типів даних і класів завдань конкретний математичний апарат демонструє найвищу ефективність. З метою вирішення цього завдання у роботі наведено результати порівняльного аналізу ефективності статистичних і нейромережних методів прогнозування часових рядів для потреб морської логістики.

Актуальність досліджень. Точність прогнозування експлуатаційних параметрів безпосередньо визначає фінансову та технічну ефективність логістики. Кожна математична модель має власні межі застосовності, і використання невідповідного інструменту призводить до накопичення помилок екстраполяції. Тому систематизація знань про переваги й обмеження різних підходів є базою для створення практичного алгоритму вибору оптимальної моделі під конкретні завдання транспортної логістики та судноводіння. Некоректний вибір методу аналізу позначається на безпеці рейсів та операційних витратах.

Постановка задачі. Мета дослідження – порівняти ефективність класичних статистичних і нейромережних методів прогнозування часових рядів. Для цього необхідно розробити експериментальний протокол, налаштувати моделі SARIMA, LSTM та XGBoost, застосувати крос-валідацію та оцінити результати за допомогою комплексу метрик похибки (MAE, RMSE, MAPE) на репрезентативній вибірці даних.

Основні моделі та методика проведення експериментів. У дослідженні розроблено та реалізовано експериментальний протокол порівняння трьох відмінних математичних підходів: класичної статистичної моделі авторегресії з інтегрованим ковзним середнім (SARIMA), алгоритму градієнтного бустингу на деревах рішень (XGBoost) та рекурентної нейронної мережі з архітектурою довгої короткочасної пам'яті (LSTM). Експериментальною базою слугував відкритий датасет порту Лос-Анджелеса за період із 1999 по 2024 роки (312 місячних спостережень). Цільовою змінною для прогнозування обрано агрегований показник загального контейнерообігу (Total TEUs) – місячну суму імпорتنих та експортних потоків у двадцятифутовому еквіваленті. Вибір саме цього індикатора зумовлений його визначальною роллю в операційному менеджменті морських терміналів. Точний прогноз динаміки TEU дозволяє портовим адміністраціям завчасно оптимізувати розподіл ресурсів: планувати завантаженість причалів і кранового обладнання, розраховувати необхідні складські площі та пропускну здатність суміжних транспортних вузлів для уникнення заторів. Крім того, цей показник є високочутливим маркером макроекономічних коливань. Його часовий ряд містить складні нелінійні патерни, сезонність та раптові структурні зсуви, що робить його репрезентативним масивом даних для об'єктивного тестування стійкості алгоритмів машинного навчання та статистичних моделей.

Методологія дослідження передбачає сувору послідовність етапів обробки даних та моделювання. На етапі підготовки часових рядів реалізовано процедури очищення від аномальних значень, заповнення пропусків та масштабування даних. Для коректної роботи моделі SARIMA проводилася перевірка рядів на стаціонарність за допомогою розширеного тесту Дікі-Фуллера.

Модель SARIMA застосовується для фіксації лінійних залежностей та вираженої сезонності. Принцип її дії полягає у введенні лагових ефектів на величину сезону, що в операторній формі Бокса-Дженкінса можна записати як [4]:

$$\phi_p(B)\phi_1(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D y_t = \theta_q(B)\theta_Q(B^s)\varepsilon_t \quad (1)$$

де $\phi_p(B)$ – поліном несезонної авторегресії порядку p ; $\phi_1(B^s)$ – поліном сезонної авторегресії порядку P ; $(1-B)^d$ – оператор несезонної різниці порядку d , що забезпечує стаціонарність; $(1-B^s)^D$ – оператор сезонної різниці порядку D ; $\theta_q(B)$ – поліном несезонного ковзного середнього порядку q ; $\theta_Q(B^s)$ – поліном сезонного ковзного середнього порядку Q ; B – оператор зворотного зсуву на один період; s – період сезонності; y_t – фактичне значення часового ряду в момент часу t ; ε_t – білий шум (випадкова похибка).

Алгоритм XGBoost вимагає трансформації ряду в матрицю лагових та календарних ознак. [5] Ключовою інновацією методу є введення регуляризації безпосередньо у функцію цілі (2), що контролює складність дерев та запобігає перенавчанню:

$$L(\phi) = \sum_i l(\hat{y}_i, y_i) + \sum_{k=1}^K \Omega(f_k), \quad (2)$$

де $L(\phi)$ – цільова функція, яку алгоритм мінімізує під час навчання; $l(\hat{y}_i, y_i)$ – функція втрат (перший доданок), що вимірює похибку моделі; y_i – фактичне значення цільової змінної; $\hat{y}_i$ – прогнозоване значення; $\Omega(f_k)$ – термін регуляризації (другий доданок), що «карає» за складність дерев; f_k – функція k -го дерева в ансамблі; i – індекс спостереження у вибірці; k – індекс дерева в ансамблі.

Формула для другого доданку (терміну регуляризації $\Omega(f_k)$) має такий вигляд:

$$\Omega(f) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \sum_j w_j^2, \quad (3)$$

де $\Omega(f)$ – значення регуляризації для k -го дерева; γ – коефіцієнт штрафу за створення додаткового листка (контролює розростання дерева); T – загальна кількість листків у дереві; λ – коефіцієнт L_2 – регуляризації (штрафує за надто великі значення ваг, щоб уникнути перенавчання); w_j – вага (прогнозне значення) в j -му листку дерева.

Архітектура LSTM налаштовувалася з урахуванням специфіки обробки секвенціальних даних. У середині кожної LSTM-клітини є клітинний стан C_t (довгострокова пам'ять) та прихований стан h_t . Оновлення цих станів через систему гейтів розраховується за формулами (4) та (5) [6]:

$$C_t = F_t \odot C_{t-1} + I_t \odot \tilde{C}_t, \quad (4)$$

$$h_t = O_t \odot \tanh(C_t), \quad (5)$$

де C_t – стан клітини (довгострокова пам'ять); F_t – гейт забуття; I_t – вхідний гейт; $\tilde{C}_t$ – кандидат на новий стан клітини; h_t – прихований стан (короткострокова пам'ять); O_t – вихідний гейт; $\tanh$ – функція активації (гіперболічний тангенс); $\odot$ – оператор поелементного множення.

Оцінювання ефективності алгоритмів виконувалося за допомогою процедури крос-валідації для часових рядів, яка зберігає хронологічну цілісність даних і унеможливорює витік інформації з майбутнього в минуле. Порівняння точності прогнозів базувалося на комплексі статистичних метрик: середній абсолютній похибці (MAE),

середньоквадратичній похибці (RMSE) та середній абсолютній відсотковій похибці (MAPE) [1]. Для забезпечення масштабонезалежного порівняння результатів різних часових рядів основною метрикою обрано MAPE, розрахунок якої здійснюється за формулою (6):

$$\text{MAPE} = \frac{100\%}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right|, \quad (6)$$

де y_t – фактичне значення показника; $\hat{y}_t$ – прогнозоване значення; n – загальна кількість спостережень у тестовій вибірці.

Експериментальний протокол порівняння моделей розроблено та реалізовано спеціалізованому програмному середовищі мовою Python. Для налаштування моделей SARIMA, LSTM та XGBoost, застосували крос-валідацію. Результати експериментів оцінювались за допомогою метрик похибки (MAE, RMSE, MAPE) на репрезентативній вибірці даних.

Результати досліджень. Емпіричний аналіз ефективності моделей базується на стратегії рекурсивного прогнозування. Дослідження розділено на три часові горизонти: короткостроковий (1 місяць), середньостроковий (6 місяців) та довгостроковий (32 місяці) за умов різного обсягу ретроспективних даних: від повної історії (понад 20 років) до критично обмеженої вибірки (останні 3 роки). Основний акцент зроблено на порівнянні точності відтворення трендової та сезонної складових часового ряду в умовах нестабільності..

На короткостроковому горизонті за наявності повного масиву даних найвищу точність демонструє рекурентна нейромережа LSTM (MAPE = 3.26%), яка ефективно використовує довготривалі залежності. Однак у разі екстремального скорочення навчальної вибірки до 3 років абсолютним лідером стає класична статистична модель SARIMA. Вона знижує похибку MAPE до 1.18%, краще адаптуючись до локальної структури ряду. Це підтверджує, що класичні статистичні моделі є надійнішими для однокрокового прогнозу за умов дефіциту даних, тоді як LSTM втрачає свої переваги і стає нестабільною

Таблиця 1 – Метрики якості короткострокового прогнозу (горизонт 1 місяць, історія 3 роки)

start_year	forecast_year	horizon_months	model	MAE	RMSE	MAPE
2018	2021	1	SARIMA	9,872.17	9,872.17	1.18%
2018	2021	1	XGBoost	32,790.57	32,790.57	3.92%
2018	2021	1	LSTM	16,913.05	16,913.05	2.02%

Середньострокове прогнозування (6 місяців) розкриває здатність нейромереж до фіксації нелінійних взаємозв'язків. За умов обмеженої вибірки лідирує LSTM (MAPE = 5.31%), оскільки вона краще узагальнює дані. Водночас класична SARIMA на цьому горизонті показує найменшу відповідність фактичній динаміці (MAPE = 27.98%) та систематично занижує загальний рівень тренду (Таблиця 2, Рисунок 1).

Таблиця 2 – Метрики якості середньострокового прогнозу (горизонт 6 міс., історія 3 роки)

start_year	forecast_year	horizon_months	model	MAE	RMSE	MAPE
2018	2021	6	SARIMA	260,568.10	302,861.22	27.98%
2018	2021	6	XGBoost	198,994.97	225,123.47	21.27%
2018	2021	6	LSTM	47,690.83	53,753.93	5.31%

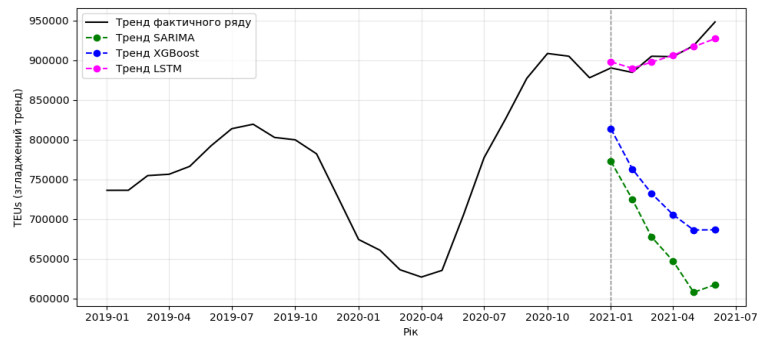
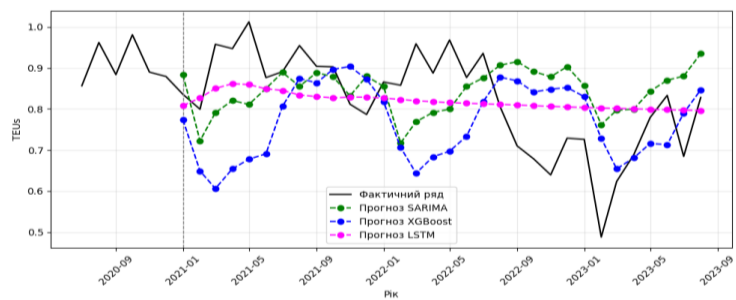
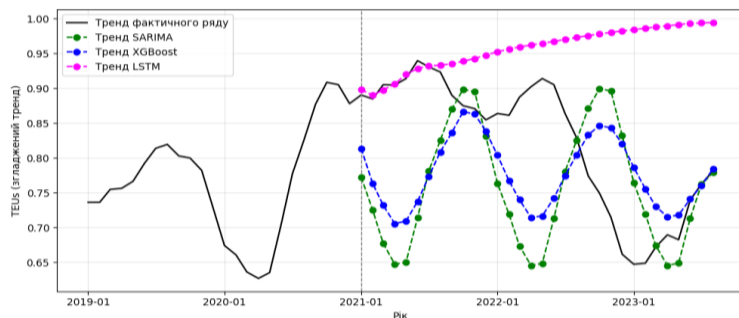


Рисунок 1 – Візуальне порівняння середньострокових трендів до Таблиці 2

Довгостроковий прогноз є найскладнішим завданням через необхідність зберігати стабільність тренду та враховувати структурні зміни. За наявності достатньої історії LSTM зберігає лідерство (Рисунок 1а) завдяки механізмам пам'яті ($MAPE = 11.61$). Проте на критично малій вибірці якість прогнозу всіх моделей різко деградує. У цьому сценарії ансамблевий метод XGBoost виявляє найбільшу гнучкість: хоча його прогнози мають осциляції, алгоритм фіксує найменшу похибку RMSE (159,157.87), краще утримуючи загальний рівень ряду в умовах невизначеності. Класична SARIMA на довгому горизонті реагує на структурні зміни із запізненням через жорстку фіксацію тренду (Рисунок 2б).



а)



б)

Рисунок 2 – візуальне порівняння довгострокових прогнозів в різних умовах: б) візуальне порівняння довгострокових трендів: останні 3 роки; а) візуальне порівняння довгострокових трендів: повна історія (1999–2020)

Особливістю аналізу сезонної складової стало ізольоване дослідження здатності моделей фіксувати циклічні коливання вантажопотоку незалежно від впливу загального макроекономічного тренду. Результати такого декомпозованого аналізу виявили кардинальні відмінності у поведінці алгоритмів. Нейромережа LSTM генерує найбільш плавні та стабільні сезонні хвилі, що оптимально підходить для довгострокового стратегічного планування за умови наявності глибоких архівів даних (середня абсолютна похибка сезонності $MAE = 32\,841.63$). Водночас статистична модель SARIMA, завдяки математично закладеним коефіцієнтам сезонної авторегресії, забезпечує найточніше

відтворення різкої амплітуди сезонних піків на коротких дистанціях з малою історією (MAE сезонності = 17.14). Це підтверджує доцільність використання класичних підходів для точного короткострокового прогнозування сезонності в умовах дефіциту даних.

Висновки. Проведене дослідження доводить, що точність прогнозування експлуатаційних показників у суднопластві та портовій логістиці критично залежить від відповідності математичної моделі структурі наявних даних. Експериментально підтверджено відсутність універсального алгоритму. Для оперативного планування на короткострокових горизонтах в умовах обмеженої ретроспективи найвищу точність та стабільність забезпечує статистична модель SARIMA. Для довгострокового прогнозування складних нелінійних патернів вантажопотоків за наявності глибоких архівів даних пріоритетним є використання архітектури LSTM. Алгоритм XGBoost демонструє найвищу стійкість до аномалій і є оптимальним вибором під час роботи із зашумленими даними.

Практична цінність роботи полягає у формуванні методологічної бази для проєктування сучасних систем підтримки прийняття рішень. Перспективою подальших досліджень є розробка повноцінного універсального адаптивного забезпечення, яке зможе в режимі реального часу аналізувати характеристики вхідного інформаційного потоку та автоматично перемикатися між статистичними, ансамблевими й нейромережевими алгоритмами залежно від зміни горизонту планування чи виникнення кризових ситуацій на транспорті.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hyndman Rob, Athanasopoulos George (2021). Forecasting: Principles and Practice. 3rd edition. OTexts, Melbourne, Australia. OTexts.com/fpp3.
2. Makridakis Spyros, Spiliotis Evangelos & Assimakopoulos Vassilios (2018). Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward. PLOS ONE, 13:3, <https://journals.plos.org>.
3. Kontopoulou Vasiliki, Panagopoulos Athanasios, Kakkos Ioannis & Matsopoulos George (2023). A Review of ARIMA vs. Machine Learning Approaches for Time Series Forecasting in Data Driven Networks. Future Internet, 15:8, <https://www.mdpi.com/1999-5903/15/8/255>.
4. Box George, Jenkins Gwilym, Reinsel Gregory & Ljung Greta (2015). Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th edition. John Wiley & Sons.
5. Chen Tianqi & Guestrin Carlos (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785–794, <https://www.kdd.org/kdd2016/papers/files/rfp0697–chenAemb.pdf>.
6. Hochreiter Sepp & Schmidhuber Jürgen (1997). Long short-term memory. Neural Computation, 9:8, <https://direct.mit.edu/neco/article-abstract/9/8/1735/6109/Long-Short-Term-Memory>.

ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ПРОЦЕСІВ БУНКЕРУВАННЯ СУДЕН НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Вільшанюк М. І., Романов А. Ю.
Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Сектор морської логістики традиційно характеризується консервативним підходом до впровадження інноваційних рішень. Враховуючи, що судноплавні операції в даний час не часто включають інноваційні елементи, галузь морських перевезень має всі передумови для застосування провідних інформаційних технологій, наприклад, смарт-суден, флоту та глобальної логістики, а також застосування технології блокчейн та штучного інтелекту.

Актуальність досліджень. Актуальність теми зумовлена нагальною потребою морської галузі у зниженні експлуатаційних витрат та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Традиційний процес заходу судна в порт за принципом «першим прийшов — першим обслужений» (режим «поспішай і чекай») призводить до тривалих простоїв, неефективного спалювання палива та збільшення викидів парникових газів. Як свідчать дослідження Міжнародної морської організації (ІМО) в рамках ініціативи GreenVoyage2050, оптимізація швидкості суден і перехід до концепції прибуття «Just in Time» (JIT) здатні зменшити споживання палива та викиди CO₂ в середньому на 14% за один рейс [1].

Крім того, поширення на морське судноплавство жорстких екологічних стандартів, зокрема системи торгівлі викидами Європейського союзу (EU ETS), вимагає від судновласників передбачуваного контролю за викидами та управління квотами (EUA). Вирішення цих комплексних завдань можливо зробити більш ефективним із застосуванням штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання, які здатні обробляти великі масиви даних (зокрема з систем AIS) для автоматичного моделювання бункерувальних операцій та мінімізації супутніх ризиків [2, 3]. Перехід до таких інтелектуальних систем робить цифровізацію безальтернативним шляхом для забезпечення конкурентоспроможності флоту. Розробка подібних смарт-рішень є вкрай перспективним напрямом, що підкреслює важливість залучення сучасних фахівців з комп'ютерних наук.

Про необхідність впровадження сучасних технологій в процесах бункерування та потребі в переході на сучасне паливо для суден в рамках програми щодо зменшення шкідливих викидів в порту відмічено в праці [4].

В рамках інноваційного розвитку морських портів в роботі [5] розглядається питання поширення цифровізації операцій з бункерування в портах.

Постановка задачі. Метою дослідження є процеси бункерування суден, аналіз, як інтеграція засобів штучного інтелекту може вплинути на ефективність бункерування, а також оцінка переваг переходу від традиційного портового обслуговування до нових концепцій бункерування.

Основний матеріал. Використовуючи алгоритми машинного навчання, штучний інтелект може допомогти прогнозувати моделі попиту на паливо та відповідним чином коригувати рівень запасів, забезпечуючи своєчасне та ефективне постачання. Що стосується управління ланцюжком поставок, штучний інтелект може аналізувати величезні обсяги даних, щоб оптимізувати маршрути доставки палива, мінімізувати витрати бункеру та знизити загальні транспортні витрати.

Штучний інтелект надає бункерувальним компаніям можливість відстежувати закономірності на суднах, які вони обслуговують. Наприклад, виявити постійних відвідувачів порту та запропонувати їм вигідні пакетні пропозиції, перетворюючи випадкові співпраці на довгострокові партнерства.

Крім того, штучний інтелект здатен забезпечити контроль за дотриманням нормативних вимог судноплавства, виявляючи оманливі практики та відстежуючи рух суден. У міру того, як штучний інтелект стає все більш ефективним і доступним, індустрії

бункерування було б добре прийняти ці стратегічні інструменти, оскільки вони сприяють підвищенню ефективності, зниженню ризиків та дотриманню морських вимог і подальших інновацій.

Прикладом реалізації зазначених технологій є цифрова платформа Fuelink, розроблена для управління бункерними даними та оптимізації постачання. Це рішення забезпечує прогнозування стратегій бункерування, порівняльний аналіз цін на паливо та контроль за відповідністю системі торгівлі викидами Європейського союзу (EU ETS), включаючи управління квотами (EUA).

Функціонал платформи спрямований на підвищення прозорості, ефективності та контролю, коли вся інформація, пов'язана з бункерувальником, зберігається в одному місці. Поєднуючи інформацію, отриману автоматично з AIS та звітів (noon report), зі своїм інструментом управління на основі штучного інтелекту та порівняльним аналізом, Fuelink дозволяє моделювати та порівнювати як звичайні, так і альтернативні види палива на різних маршрутах, дозволяючи користувачам приймати обґрунтовані рішення про те, де і коли бункерувати, щоб досягти найбільш економічно ефективного маршруту. Це також передбачає відстеження готовності портів до бункерування в реальному часі задля уникнення зайвих експлуатаційних затримок.

Fuelink підтримує відповідність вимогам ETS ЄС та управління запасами EUA. Користувачі можуть завантажувати графіки рейсів і миттєво розраховувати витрати на ETS, моделюючи EUA за різними цінами перед покупкою через платформу в оптимальний час і автоматично зберігаючи облік усіх придбаних у автономній системі інвентаризації [6].

Судноплавна галузь потребує системи управління даними бункерування, розробленої професіоналами з бункерувальних операцій та експлуатації суден, яка забезпечує повну видимість і дозволяє приймати кращі рішення щодо оптимізації ланцюжка створення вартості бункерувальних послуг. Платформу Fuelink створено для об'єднання даних у режимі реального часу, що дозволяє машинному навчанню моделювати сценарії вартості палива, створювати автоматизовані звіти та сповіщення, вимірювати ефективність бункерування та підтримувати управління викидами парникових газів [7, 8].

Fuelink діє як центральне сховище для всієї інформації, пов'язаної з бункеруванням. Платформа записує та відстежує всі поставки, розміщуючи накладні про доставку матеріалів (BDN), інвойси, звіти сюрвейсрів, сертифікати якості (CoQs), інформацію ISCC, звіти про відбір проб та аналіз палива та мастил, та іншу документацію. Це спрощує доступ та покращує аудит, порівняльний аналіз та автоматизовану звітність для операційних та юридичних підрозділів. Сприяючи прозорості та значно підвищуючи ефективність, Fuelink підтримує обґрунтоване прийняття рішень, які сприятимуть дотриманню нормативних вимог, а також заощаджуватимуть час та гроші (рис. 1).



Рисунок 1 – Послідовність обміну даними під час операцій з бункерування із застосуванням системи Fuelink

Процес заходу судна в порт в даний час, як правило, не оптимізований. Судна можуть поспішати до наступного порту, але іноді виявляється, що порт зайнятий, тому що там знаходиться інше судно, вантаж недоступний для завантаження або немає резервуара для розвантаження. Це призводить до того, що судну доводиться або очікувати за межами порту на якірній стоянці протягом багатьох годин, днів або навіть тижнів, або маневрувати на дуже низьких швидкостях у районі порту, чекаючи на наявність причалу, фарватеру та морських служб. Такий режим роботи судна «поспішай і чекай» має багато недоліків і з точки зору безпеки, екології та економіки може бути значно покращений. Порівняння традиційного процесу заходу судна в порт бункерування та альтернативного варіанту «Just in Time» (JIT) наведено на рисунку 2.



Рисунок 2 – Порівняння традиційного процесу заходу судна в порт бункерування та альтернативного варіанту «Just in Time»

Результати досліджень. Відповідно до поставленої мети, у ході роботи було успішно виконано всі заплановані етапи дослідження. Дослідження впливу засобів штучного інтелекту на ефективність бункерування показало, що використання сучасних технологій дозволяє з високою точністю спрогнозувати попит на суднове паливо, своєчасно коригувати запаси та вдосконалювати маршрути доставки, що забезпечить суттєве зниження загальних транспортних витрат та своєчасність постачання. На прикладі цифрової платформи Fuelink доведено, що впровадження смарт-інструментів забезпечує прозорість операцій завдяки централізації даних та дозволяє автоматизувати розрахунки витрат та моделювати запаси квот відповідно до вимог системи торгівлі викидами ЄС (EU ETS). Застосування стратегії бункерування «Just in Time» (JIT) у комплексі зі штучним інтелектом повністю усуває ці недоліки, вирішуючи загальну проблему: воно ліквідує подовжений час очікування на якірних стоянках та зменшує кількість викидів парникових газів у портах. Таким чином, перехід до інтелектуальних платформ управління та концепції JIT гарантує позитивний вплив на безпеку мореплавства та навколишнє середовище.

Висновки. Сьогодні поширена практика пріоритезації суден на основі порядку їх прибуття (також відома як правило «першим прийшов – першим обслужений») посилює затори та сприяє збільшенню викидів парникових газів на рівні портів. Така практика призводить до неефективності та затримок, оскільки судна повинні чекати своєї черги, спалюючи паливо, незалежно від своїх безпосередніх експлуатаційних потреб.

Системна інтеграція таких рішень, як Fuelink, а також впровадження моделі JIT бункерування оптимізує час прибуття суден до портів за допомогою штучного інтелекту,

зменшуючи затримки та викиди, а також підвищуючи ефективність портів та екологічну стійкість. Це приносить користь портовим адміністраціям, компаніям, що займаються бункерними баржами, і судновласникам, надаючи дані в режимі реального часу для обґрунтованих рішень, створюючи значні соціально-економічні переваги для портів і морської галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. IMO GreenVoyage2050. Just In Time Arrival: Emissions reduction potential in global container shipping. International Maritime Organization. URL: <https://greenvoyage2050.imo.org/just-in-time-arrivals/> (Дата звернення 04.03.2026)
2. Fuentes, G. (2021). Generating bunkering statistics from AIS data: A machine learning approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 155, 102495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102495>
3. Munim, Z. H., Dushenko, M., et al. (2020). Big data and artificial intelligence in the maritime industry: a bibliometric review and future research directions. *Maritime Policy & Management*, 47(5), 577-597. DOI: <https://doi.org/10.1080/03088839.2020.1788731>
4. Стовба Т. А. Патерни інноваційного розвитку морських портів. /І Міжнародна науково-практична конференція «Транспорт, порт, логістика, безпека: виклики сучасності та перспективи розвитку». Збірник матеріалів конференції. (Херсон, 28.09.2023). С. 64-73. URL: <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/11/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA-%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%96%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B2-%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%97.pdf>
5. Стовба Т. А. Напрямки посилення конкурентоспроможності морської портової галузі України. /VII Міжнародна науково-практична конференція «Формування механізму зміцнення конкурентних позицій національних економічних систем у глобальному, регіональному та локальному вимірах». Збірник матеріалів конференції. (Тернопіль, 05.11.2021). С. 217—220. URL: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/36011/1/Zbirnyk_konf_2021.pdf#page=217
6. European Commission. (n.d.). EU Emissions Trading System (EU ETS). URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/about-eu-ets_en (дата звернення 06.03.2026)
7. Integr8 Fuels. (2025). Bunker quality trends. URL: <https://integr8fuels.com/fuel-quality-trends-q1-2025/> (дата звернення 07.03.2026)
8. Jayabal, R. (2024). Towards a carbon-free society: innovations in green energy for a sustainable future. *Results in Engineering*, 24, 103121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103121>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ БУДІВЛІ НА СТІЙКІСТЬ ДО ДІЇ УДАРНОЇ ХВИЛІ

¹Кляцька О.О., ¹Цімовська А.О., ²Мельник О. М.

¹Одеський ліцей №117 Одеської міської ради
(Україна)

²Одеський національний морський університет
(Україна)

Забезпечення стійкості будівель до дії вибухових навантажень, що виникають під час техногенних аварій, вибухів або воєнних дій, є важливим завданням інженерної фізики та будівництва. Ударна хвиля, що характеризується різким підвищенням тиску, здатна спричинити значні руйнування. Істотний вплив на ступінь пошкодження має геометрична форма будівлі, оскільки різні конфігурації по-різному взаємодіють з ударною хвилею (відбивають, обтікають або створюють зони підвищеного тиску).

Дослідження цієї взаємодії є актуальним для підвищення безпеки сучасної інфраструктури, зокрема при проектуванні будівель та укриттів. Подібні фізичні процеси важливі й для інших галузей, як-от проектування морських споруд, де форма корпусу мінімізує вплив хвиль.

Метою роботи є дослідити вплив геометричної форми будівель на їхню стійкість до дії ударної хвилі та визначити форми конструкцій, що зменшують руйнівний вплив надлишкового тиску, зокрема для споруд у портових зонах і об'єктів інфраструктури судноплавства.

Для цього поставлено завдання проаналізувати природу ударної хвилі та її параметри, дослідити механізми взаємодії з перешкодами, розглянути класифікацію руйнувань залежно від тиску, проаналізувати вплив форми на розподіл тиску та зробити висновки щодо найбільш стійких форм.

Об'єктом дослідження є процес взаємодії ударної хвилі з будівлями, а предметом – вплив геометричної форми на рівень навантаження та ступінь руйнування.

Ударна хвиля – це збурення середовища, що поширюється зі швидкістю, вищою за швидкість звуку, і характеризується різким зростанням тиску, температури та густини. Ключовим параметром руйнівної дії є надлишковий тиск, який викликає пошкодження від незначних руйнувань до повного знищення споруди. Під час взаємодії з перешкодою відбуваються такі явища, як відбивання (збільшення тиску), дифракція (огинання) та обтікання (зменшення локального навантаження). [4] Ці процеси подібні до тих, що вивчаються в гідродинаміці, де обтічна форма корпусу судна зменшує опір води. Форма будівлі суттєво впливає на розподіл тиску. [3] Прямокутні споруди з плоскими поверхнями сильно відбивають хвилю, збільшуючи навантаження. Натомість заокруглені або обтічні форми дозволяють частині хвилі огинати поверхню, знижуючи концентрацію тиску. Відповідно, округлі або циліндричні конструкції демонструють кращі аеродинамічні властивості. [1] Важливі також кут падіння хвилі, наявність виступів та взаємне розташування будівель.

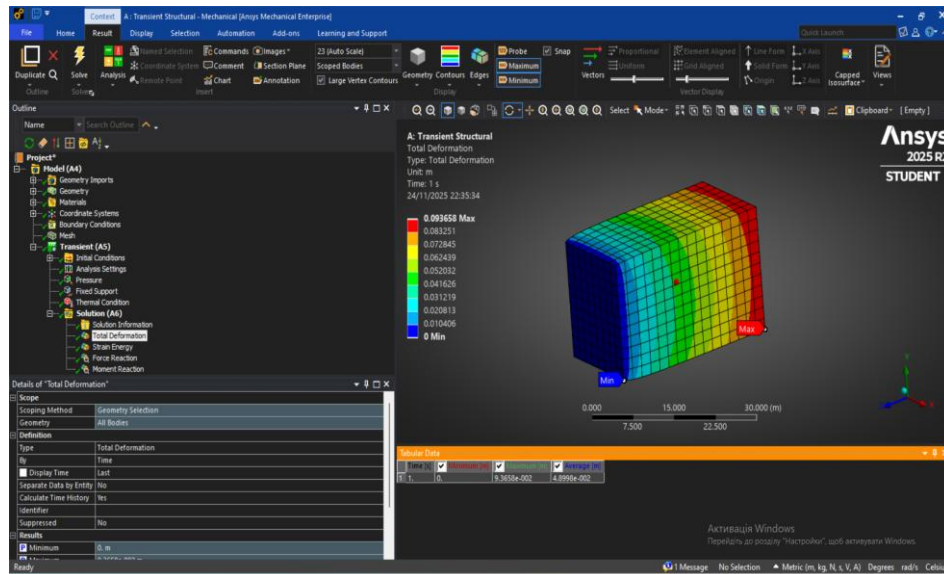


Рисунок 1 – Розподіл повних деформацій прямокутної будівлі під дією ударної хвилі

На моделі видно, що максимальна повна деформація – 93,66 мм (червона зона) – локалізується у верхній частині фронтальної стіни та на кутах даху, де коефіцієнт відбиття досягає 6–8. Характерний «вигин» передньої стіни всередину та підйом даху свідчать про сильний імпульсний тиск і значну підйомну силу на покрівлі.

Перевищення деформацій у 90 мм при товщині стін 300 мм означає високий ризик руйнування залізобетону (тріщино-утворення, відшарування арматури).

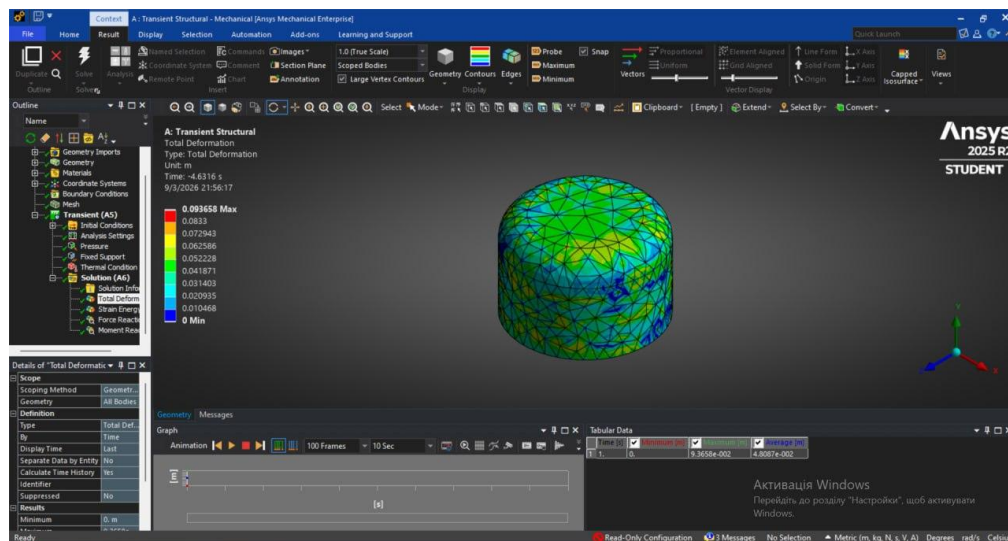


Рисунок 2 – Розподіл повних деформацій купольної (півсферичної) будівлі під дією ударної хвилі

На симуляції чітко видно, що максимальна деформація становить лише 93,66 мм (червона зона) – розташована у верхній частині купола (зона першого контакту з ударною хвилею). Деформація розподілена значно рівномірніше, ніж у прямокутній будівлі: немає різких піків у кутах і на ребрах. Зона мінімальних деформацій (синя) займає більшу частину тильної півсфери та нижньої циліндричної вставки. Загальний характер деформації - плавне стиснення купола без вираженого вигину стін і підйому покрівлі.

Результати доводять, що правильний вибір форми будівлі може значно знизити руйнівний вплив. Застосування обтічних конструкцій зменшує відбиття й максимальний тиск. Принципи обтікання, вивчені тут, мають аналогії в суднобудуванні. Отримані

результати можуть бути використані для проектування захисних споруд, у містобудуванні та при розробці інженерних рекомендацій щодо стійкості.

У підсумку, форма будівлі є критичним фактором стійкості до ударної хвилі. Будівлі з плоскими поверхнями зазнають більшого навантаження через сильне відбиття, тоді як обтічні або округлі форми сприяють обтіканню та зменшенню тиску. Врахування геометричної форми споруди під час проектування підвищує її стійкість до вибухових навантажень.

ЛІТЕРАТУРА

6. Ansys Student – офіційна сторінка для завантаження та інструкцій. URL : <https://www.ansys.com/academic/students> (дата звернення: 15.09.2025).

7. STANAG 2280 NATO Design Criteria for Protection against Blast Effects . NATO Standardization Office, 2022. URL : <https://standards.globalspec.com/std/10027531/stanag-2280> (дата звернення: 15.08.2025).

8. Ковальчук Р. П. Вплив геометрії будівлі на коефіцієнт відбиття ударної хвилі. Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Будівництво та архітектура. 2023. № 45. С. 112–118.

9. Пістун І. П., Кравчук О. М. Фізика вибуху та ударних хвиль: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2019. 200 с.

INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR EARLY DETECTION OF VESSEL CONFLICT SITUATIONS IN PORT WATERS

Dolia K., Kobrina N.

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»
(Ukraine)

Introduction. Modern port waters operate under conditions of continuously increasing traffic intensity, more complex logistics chains, and stricter safety requirements for navigation. Within a constrained water area, approach, berthing, towing, and cargo operations are performed simultaneously, resulting in high traffic density and an elevated probability of conflict situations. Additional risk factors include variable hydrometeorological conditions, heterogeneity in fleet technical status, human factors, and fragmentation of information available to dispatch services. Under such conditions, traditional “after-the-fact” response becomes insufficient, as critical scenarios may develop faster than an operator can complete full situational analysis.

The relevance of this research is determined by the need to transition toward proactive vessel traffic management based on intelligent analytics. The key idea is to integrate AIS, radar observations, meteorological information, and port operational regulations into a unified information environment, where risk is assessed not only from the current state but also from a short-term forecast of situation evolution. This approach enables early detection of pre-conflict states, substantiation of alternative dispatch actions, and reduction of VTS operator workload in real-time decision making.

Main Body. Literature review on the research topic. An analysis of 24 recent publications shows that research on intelligent decision support in navigation develops along six interrelated directions: trajectory prediction, anomaly detection, collision risk assessment, data fusion, traffic network analytics, and operational decision support for dispatch services.

In trajectory prediction, studies [1], [2], [3], [4], [5] confirm that deep learning models (LSTM, Bi-LSTM, CNN-LSTM, and hybrid architectures) deliver the highest quality of short-term prediction in complex port environments. At the same time, review [4] demonstrates that no universal model exists; performance strongly depends on local traffic structure, AIS preprocessing quality, and inclusion of domain-specific maneuvering features.

Anomaly detection is represented by studies [6], [7], [8], as well as newer investigations of abnormal behavior in port approach areas [9], [10]. The authors consistently show that algorithm sensitivity is substantially affected by telemetry incompleteness and noise; therefore, interpolation, track reconstruction, and adaptive thresholding are practically important.

Collision risk assessment in studies [11], [12], [13], [14], [15] moves from static indicators to dynamic multi-factor criteria. This is especially important for ports, where conflict potential is determined not only by encounter geometry, but also by water-area constraints, weather conditions, priority regulations, and route intersection intensity.

Studies on data fusion and situational awareness enhancement [16], [17], [18], [19], [20] demonstrate advantages of multimodal integration: combining AIS, radar, VHF voice data, and contextual rules significantly reduces uncertainty in ambiguous scenes. Works [19], [20] additionally highlight the potential of graph-based and knowledge-graph approaches for representing interactions among vessels and operational zones.

Applied aspects of operational decision support in ports are reflected in [21], [22], [23], [24], emphasizing the need to combine safety analytics with efficiency indicators (delays, throughput, schedule stability). This forms a key requirement for decision support systems: recommendations must be not only safe but also operationally balanced. Proposed intelligent decision support system. Based on the literature review, a multi-level decision support system for early conflict detection in port waters is proposed. It includes the following modules: *Data integration and cleaning*: synchronization of AIS, radar, meteorological, VHF, and regulatory data; *Trajectory prediction*: an ensemble of Bi-LSTM/CNN-LSTM models with adaptation to

vessel type and zone; *Conflict analytics*: computation of pairwise and zonal risk indicators; *Recommendation module*: generation of actions (speed adjustment, temporal separation, priority correction, temporary counter-traffic restrictions); *Explainability and audit*: explanation of alert causes, logging of operator decisions, and model updating.

The integral conflict index is proposed as (1):

$$R_k(t) = \beta_1 DCPA_k(t) + \beta_2 TCPA_k(t) + \beta_3 I_k(t) + \beta_4 W_k(t) + \beta_5 H_k(t), \quad (1)$$

where I_k is trajectory intersection intensity in zone k , W_k is weather impact, H_k represents navigation-space constraints (fairway narrowness, berth proximity, local rules), and β_i are weighting coefficients. If $R_k(t) > \tau_1$, a warning is generated; if $R_k(t) > \tau_2$, the system outputs a prioritized dispatch recommendation with estimated safety effect and operational cost. Critical analysis of the proposed solution. *Strengths*: early conflict detection enabled by predictive rather than purely reactive logic; robustness to incomplete data through multimodal fusion; operator support via explainable recommendations; balance between safety and operational performance.

Limitations: requirement for high-quality temporal synchronization across channels; dependence on local calibration of β_i , τ_1 , and τ_2 ; risk of model drift under traffic-structure changes; vulnerability to cybersecurity threats and AIS spoofing.

Implementation risks: organizational (misalignment of VTS and operator procedures), technical (data-format incompatibility), and human-factor risks (resistance to algorithm-supported decisions). To mitigate these risks, phased deployment is recommended: *shadow mode* → advisory mode → partially automated support.

Scientific novelty and practical significance: the proposed system integrates predictive analytics, zonal risk assessment, and dispatch-action optimization within a unified control loop, enabling reduction of dangerous close encounters and maneuvering delays in port waters. Formalization of decision-making in the support system. For practical VTScenter application, decision support should be represented as a sequence of water-area state assessment cycles with discretization step $\Delta t = 30 \dots 60$ s. At each step, the system forms a set of controlled targets $V(t)$ (vessels in the control zone), a set of potentially conflicting pairs $P(t)$, and a set of managed zones $Z(t)$. For each pair $(i, j) \in P(t)$, local encounter indicators are computed; for each zone $k \in Z(t)$, aggregated indicators of traffic intensity, maneuver-space load, and weather constraints are evaluated.

The integral risk score should be complemented by nonlinear feature normalization, as the influence of individual factors grows non-uniformly near critical values. For zone k , the following generalized form may be applied (2):

$$\widetilde{R}_k(t) = \sum_{q=1}^Q \beta_q \phi_q(f_q(t)), \quad (2)$$

where $f_q(t)$ are raw risk features, $\phi_q(\cdot)$ are sensitivity-normalization functions (linear, sigmoid, or piecewise-linear), and β_q are adaptive weights. This representation enables explicit encoding of expert port rules, e.g., sharp penalty increase when approaching narrow fairways or when visibility drops below regulatory limits.

Selection of control actions is proposed through ranking candidate scenarios $a_m \in A$ by a multi-criteria utility function (3):

$$U(a_m) = \lambda_1 S(a_m) - \lambda_2 C(a_m) - \lambda_3 D(a_m) + \lambda_4 E(a_m), \quad (3)$$

where S is expected risk reduction, C is operational intervention cost, D is impact on vessel delays, E is compliance with local rules and COLREGs, and λ_i are policy priorities of the port authority. The system output is not a single command but an ordered list of alternatives with justification.

The proposed algorithm includes six stages: (1) preprocessing of AIS/radar streams (gap handling, deduplication, temporal alignment); (2) tracking and short-term trajectory forecasting with ensemble weighting; (3) detection of conflict patterns (dangerous approach, course crossing, local congestion); (4) computation of zonal and pairwise risk; (5) generation and ranking of dispatch alternatives; (6) logging of actual operator decisions and post-audit of

outcomes.

To reduce false alarms, a two-level event confirmation logic is recommended: the primary trigger is generated by quantitative indicators, while the secondary trigger is activated after contextual verification (vessel type, maneuver phase, regulatory time windows, tug assistance status). In port waters, this contextual layer is critical because similar kinematic trajectories may have different admissibility depending on operational context.

A dedicated source-reliability module is also included. For each data channel s , reliability coefficient $\rho_s(t) \in [0,1]$ is introduced, based on message stability, cross-channel consistency, and historical error profile. When channel degradation is detected, its contribution to prediction and risk estimation is automatically reduced, and the system switches to a conservative mode with stricter threshold logic τ_1, τ_2 .

For objective evaluation, a combined validation framework is recommended: offline testing on historical AIS datasets, seminatural scenario experiments, and pilot deployment in shadow mode. Offline testing assesses trajectory prediction accuracy, conflict-classification quality, and robustness to missing data. Pilot deployment captures operational metrics directly relevant to port administration.

The recommended key performance indicators include: (i) share of potential conflicts detected before entry into critical zones; (ii) false-positive alert rate; (iii) mean warning lead time; (iv) change in the number of dangerous close encounters; (v) impact on average maneuvering delay; (vi) acceptance rate of recommendations by VTS operators. Joint analysis of these metrics prevents bias where nominal risk reduction is achieved at the expense of excessive traffic restrictions and reduced throughput.

When interpreting results, it is necessary to account for traffic seasonality, vessel-type diversity, and heterogeneity of water-area segments. Therefore, stratified effectiveness assessment is appropriate: separately for approach channels, inner harbor zones, and berthing areas; separately for peak and off-peak periods; separately for normal and adverse weather conditions. Such decomposition provides transparent understanding of where the support system generates the highest practical value.

From an organizational perspective, it is advisable to establish a “digital trust loop”: model-update regulations, new-version verification procedures, deviation logs, and incident review protocols. The support system should not be treated as a replacement for dispatchers, but as an instrument that augments operator judgment. Accordingly, the interface should provide concise explanations: which factors triggered the alert, which alternatives were evaluated, and what effect is expected from each option.

At the technical level, phased scaling is recommended: first, one pilot zone with highest conflict intensity; then extension to adjacent sectors after performance stabilization. For cyberresilience, mechanisms for communication-channel anomaly detection, data-integrity control, and graceful service degradation should be implemented without compromising safety. Under uncertainty, the system should switch to a “safe mode” with a minimal set of conservative rules.

Thus, the extended support-system architecture combines mathematically formalized risk assessment, context-aware situation analysis, and practically oriented operator assistance. This provides a foundation for controlled reduction of accident risk in port waters without critical deterioration of operational efficiency.

Conclusions. The review of 24 sources confirms that the most promising approach to decision support in port navigation is the integration of trajectory prediction, multimodal data fusion, and dynamic risk assessment. The proposed multi-level intelligent system provides early identification of pre-conflict states and generation of justified, prioritized recommendations for VTS operators. Critical analysis demonstrates that practical effectiveness depends on data quality, local calibration of model parameters, and a controlled deployment strategy. Further research should focus on digital-twin integration, real-time adaptive model tuning, and validation

using real port operational scenarios.

REFERENCES

1. Millefiori, L. M., Braca, P., Bryan, K., & Willett, P. (2023). AIS data-driven ship trajectory prediction modelling and analysis based on machine learning and deep learning methods. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 179, 103152. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103152>
2. Kim, S., Park, H., & Choi, J. (2024). Vessel trajectory prediction at inner harbor based on deep learning using AIS data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(10), 1739. <https://doi.org/10.3390/jmse12101739>
3. Capobianco, S., Greco, A., & D'Errico, A. (2021). Ship trajectory prediction based on Bi-LSTM using spectral-clustered AIS data. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(9), 1037. <https://doi.org/10.3390/jmse9091037>
4. Zhou, Y., Zhang, L., & He, J. (2023). Ship trajectory prediction based on machine learning and deep learning: A systematic review and methods analysis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 107062. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107062>
5. Xie, H., Zhang, Q., & Li, P. (2024). Artificial intelligence in ship trajectory prediction: A review and future trends. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(5), 769. <https://doi.org/10.3390/jmse12050769>
6. Wang, Y., Li, X., & Zhao, H. (2023). AIS-based maritime anomaly traffic detection: A review. *Expert Systems with Applications*, 232, 120561. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120561>
7. Arguedas, V., Morales, A., & Sánchez, J. (2021). An anomaly detection method for AIS trajectory based on kinematic interpolation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(6), 609. <https://doi.org/10.3390/jmse9060609>
8. Chen, H., Wu, S., & Gao, Y. (2024). A framework for ship abnormal behaviour detection and classification using AIS data. *Reliability Engineering & System Safety*, 246, 110105. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110105>
9. Wang, J., Sun, T., & Li, B. (2026). Vessel trajectory anomaly detection based on multiscale convolutional autoencoder. *Ocean Engineering*, 318, 123564. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.123564>
10. Li, Z., Huang, M., & Cao, R. (2026). Ship abnormal behaviour detection based on AIS data at the approach to ports. *Reliability Engineering & System Safety*, 258, 111712. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111712>
11. Huang, C., Lin, K., & Tsai, M. (2022). Ship collision avoidance behaviour recognition and analysis based on AIS data. *Ocean Engineering*, 243, 110479. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110479>
12. Zhang, R., Zhou, J., & Liu, Y. (2023). New frontiers in the risk assessment of ship collision. *Ocean Engineering*, 284, 113999. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113999>
13. Chen, X., Luo, Y., & Wang, P. (2024). Dynamic calculation approach of the collision risk in complex navigable water. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9), 1605. <https://doi.org/10.3390/jmse12091605>
14. Liang, T., Wu, Z., & Ren, Y. (2023). A framework of marine collision risk identification strategy using AIS data. *The Journal of Navigation*, 76(6), 1362–1383. <https://doi.org/10.1017/S0373463323000452>
15. Pereira, M., Costa, R., & Alves, J. (2025). A multi-dimensional formulation for assessing regional collision risk based on AIS data. *Applied Ocean Research*, 153, 104612. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104612>
16. Liu, Q., Zhang, P., & Chen, Y. (2024). Intelligent monitoring of marine vessel dynamics based on data mining. *Ocean Engineering*, 304, 119387. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119387>

17. Rivera, P., Martín, A., & Gómez, D. (2023). A CNN-LSTM architecture for marine vessel track association using AIS data. *Sensors*, 23(14), 6400. <https://doi.org/10.3390/s23146400>
18. Fu, X., Li, D., & Wang, N. (2024). Unsupervised knowledge discovery framework: From AIS data processing to maritime traffic networks generating. *Applied Ocean Research*, 144, 103924. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103924>
19. Chen, Y., Li, J., & Xu, R. (2024). MATNEC: AIS data-driven environment-adaptive maritime traffic network construction for realistic route generation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 168, 104853. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104853>
20. Zhang, X., Liu, H., & Shen, Y. (2024). Maritime traffic knowledge discovery via knowledge graph theory. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(12), 2333. <https://doi.org/10.3390/jmse12122333>
21. Pallotta, G., Vespe, M., & Bryan, K. (2020). An expert-based method for the risk assessment of anomalous maritime transportation data. *Applied Ocean Research*, 101, 102337. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102337>
22. Gao, S., Xu, M., & Liu, H. (2020). AIS data driven general vessel destination prediction: A random forest based approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 118, 102729. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102729>
23. Gonçalves, R., Ferreira, J., & Correia, N. (2013). Use of AIS data to characterise marine traffic patterns and ship collision risk off the coast of Portugal. *The Journal of Navigation*, 66(6), 879–898. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000519>
24. Sang, H., Park, D., & Lee, J. (2025). Port performance indicators construction based on the AIS-generated trajectory segmentation and classification. *International Journal of Data Science and Analytics*, 19, 155–173. <https://doi.org/10.1007/s41060-024-00614-w>

INTEGRATED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR SAFE NAVIGATION AND ENERGY-EFFICIENT MANAGEMENT OF VESSEL OPERATIONS IN PORT WATER AREAS

Dolia K., Hryhorovych A.

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»
(Ukraine)

Introduction. The increasing intensity of maritime traffic in port water areas, the growing complexity of vessel interactions, and stricter environmental requirements create new challenges for safe and economically efficient navigation management. Traditional approaches, which rely primarily on dispatcher expertise, are no longer sufficiently responsive under high traffic density, rapidly changing hydrometeorological conditions, and dynamically shifting operational priorities in ports. At the same time, modern digital data streams, primarily AIS, provide a solid basis for proactive risk-aware traffic management.

Recent studies demonstrate substantial progress in trajectory prediction, anomaly detection, collision risk assessment, and maritime traffic network construction using machine learning and deep learning methods. In parallel, energy-oriented approaches such as weather-routing optimization and Just-In-Time (JIT) port–ship coordination show practical potential for reducing fuel consumption, waiting time, and emissions. However, in most real-world implementations these solutions remain isolated analytical modules, which limits their operational value for integrated decision-making in congested port environments.

Therefore, an important scientific and applied task is to develop an integrated decision support system (DSS) that combines safety analytics (trajectory forecasting, early anomaly detection, and risk assessment) with energy-efficient optimization of vessel operations in port approaches and inner water areas. Such a system should produce timely, explainable, and operationally feasible recommendations for masters, VTS operators, and port dispatchers, while simultaneously improving navigational safety, throughput, and environmental performance.

Main Body. Extended literature review and problem statement. Contemporary AIS-based trajectory prediction research shows that short-term forecasting quality depends on three key factors: spatiotemporal feature representation, track-cleaning/segmentation strategy, and the ability of the selected model to incorporate local navigational context [1-4]. For port water areas, where course and speed variability is higher than in open sea, localized forecasting methods for inner harbors and constrained channels are particularly relevant [3], [18].

A separate body of work addresses anomalous vessel behavior detection, including surveybased frameworks, statistical deviation criteria, unsupervised approaches, and hybrid expertdata procedures [7-13]. A key practical conclusion is that anomaly is context-dependent: the same maneuver can be acceptable in one port and risk-critical in another because of differences in hydrography, traffic configuration, and operational regulations [7], [12]. Consequently, universal thresholds without local calibration often lead to false alarms and missed detections.

Collision-risk studies develop both classical encounter indicators and dynamic multi-factor metrics that account for relative motion, traffic density, and scenario uncertainty [14–16], [17], [19], [25]. Combined with trajectory forecasting, these methods enable a transition from reactive incident analysis to proactive prevention of hazardous situations. This transition is essential for port traffic control, where the safe intervention window is often limited to minutes.

Another important direction is network-based representation of maritime traffic and knowledge extraction from large AIS datasets [20–22]. Graph models of routes, concentration nodes, and conflict-prone areas allow risk analysis not only at the single-vessel level but also at the level of systemic vulnerability of the entire water area [23–24]. Port KPI studies further show that inefficient sequencing of arrivals and berthing operations directly reduces berth productivity,

increases costs, and prolongs non-productive waiting time [23].

The energy-efficiency dimension is represented by weather-routing and JIT coordination studies, which justify aligning vessel speed profiles with expected service windows [24–28]. Overall, the literature indicates that individual analytical components are already mature, yet they are rarely integrated into a unified operational decision framework. This gap between advanced analytics and real dispatch practice constitutes the core scientific and applied problem.

Concept of the integrated decision support system. The proposed DSS is designed as a multi-level service architecture in which each module has clearly defined functions and data interfaces:

- *Data layer*: acquisition, synchronization, and validation of AIS, VHF, weather data, bathymetric constraints, vessel registries, regulatory rules, and operational port notices.
- *Analytical layer*: trajectory prediction, behavioral pattern classification, anomaly detection, collision/grounding risk assessment, and local traffic conflict estimation.
- *Optimization layer*: generation of maneuver alternatives and speed profiles under joint safety, energy-efficiency, and time-window constraints.
- *Operator interaction layer*: explainable recommendations, “what-if” scenario analysis, prioritized alerts, and decision logbook support.

This architecture enables practical integration of methods reported in [1]–[28] into a unified dispatch loop and ensures traceability of decisions for subsequent audit and continuous improvement.

Formalization of the decision-making model. The vessel state at time step t is represented by (1):

$$\mathbf{x}t = [\varphi t, \lambda t, vt, \psi t, \dot{\psi} t, dt, wt, ct], \quad (1)$$

where φ, λ are coordinates, v is speed, ψ is course, $\dot{\psi}$ is turn rate, d is under-keel clearance margin, w is an integrated weather factor, and c is a fairway load indicator.

The forecasting module produces trajectory horizon $\hat{\tau}_{t:t+H}$. Based on it, anomaly intensity is computed as (2):

$$A_t = \alpha_1 \Delta_{\text{track}} + \alpha_2 \Delta_{\text{speed}} + \alpha_3 \Delta_{\text{turn}}, \quad \sum_i \alpha_i = 1, \quad (2)$$

where the components describe deviations in spatial position, speed regime, and maneuver dynamics from the expected navigation corridor. The integrated risk score is defined as (3):

$$R_t = \beta_1 P_{\text{collision}} + \beta_2 A_t + \beta_3 P_{\text{grounding}} + \beta_4 C_{\text{traffic}}, \quad \sum_j \beta_j = 1. \quad (3)$$

Here, $P_{\text{collision}}$ is collision probability, $P_{\text{grounding}}$ is grounding probability, and C_{traffic} is local traffic conflict intensity. The energy-efficient control loop minimizes (4):

$$J = \gamma_1 F + \gamma_2 T_{\text{delay}} + \gamma_3 E_{\text{emission}} + \gamma_4 R_t, \quad (4)$$

where F is fuel consumption, T_{delay} is delay relative to the agreed berthing window, and E_{emission} is emission-related penalty. Including R_t directly in J enforces a safety-aware optimization regime instead of a fuel-only policy.

Real-time DSS operation algorithm. The system operates in a cyclic manner:

1. Multi-source data preprocessing and synchronization.
2. Current-state estimation for water area and vessels.
3. Horizon- H trajectory forecasting and risk computation.
4. Anomaly detection and generation of admissible control actions.
5. Multi-criteria optimization using objective J .
6. Delivery of ranked scenarios with explanation to the operator.
7. Online model update using realized maneuver outcomes.

The key advantage of this cycle is continuous feedback, which supports adaptation to rapidly changing weather and traffic conditions without loss of control consistency.

Practical application scenario in a port water area. Consider a typical case where several vessels of different deadweight classes approach a port through a constrained entrance channel. Under conventional operations, masters reduce speed conservatively and form an approach queue,

which increases waiting time, maneuvering fuel costs, and the probability of trajectory conflicts.

In the proposed DSS, the forecasting module proactively identifies conflict points and safe time windows. The optimization module then computes coordinated speed profiles for each vessel while accounting for berth availability, current traffic load, and weather conditions. The operator receives not a single directive but a ranked set of alternatives with explicit safety-efficiency trade-offs. If weather deteriorates or queue structure changes, recommendations are automatically re-optimized using updated state information.

Expected operational effects include fewer hazardous encounters, reduced approach waiting time, smoother load distribution in narrow channel segments, lower fuel consumption and emissions, and improved port performance indicators. An additional management benefit is transparent decision auditability and accumulation of case knowledge for future regulation tuning.

Scientific novelty and limitations. The scientific novelty of the proposed approach lies in joint optimization of safety and energy criteria within a single objective function, as well as in combining predictive, diagnostic, and optimization analytics in one closed decision loop. Unlike isolated modules, the DSS functions as a coherent architecture where risk assessment directly affects the selection of energy-efficient trajectory control actions.

At the same time, limitations remain: performance depends on AIS/VHF data completeness, weather forecast quality, and the adequacy of local calibration of weighting coefficients α_i , β_j , and γ_k . Future work should focus on online adaptive weight identification, digital twin integration for port water areas, and formal explainability standards for regulatory compliance.

Section summary. The analysis confirms that the current scientific field already provides robust tools for trajectory forecasting, anomaly detection, risk assessment, and energy-efficient control [1–28]. However, only their integration into a unified DSS can deliver a substantial practical effect in port water areas: improved navigational safety, lower operational costs, and better environmental outcomes. The proposed architecture can serve as a methodological basis for pilot implementation in VTS centers and port dispatch management systems.

Model parameterization. For practical deployment, a hierarchical parameterization scheme is recommended with three parameter groups: (I) anomaly parameters α_i , (II) risk parameters β_j , and (III) optimization parameters γ_k . The basic normalization constraints are (5):

$$\sum_i \alpha_i = 1, \quad \sum_j \beta_j = 1, \quad \sum_k \gamma_k = 1, \quad (5)$$

with $\alpha_i, \beta_j, \gamma_k \in [0, 1]$. During initial setup for high-density ports, it is advisable to increase safety-loop weights ($\beta_1, \beta_2, \beta_3, \gamma_4$), while for stable water areas with strict service windows, larger shares of operational-energy criteria ($\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$) are appropriate.

A two-stage calibration strategy is recommended: (1) *offline* identification on historical AIS/VHF data with safety and productivity target metrics; (2) *online* adaptation based on forecast error, actual vessel handling time, and deviation from planned KPIs. This parameterization ensures model transferability across ports and adaptability to seasonal and intraday traffic variability.

Thus, the proposed DSS together with the presented parameterization framework provides a complete methodological basis for pilot implementation in VTS centers and port dispatch services, with further scaling toward an integrated digital twin of the port water area.

Conclusions. This study develops and structures an integrated decision support system for port water areas that combines trajectory forecasting, anomalous behavior detection, navigational risk assessment, and multi-criteria energy-efficient optimization. In contrast to isolated solutions, the proposed DSS operates as a single control loop where prediction outcomes directly influence risk estimation, and risk estimation directly influences the choice of optimal speed profile and arrival maneuver strategy.

The literature synthesis [1–28] confirms that mature methods are available for each component (AIS forecasting, anomaly detection, collision-risk assessment, JIT coordination,

weather routing), yet their fragmented implementation cannot produce a system-level effect in operational port management. The proposed architecture addresses this gap and enables a transition from reactive dispatch control to proactive scenario-based management focused simultaneously on safety, operational efficiency, and environmental performance.

The practical value of the results lies in generating explainable recommendations for operators: segment-wise speed advisories, optimized maneuver initiation timing, narrow-passage priority management, and contingency scenarios for weather deterioration or sudden traffic escalation. Expected deployment effects include reduced frequency of hazardous encounters, shorter approach waiting time, lower fuel consumption and emissions, increased water-area throughput, and stabilized port KPI performance.

REFERENCES

25. Li, H., Jiao, H., & Yang, Z. (2023). AIS data-driven ship trajectory prediction. *Ocean Engineering*, 281, 114136. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114136>
26. Wang, Y., Li, X., & Zhao, H. (2023). AIS-based maritime anomaly traffic detection: A review. *Expert Systems with Applications*, 223, 120561. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120561>
27. Liu, Q., Zhang, P., & Chen, Y. (2024). Intelligent monitoring of marine vessel dynamics. *Ocean Engineering*, 297, 119387. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119387>
28. Wang, J., Sun, T., & Li, B. (2026). Vessel trajectory anomaly detection. *Ocean Engineering*, 315, 120114. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120114>
29. Li, Z., Huang, M., & Cao, R. (2026). Ship abnormal behaviour detection at port approaches. *Reliability Engineering & System Safety*, 264, 111712. <https://doi.org/10.1016/j.res.2025.111712>
30. Chen, H., Wu, S., & Gao, Y. (2024). Framework for ship abnormal behaviour detection. *Reliability Engineering & System Safety*, 245, 110105. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110105>
31. Huang, C., Lin, K., & Tsai, M. (2022). Ship collision avoidance behaviour recognition. *Ocean Engineering*, 244, 110479. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110479>
32. Zhang, R., Zhou, J., & Liu, Y. (2023). New frontiers in risk assessment of ship collision. *Ocean Engineering*, 273, 113999. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.113999>
33. Pallotta, G., Vespe, M., & Bryan, K. (2020). Expert-based risk assessment of anomalous maritime data. *Applied Ocean Research*, 104, 102337. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102337>
34. Fu, X., Li, D., & Wang, N. (2024). Unsupervised knowledge discovery from AIS to maritime networks. *Applied Ocean Research*, 142, 103924. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103924>
35. Xie, H., Luo, J., & Peng, Z. (2024). AIS + VHF data fusion for maritime surveillance. *Ocean Engineering*, 310, 118953. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118953>
36. Zhao, L., Peng, X., & Guo, S. (2024). Bi-directional PSO-LSTM navigational risk assessment. *Ocean Engineering*, 308, 118628. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118628>
37. Gao, S., Xu, M., & Liu, H. (2020). RF-based vessel destination prediction. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 118, 102717. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102717>
38. Zhou, Y., Zhang, L., & He, J. (2023). Systematic review of ship trajectory prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126, 107062. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107062>
39. Gonçalves, R., Ferreira, J., & Correia, N. (2013). AIS for traffic patterns and collision risk. *The Journal of Navigation*, 66(3), 451–467. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000519>
40. Liang, T., Wu, Z., & Ren, Y. (2023). Collision risk identification framework using

AIS. The Journal of Navigation, 76, 231. <https://doi.org/10.1017/S0373463323000231>

41. Sang, H., Park, D., & Lee, J. (2025). Port KPIs from AIS trajectory segmentation. International Journal of Data Science and Analytics, 18, 102. <https://doi.org/10.1007/s41060-024-00614-w>

42. Kim, S., Park, H., & Choi, J. (2024). Inner harbor trajectory prediction using deep learning. Journal of Marine Science and Engineering, 12(10), 1739. <https://doi.org/10.3390/jmse12101739>

43. Chen, X., Luo, Y., & Wang, P. (2024). Dynamic collision risk calculation in complex waters. Journal of Marine Science and Engineering, 12(9), 1605. <https://doi.org/10.3390/jmse12091605>

44. Arguedas, V., Morales, A., & Sánchez, J. (2021). AIS anomaly detection via kinematic interpolation. Journal of Marine Science and Engineering, 9(6), 609. <https://doi.org/10.3390/jmse9060609>

45. Rivera, P., Martín, A., & Gómez, D. (2023). CNN-LSTM for vessel track association. Sensors, 23(14), 6400. <https://doi.org/10.3390/s23146400>

46. Capobianco, S., Greco, A., & D'Errico, A. (2021). Bi-LSTM trajectory prediction with spectral clustering. Journal of Marine Science and Engineering, 9(9), 1037. <https://doi.org/10.3390/jmse9091037>

47. Chen, Y., Li, J., & Xu, R. (2024). MATNEC maritime traffic network construction. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 163, 104853. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2024.104853>

48. Zhang, X., Liu, H., & Shen, Y. (2024). Maritime traffic knowledge discovery via KG. Journal of Marine Science and Engineering, 12(12), 2333. <https://doi.org/10.3390/jmse12122333>

49. Pereira, M., Costa, R., & Alves, J. (2025). Multi-dimensional regional collision risk formulation. Applied Ocean Research, 145, 104612. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104612>

50. Du, Y., Meng, Q., & Wang, S. (2022). Energy saving method for ship weather routing optimization. Ocean Engineering, 246, 110479. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110479>

51. Zis, T. P., Psaraftis, H. N., & Panagakos, G. (2023). Efficient ship weather routing using probabilistic roadmaps. Ocean Engineering, 281, 114624. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114624>

52. Lind, M., Ward, R., & Bergmann, M. (2026). AI-driven Just-In-Time coordination between port and ships. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 185, 103000. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.103000>

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

B

Bondar A. V., 183

C

Chibirdin I. O., 168

D

Dolia K., 65, 264, 269

Dolia O., 65, 105

Dolia E., 105

Drozhzhyn O., 62

H

Hryhorovych A., 269

I

Iakymenkov D., 158

K

Kobrina N., 264

Koskina Y., 62

Kucherenko V.Y., 42

M

Malaksiano M., 9, 158, 172

N

Nikitin P.V., 74

Nosov A., 172

Nosov P., 173, 188

R

Romanuke V. 9, 193

Romanov A., 9, 218

S

Sagaydak O.I., 74

Strelbitskyi V.V., 27

T

Ternovsky V. B., 199

Ternovsky Y. V., 199

Tkachenko M. H., 168

K. Tovstokoryy, 87

V

Voloshyn A.O., 42

Z

Zinchenko S., 87

А

Алексейчук Б.М., 47

Б

Байрамова О.В., 235

Бугасва І. Г., 148

В

Ватренко А. С., 186

Вишневський Д.О., 70

Вишневська О.Д., 70

Вільшанюк М.С., 77, 257

Войнович М.В., 23

Волохов О.О., 77

Г

Григорчук К. С., 252

Гула І.В., 101

Д

Даус Ю.В., 238

Дехта В. Ю., 136

Дімова С.М., 23

Добровольська Л. О., 110

Довгошеєнко А. І., 58

З

Загребельний Є. О., 130

Зінченко С. М., 92

К

Камишин В.В., 204

Клепцов А.А., 142

Кісетов Ю. В., 19

Кириченко К. В., 204

Кляцька О.О., 261

Козицький С. В., 52

Коновалов С.М., 133, 152

Коновалова Г.В., 15

Кононова О.М., 176

Корнієвич С. Г., 52

Корякін К. С., 110

Кравцов Д.Є., 144, 146

Кунгурцев О.Б., 97

Л

Ларін Д.Г., 115

Личко Б. М., 19

М

Малаксіано М.О., 122

Мащенко П. П., 204

Манжулова Ю.С., 118

Маринова Ю. О., 148

Мельник О. М., 58, 261

Н

Нікітюк П. В., 136

Новікова Н.О., 118

О

Оберто Сантана Л.Е., 242

П

Панков М.Р., 152

Панченко Т. Д., 125

Пашенко О.Л., 247

Перстньов Д.І., 122

Пізінцалі Л.В., 23

Полетаєв М.І., 144, 146, 252

Полікаровських О.І., 101, 130, 186

Пуляєв І. О., 136

Р

Рева О.М., 204

Розум М.В., 223, 233

Романов А.Ю., 257

Россомаха О. А., 29

Россомаха О.І., 33

Рудніченко М.Д., 208, 212, 215

С

Савчук Н.В., 118

Ситник Т.Г., 233

Скрипнікова А., 97

Соценко В.В., 15

Степанюк К.С., 223

Стовба Т.А., 37

Т

Товстокорій К. О., 92

Томчаковський Г. Г., 226

Тузова І. А., 125

Ф

Фаріонова Т.А., 142

Ц

Цімовська А.О., 165, 261

Ч

Чорба Р.В., 97

Ш

Шведов Д.В., 208, 212, 230

Шибасєв Д.С., 215

Шибасєва Н.О., 208, 212, 211

Шишкевич Я.Р., 165

Шумейко К.П., 155

Шумило О.М., 176

Щ

Щедролосєв О.В., 15

Щенявський Г. С., 58

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
FOREWORD	6
СЕКЦІЯ: СУДНОВОДІННЯ, ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА УПРАВЛІННЯ ОПЕРАЦІЯМИ СУДЕН SECTION NAVIGATION, SHIP ENERGY SYSTEMS, AND SHIP OPERATIONS MANAGEMENT	
GENETIC ALGORITHM DEEP PARAMETRIZATION AND FINE-TUNING FOR THE MULTIPLE TRAVELING SALESMAN PROBLEM IN MARITIME CARGO DELIVERY ¹ Romanuke V. V., ² Romanov A. Y., ² Malaksiano M. O. ¹ Vinnitsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics (Ukraine) ² Odesa National Maritime University (Ukraine)	9
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ГІБРИДНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА Щедролосєв О.В., Соценко В.В., Коновалова Г.В. Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова (Україна)	15
ОСОБЛИВОСТІ БУНКЕРУВАННЯ МОРСЬКИХ СУДЕН З ДВИГУНАМИ, ЩО ВИКОРИСТОВУЮТЬ АМІАК ЯК ПАЛИВО Кісетов Ю. В., Личко Б. М. Національний університет кораблебудування (Україна)	19
ЕКОДИЗАЙН ТА ІННОВАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ПІДШИПНИКІВ В СУДНОБУДУВАННІ Пізінцалі Л.В., Войнович М.В., Дімова С.М. Одеський національний морський університет (Україна)	23
RESEARCH ON THE OPERATIONAL RELIABILITY OF A MARINE VESSEL'S PROPELLER SHAFT Strelbitskyi V.V. Odessa National Maritime University(Ukraine)	27
РОТОРНІ СИСТЕМИ ФЛЕТТНЕРА ЯК РІШЕННЯ ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ Россомаха О. А. Одеський національний морський університет (Україна)	29
АНАЛІЗ РИЗИКІВ ПРИ СТОЯНЦІ СУДНА БІЛЯ ПРИЧАЛУ ТА РОЛЬ ШПРИНГІВ У СИСТЕМІ ШВАРТУВАННЯ Россомаха О.І. Одеський національний морський університет (Україна)	33

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПОРТАТИВНИХ АКУМУЛЯТОРНИХ МОДУЛІВ У ГІБРИДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ МОРСЬКИХ СУДЕН Стовба Т.А. Херсонська державна морська академія (Україна)	37
INNOVATIVE SYSTEMS AND METHODS FOR MEASURING THE SHIP'S ACOUSTIC PROFILE Kucherenko V.Y., Voloshyn A.O. Odesa National Maritime University (Ukraine)	42
ВИБІР СКАЛЯРНОГО КРИТЕРІЮ ОЦІНКИ ТОЧНОСТІ ОБСЕРВАЦІЇ ТА МОЖЛИВОСТІ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ Алексейчук Б.М. Одеський національний морський університет (Україна)	47
СЕКЦІЯ: ТЕХНОЛОГІЇ МОРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА БЕЗПЕКА ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ SECTION SHIPPING TECHNOLOGIES AND TRANSPORT SYSTEMS SAFETY	
НАНОКОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ СУЧАСНОГО СУДНОПЛАВСТВА Козицький С. В., Корнієвич С. Г. Національний університет Одеська морська академія (Україна)	52
ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНА МОДЕЛЬ УПРАВЛІННЯ БЕЗПЕКОЮ ОБ'ЄКТІВ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ГІБРИДНИХ ЗАГРОЗ Мельник О. М., Довгошеєнко А. І., Щенявський Г. С. Одеський національний морський університет (Україна)	58
SMART INTERMODAL CONTAINER TRANSPORTATION: IOT APPLICATIONS AND INDUSTRY SOLUTIONS Drozhzhyn O., Koskina Y. Odesa National Maritime University (Ukraine)	62
SAFETY OF TRANSPORT SYSTEMS ¹ Dolia K., ² Dolia O. ¹ National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» (Ukraine) ² Kharkiv National University of Radio Electronics (Ukraine)	65
СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ НА РИНКУ МОРСЬКИХ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ Вишневський Д.О., Вишневська О.Д. Одеський національний морський університет (Україна)	70
NECESSITY OF THE POST-WAR RISK ANALYSIS OF THE WHOLE	

CHAIN SHIP-PORT-CARGO IN THE FORMER «GRAIN CORRIDOR» AREA ¹ Sagaydak O.I., ² Nikitin P.V. ¹ Odessa National Maritime University (Ukraine) ² National Transport University (Ukraine)	74
ОРГАНІЗАЦІЯ КОНТРОЛЮ ЗА КОНТЕЙНЕРНИМ ПАРКОМ: РОЛЬ І ФУНКЦІЇ МОРСЬКОГО АГЕНТА Вільшанюк М.С. Одеський національний морський університет (Україна)	77
ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ХОЛОДНИХ ЛАНЦЮГІВ ПРИ КОНТЕЙНЕРНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РИЗИКІВ Волохов О.О. Одеський національний морський університет (Україна)	81
СЕКЦІЯ: ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ В ГАЛУЗІ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ SECTION INFORMATION TECHNOLOGIES AND AUTOMATION IN THE MARITIME TRANSPORT SECTOR	
SELECTING THE TYPE OF WIND TURBINE FOR A SHIP'S WIND ADDITIONAL PROPULSION SYSTEM Zinchenko S., Tovstokoryy K. Kherson State Maritime Academy (Ukraine)	87
ОПТИМІЗАЦІЯ ТЯГИ ВІТРИЛА ВІТРОВОЇ РУШІЙНОЇ УСТАНОВКИ СУДНА Зінченко С. М., Товстокорий К. О. Херсонська державна морська академія (Україна)	92
РЕАЛІЗАЦІЯ МОДЕЛІ РОЗРОБНИКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ Кунгурцев О.Б., Скрипнікова А., Чорба Р.В. Національний університет Одеська політехніка (Україна)	97
ВИСОКОШВИДКІСНІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ АЛГОРИТМИ ПОРТАТИВНИХ СИСТЕМ ПЕЛЕНГАЦІЇ НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ ¹ Полікаровських О.І., ² Гула І.В. ¹ Одеський національний морський університет (Україна) ² Хмельницький національний університет (Україна)	101
INTEGRATED INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS FOR VESSEL TRAFFIC MONITORING IN PORTWATERS ¹ E. Dolia, ² O. Dolia ¹ V. N. Karazin Kharkiv National University (Ukraine) ² Kharkiv National University of Radio Electronics(Ukraine)	105

КІБЕРСТІЙКІСТЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ В ГАЛУЗІ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ Корякін К. С., Добровольська Л. О. Одеський національний морський університет (Україна)	110
ОСОБЛИВОСТІ УПРАВЛІННЯ ПІДВОДНИМИ АВТОНОМНИМИ ДРОНАМИ Ларін Д.Г. Одеський національний морський університет (Україна)	115
МОДЕЛЮВАННЯ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ СКІНЧЕННИХ АВТОМАТІВ Новікова Н.О., Манжулова Ю.С., Савчук Н.В. Одеський національний морський університет (Україна)	118
ЗАСТОСУВАННЯ ЕВРИСТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РУХУ МОРСЬКИХ СУДЕН Малаксіано М.О., Перстньов Д.І. Одеський Національний Морський Університет (Україна)	122
ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ ПРИ ПІДГОТОВЦІ СПЕЦІАЛІСТІВ МОРСЬКОЇ ГАЛУЗІ: ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ Панченко Т. Д., Тузова І. А. Одеський національний морський університет (Україна)	125
ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖ У СИСТЕМАХ ПРОГРАМНО КЕРОВАНОГО РАДІО Загребельний Є. О., Полікаровських О. І. Одеський національний морський університет (Україна)	130
ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ У МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ Коновалов С.М. Одеський національний морський університет (Україна)	133
АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОЇ ПІДТРИМКИ ПІДВОДНИХ РОБІТ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДДАЛЕНОЇ ПРИСУТНОСТІ Нікітюк П. В., Дехта В. Ю., Пуляев І. А. Одеський національний морський університет (Україна)	136
РОЗРОБКА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ У СЕРЕДОВИЩІ UNITY НА ОСНОВІ ЩІЛЬНІСНОЇ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ Клепцов А.А, Фаріонова Т.А. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)	142
ВИКОРИСТАННЯ ПРОСТОРОВИХ ОЗНАК ІНФРАСТРУКТУРИ У РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗУВАННЯ Кравцов Д.Є., Полєтаєв М.І.	144

Одеський Національний Морський Університет (Україна)	
ІНТЕГРАЦІЯ ІНТЕРПРЕТОВАНОГО ТА КАУЗАЛЬНОГО МАШИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ВПЛИВУ ОЗНАК У РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЯХ ПРОГНОЗУВАННЯ Кравцов Д.Є, Полетаєв М.І. Одеський Національний Морський Університет (Україна)	146
ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ПОРТОВОЇ ЛОГІСТИКИ/АГЕНТУВАННЯ СУДЕН З РОЗРАХУНКОМ ВИТРАТ РЕСУРСІВ ПРИ ЗМІННИХ ТАРИФАХ І КУРСАХ ВАЛЮТ Маринова Ю. О., Бугаєва І. Г. Одеський національний морський університет (Україна)	148
АВТОМАТИЗАЦІЯ МОНІТОРИНГУ ПРОФЕСІЙНОЇ КОМПЕТЕНТНОСТІ ПЕРСОНАЛУ МОРСЬКОГО ПОРТУ ЯК ФАКТОР ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА Панков М.Р., Коновалов С.М. Одеський національний морський університет (Україна)	152
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ДАНИХ Шумейко К.П. Національний університет «Одеська політехніка» (Україна)	155
DESCRIPTION OF REQUIREMENTS IN A DATA MODEL, REPRESENTED AS A SEMANTIC GRAPH ^{1,2} Iakymenkov D., ¹ Malaksiano M. ¹ Odesa National Maritime University (Ukraine) ² DUX Consulting (Ukraine)	158
ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ТА АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ПОТОКОВОГО ЗАХОПЛЕННЯ МЕДІАДАНИХ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ Шишкевич Я.Р., Цімовська А.О. Одеський ліцей №117 Одеської міської ради (Україна)	165
APPLICATION OF INTELLIGENT SYSTEMS IN MARITIME DECISION SUPPORT Tkachenko M. H., Chibirdin I. O. Odesa National Maritime University (Ukraine)	168
СЕКЦІЯ: ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В СУДНОПЛАВСТВІ SECTION INTELLIGENT TECHNOLOGIES AND DECISION-SUPPORT SYSTEMS IN MARITIME SHIPPING	
CONCEPTUAL MODEL OF THE NAVIGATOR'S INFORMATION FIELD	172

¹ Nosov A., ² Nosov P., ² Malaksiano M. ¹ Outlaw Eagle Manufacturing, Designer and Draftsperson (Canada) ² Odesa National Maritime University (Ukraine)	
ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛИВУ РОЗМІРНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ ПАСАЖИРСЬКИХ СУДЕН НА БЕЗПЕЧНУ ЕКСПЛУАТАЦІЮ ЗА КРИТЕРІЄМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОСТІЙНОСТІ Шумило О.М., Кононова О.М. Одеський національний морський університет (Україна)	178
PROJECT MANAGEMENT OF DIGITAL TRANSFORMATION IN SHIPPING COMPANIES: CHALLENGES AND SOLUTIONS Bondar A. V. Odesa National Maritime University (Ukraine)	183
ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ КОМФОРТОМ У ПАСАЖИРСЬКИХ ЗОНАХ КРУЇЗНИХ СУДЕН Полікаровських О.І., Ватренко А. С. Одеський національний морський університет (Україна)	186
FORMALIZATION OF THE INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR CENTER-OF-GRAVITY POSITION ON THE WOBBLINESS OF AN ERGATIC NAVIGATION SUPPORT SYSTEM AND THE MANIFESTATION OF RISK Nosov P. Odesa National Maritime University (Ukraine)	188
BI-OBJECTIVE MODEL OF MULTI-PORT CONTAINER STOWAGE PROBLEM WITH REVENUE MAXIMIZATION AND RE-HANDLING MINIMIZATION BY RE-HANDLING CONSTRAINTS LINEARIZATION Romanuke V. V. Vinnytsia Institute of Trade and Economics of State University of Trade and Economics (Ukraine)	193
AI-BASED SITUATIONAL AWARENESS IN MODERN SHIPPING: THE ORCA AI APPROACH Ternovsky V. B., Ternovsky Y. V. Odessa National Maritime University (Ukraine)	199
ІШ-КАПІТАН: ГУЧНЕ ГАСЛО ЧИ ОБ'ЄКТИВНА ПОТРЕБА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУЧАСНОГО СУДНОВОДІННЯ ¹ Маменко П. П., ² Рева О.М., ² Камишин В.В., ¹ Кириченко К. В. ¹ Херсонська державна морська академія (Україна) ² Український інститут науково-технічної експертизи та інформації (Україна)	204
КОНЦЕПЦІЯ МОДЕЛІ ІНТЕГРАЦІЇ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ДАНИХ У КЕРУВАННІ ГІДРОАКУСТИЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ СУДЕН Рудніченко М.Д., Шибаєва Н.О., Шведов Д.В. Національний університет «Одеська політехніка» (Україна)	208

МЕТОДИКА СИНТЕЗУ АДАПТИВНОЇ АРХІТЕКТУРИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ НАВІГАЦІЙНИХ ЗНАКІВ У СУДНОПЛАВСТВІ	212
Рудніченко М.Д., Шибасєва Н.О., Шведов Д.В. Національний університет «Одеська політехніка» (Україна)	
ЗАСТОСУВАННЯ РОЙОВОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ КЕРУЮЧИХ РІШЕНЬ В АВТОМАТИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ОБРОБКИ НЕКОНВЕНЦІЙНИХ ДАНИХ СКЛАДНИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ	215
Шибасєва Н.О., Рудніченко М.Д., Шибасєв Д.С. Національний університет «Одеська політехніка» (Україна)	
THE ROLE OF MODEL CONTEXT PROTOCOL IN THE FUNCTIONING OF MARITIME TRANSPORTATION INFORMATION SYSTEMS	218
Romanov A. Odesa National Maritime University (Ukraine)	
АНАЛІЗ AIS-ДАНИХ У СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА	223
Степанюк К.С., Розум М.В. Одеський національний морський університет (Україна)	
ЗАСТОСУВАННЯ LIDAR-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРСЬКОГО ДНА	226
Томчаковський Г. Г. Одеський національний морський університет (Україна)	
СПЕЦИФІКА ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ГЛИБИННОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ РИЗИКІВ ВІДМОВ СУДНОВИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ	230
Шведов Д.В. Національний університет «Одеська політехніка» (Україна)	
СИСТЕМА АНАЛІЗУ ЕФЕКТИВНОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ТА ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ	233
Ситник Т.Г., Розум М.В. Одеський національний морський університет (Україна)	
ІШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У СУДНОВОДІННІ: МЕЖІ ДОВІРИ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ РЕКОМЕНДАЦІЙ	235
Байрамова О.В. Відокремлений структурний підрозділ «Дунайський інститут водного транспорту Національного транспортного університету» (Україна)	
ІДЕНТИФІКАЦІЯ КОРИСТУВАЧІВ В МОРСЬКИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ	238
Даус Ю.В. Одеський національний морський університет (Україна)	
ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ЯК ІНСТРУМЕНТ МОНІТОРИНГУ БЕЗПЕКИ	

СУДНА Оберто Сантана Л.Е. Одеський національний морський університет (Україна)	242
ВПЛИВ ПРИРОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ НА ТОЧНІСТЬ РОЗПІЗНАВАННЯ РАКУРСУ СУДЕН ТРЕНОВАНОЮ МОДЕЛЛЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ YOLOv8n Пашенко О.Л. Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)	247
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НЕЙРОМЕРЕЖНЕВИХ І СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ПРОГНОЗУВАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ Григорчук К. С., Полетаєв М. І. Одеський національний морський університет (Україна)	252
ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ПРОЦЕСІВ БУНКЕРУВАННЯ СУДЕН НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ Вільшанюк М. І., Романов А. Ю. Одеський національний морський університет (Україна)	257
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФОРМИ БУДІВЛІ НА СТІЙКІСТЬ ДО ДІЇ УДАРНОЇ ХВИЛІ ¹ Кляцька О.О., ¹ Цімовська А.О., ² О. М. Мельник ¹ Одеський ліцей №117 Одеської міської ради (Україна) ² Одеський національний морський університет (Україна)	261
INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR EARLY DETECTION OF VESSEL CONFLICT SITUATIONS IN PORT WATERS Dolia K., Kobrina N. National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» (Ukraine)	264
INTEGRATED DECISION SUPPORT SYSTEM FOR SAFE NAVIGATION AND ENERGY-EFFICIENT MANAGEMENT OF VESSEL OPERATIONS IN PORT WATER AREAS Dolia K., Hryhorovych A. National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute» (Ukraine)	269
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК	274
ЗМІСТ	276

Редакція не несе відповідальності за професійно-змістовну та методичну коректність матеріалів, що публікуються, а також за коректність посилань.

Збірка матеріалів

I Міжнародної науково-практичної конференції

ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ОПЕРАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СУДНОПЛАВСТВІ

IOTS – 2026

Відповідальний за випуск *Носов П.С.*
Одеський національний морський університет, 2026

Підписано до друку 21.04.2026 р. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. аркушів 17,8. Тираж 120 прим.