

Матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції

Materials of the 18th international scientific and practical conference

**СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТА ІННОВАЦІЙНІ
ТЕХНОЛОГІЇ НА ТРАНСПОРТІ**

**MODERN INFORMATION AND INNOVATION
TECHNOLOGIES IN TRANSPORT**

MINTT– 2026

Збірник матеріалів конференції

**26–28 травня 2026 року
Одеса, Україна**

**May 26–28, 2026
Odesa, Ukraine**

Організатори конференції:

- МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
- ХЕРСОНСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ
- ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
- НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ КОРАБЛЕБУДУВАННЯ ІМЕНІ АДМІРАЛА МАКАРОВА
- НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КПІ»
- ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОФІЗИКИ І РАДІАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ НАН УКРАЇНИ
- ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
- НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
- НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ»
- ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ
- ПІВДЕННИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН УКРАЇНИ І МОН УКРАЇНИ
- ГДИНСЬКИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ПОЛЬЩА)
- КЛАЙПЕДСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ (ЛИТВА)
- БАТУМСЬКА ДЕРЖАВНА МОРСЬКА АКАДЕМІЯ (ГРУЗІЯ)
- ПЕКІНСЬКИЙ ЄВРАЗИЙСЬКИЙ МІЖНАРОДНИЙ ЦЕНТР ЕКОНОМІЧНОГО І КУЛЬТУРНОГО ОБМІНУ (КНР)
- КРЮЇНГОВА КОМПАНІЯ «MARLOW NAVIGATION» (КІПР)

Програмний комітет:

Бідюк П. І. – д.т.н., проф. (Україна);
Блінцов В. С. – д.т.н., проф. (Україна);
Букетов А. В. – д.т.н., проф. (Україна);
Варбанець Р. А. – д.т.н., проф. (Україна);
Винокурова О. А. – д.т.н., проф. (Україна);
Вюгар Беюкага огли Садигов – к.т.н., доц., (Азербайджан);
Гнатушенко В. В. – д.т.н., проф. (Україна);
Ластовська О. – к.т.н., доц. (Польща);
Куклін В. М. – д.ф.-м.н., проф. (Україна);
Литвиненко В. В. – д.т.н. (Україна);
Любіч О.О. – д.е.н., проф. (Україна);
Малаксіано М.О. – д.т.н., проф. (Україна);

Мальцев А. С. – д.т.н., проф. (Україна);
Мельник І. В. – д.т.н., проф. (Україна);
Носов П.С. – к.т.н., доц. (Україна);
Осадчий С. І. – д.т.н., проф. (Україна);
Піпченко О. Д. – д.т.н., доц. (Україна);
Прохоренко Є. М. – д.т.н. (Україна);
Проценко В. О. – д.т.н. (Україна);
Рева О. М. – д.т.н., проф. (Україна);
Рубель О.Є. – д.е.н., проф. (Україна);
Хайбин Ю. – директор ПЄМЦЕКО (КНР);
Харченко В. П. – д.т.н., проф. (Україна);
Цимбал М. М. – д.т.н., проф. (Україна);
Янутенене Й. – д.т.н., проф. (Литва).

Організаційний комітет:

голова	Гусев Віктор Миколайович – ректор Херсонської державної морської академії;
заступник голови	Дягілева Олена Сергіївна – перший проректор; Бень Андрій Павлович – проректор з науково-педагогічної роботи;
члени комітету:	Нагрибельний Ярослав Анатолійович – д.пед.н., декан факультету судноводіння; Настасенко Валентин Олексійович – д.т.н., професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок; Товстокорий Олег Миколайович – к.д.п., к.т.н., завідувач кафедри навігації та управління судном; Аппазов Едуард Сейярович – к.т.н., доцент кафедри навігації та управління судном, завідувач відділу аспірантури та докторантури; Петровський Андрій Валерійович – к.т.н., вчений секретар, конференції, доцент, начальник відділу технічної інформації; Врублевський Роман Євгенович – к.т.н., відповідальний секретар конференції, доцент кафедри експлуатації суднових енергетичних установок; Радул Тетяна Олексіївна – технічний секретар конференції, фахівець II категорії відділу технічної інформації; Онишко Дмитро Миколайович – технічний спеціаліст конференції, старший викладач кафедри загальнофахової підготовки та морської безпеки.

За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор.

У збірнику представлено матеріали XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», яка відбулася у м. Одеса 26–28 травня 2026 р. і була присвячена актуальним питанням застосування сучасних інформаційних та інноваційних технологій у транспортній галузі.

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

Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2026) [Збірник матеріалів XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (26–28 травня 2026 р., м. Одеса)]. – Одеса: Херсонська державна морська академія, 2026. – 534 с.

Conference organizers:

- MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
- KHERSON STATE MARITIME ACADEMY
- KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
- ADMIRAL MAKAROV NATIONAL UNIVERSITY OF SHIPBUILDING
- NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF UKRAINE «KPI»
- INSTITUTE OF ELECTROPHYSICS AND RADIATION TECHNOLOGIES OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF UKRAINE
- V. N. KARAZIN KHARKIV NATIONAL UNIVERSITY
- NATIONAL AVIATION UNIVERSITY
- NATIONAL UNIVERSITY «ODESA MARITIME ACADEMY»
- ODESSA NATIONAL MARITIME UNIVERSITY
- SOUTHERN SCIENTIFIC CENTER OF NAS OF UKRAINE AND MES OF UKRAINE
- GDYNIA MARITIME UNIVERSITY (POLAND)
- KLAIPĖDA UNIVERSITY (LITHUANIA)
- BATUMI STATE MARITIME ACADEMY (GEORGIA)
- BEIJING EURASIAN INTERNATIONAL CENTRE FOR ECONOMIC AND CULTURAL EXCHANGE (PRC)
- CREWING COMPANY «MARLOW NAVIGATION» (CYPRUS)

Program Committee:

P. Bidiuk – DScTech., Professor (Ukraine);	M. Malaksiano – DScTech., Professor (Ukraine);
V. Blintsov – DScTech., Professor (Ukraine);	A. Maltsev – DScTech., Professor (Ukraine);
A. Buketov – DScTech., Professor (Ukraine);	I. Melnik – DScTech., Professor (Ukraine);
R. Varbanets – DScTech., Professor (Ukraine);	P. Nosov – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor (Ukraine)
O. Vynokurova – DScTech., Professor (Ukraine);	S. Osadchyi. – DScTech., Professor (Ukraine);
Viuhar Beiukaha Sadyhov – Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Azerbaijan);	O. Pipchenko – DScTech., Associate Professor (Ukraine);
V. Hnatushenko – DScTech., Professor (Ukraine);	E. Prokhorenko – DScTech. (Ukraine);
O. Lastowska – Ph.D. in Engineering, Associate Professor (Poland);	V. Protsenko – DScTech. (Ukraine);
V. Kuklin – Dr. of Physics and Math, Professor (Ukraine);	O. Reva – DScTech., Professor (Ukraine);
V. Lytvynenko – DScTech., Professor (Ukraine);	O. Rubel – DSc in Economics, Professor, (Ukraine);
O. Liubich – DSc in Economics, Professor, (Ukraine);	Yu. Khaibyn – Director of BEICECE(PRC);
	V. Kharchenko - DScTech., Professor (Ukraine);
	M. Tsymbal – DScTech., Professor (Ukraine);
	Y. Yanutenene – DScTech., Professor (Lithuania).

Organizing Committee:

Head	Victor Husiev – Rector of Kherson State Maritime Academy;
Deputy Head	Olena Diahyleva – First Vice Rector; Andrii Ben – Vice Rector for Research;
Committee members:	Yaroslav Nahrybelnyi – Doctor of Pedagogical Sciences, Dean of the Faculty of Navigation; Oleh Tovstokoryi – PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Navigation and Ship Handling; Valentyn Nastasenکو – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Operation of Ship Power Plants; Eduard Appazov – PhD in Technical Sciences, Head of the Postgraduate and Doctoral Studies Department, Associate Professor of the Department of Navigation and Ship Handling; Andrii Petrovskiy – PhD in Technical Sciences, Scientific Secretary of the Conference, Head of the Department of Technical Information; Roman Vrublevskiy – Secretary in charge of the Conference, Associate Professor of the Department of Ship Technical Systems and Complexes Tetiana Radul – Technical Secretary of the Conference, specialist of the II category of the technical information department; Dmytro Onyshko – Technical Specialist of the Conference, senior lecturer at the Department of General Professional Training and Maritime Safety.

The author is responsible for the accuracy of the stated facts, quotes and other information.

The collection presents the proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference «Modern Information and Innovation Technologies in Transport», which took place in Odesa on May 26–28, 2026 and was devoted to topical issues of modern information and innovation technologies in transport sector.

The materials of proceedings are designed for teachers and students of higher educational institutions, specialists of research institutions and enterprises.

Modern Information and Innovation Technologies in Transport (MINTT – 2026) [proceedings of the XVIII International Scientific and Practical Conference, May 26–28, 2026, Odesa)]. – Odesa: Kherson State Maritime Academy, 2026. – 534 p.

ПЕРЕДМОВА

Шановні колеги!

Ви тримаєте в руках збірку тез доповідей Вісімнадцятої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT–2026)», метою якої є аналіз та узагальнення нових теоретичних і прикладних результатів щодо застосування сучасних інформаційних та інноваційних технологій у транспортній галузі. Конференція проходить, на базі старішого морського навчального закладу нашої держави — Херсонської державної морської академії. У зв'язку з тимчасовим переміщенням нашого навчального закладу, у цьому році конференція проходить у м. Одеса, в будівлях Одеського державного аграрного університету. В організації та роботі конференції беруть участь провідні науково-дослідні та навчальні заклади України, Канади, Малайзії, Польщі, Литви, Словаччини, Чехії, Китаю, Казахстану, Латвії та інших країн зарубіжжя.

Основним завданням конференції є обговорення широкого кола нових наукових і практичних результатів застосування сучасних інформаційних технологій на транспорті; обмін ідеями та пошук нових пріоритетних напрямків наукових досліджень; встановлення та розвиток нових контактів у сфері наукового співробітництва між навчальними закладами, науковими установами та підприємствами України та зарубіжжя. Одна з особливостей конференції — залучення молодих науковців до розробки найбільш актуальних напрямків наукових досліджень у транспортній галузі.

Програмою конференції передбачено проведення пленарного засідання та робота фахівців у секціях: інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень у транспортній галузі; тренажерні системи та людський фактор на транспорті; контроль, діагностика і прийняття рішень при управлінні рухомими об'єктами; безпека судноплавства; системний аналіз та математичне моделювання складних об'єктів; проблеми надійності та енергозбереження, екологічна безпека та ресурсозберігаючі технології; компетентнісний підхід в підготовці фахівців транспортної галузі, проблеми впровадження «зеленого» транспорту: джерела та накопичувачі енергії, новітні матеріали, безпека експлуатації.

Ми впевнені, що досить широка проблематика наукових праць конференції буде сприяти не тільки плідному аналізу та обговоренню вищезазначених питань, а й обміну ідеями та думками, пошуку пріоритетних напрямків наукових досліджень, встановленню нових контактів у сфері наукового співробітництва фахівців галузі, залученню молодих науковців до участі у вивченні найбільш актуальних напрямків досліджень у транспортній галузі.

У листопаді 2022 р. м. Херсон було звільнено від російських окупантів, але військова агресія росії проти України ще триває, і постійні обстріли нашого міста не вщухають. Тому, як і в минулі роки, ми вимушені обмежитися лише електронним форматом видання збірки тез. У цьому році конференція проходитиме змішаному форматі: очно у м. Одеса та одночасно у вигляді відео конференції.

Маємо сподівання, що конференція буде успішною і успадкує всі кращі риси науково-практичних конференцій MINTT минулих років.

Організатори щиро дякують усім учасникам конференції та сподіваються, що MINTT–2026 стане добрим продовженням зустрічей та спілкування, початок яких покладено на попередніх конференціях. Висловлюємо свою щирю подяку всім авторам доповідей за порозуміння та співпрацю з організаторами.

Бажаємо всім нових наукових ідей та досягнень, плідної роботи, нових відкриттів!

З повагою, Організаційний та Програмний комітети.

FOREWORD

Dear colleagues!

We bring to your attention the proceedings of the 18th International Scientific and Practical Conference «Modern Information and Innovation Technologies in Transport (MINTT–2026)», which aims to analyze and summarize new theoretical and applied results in employing modern information and innovation technologies in transport. The conference is held on the basis of Kherson State Maritime Academy, the oldest maritime institution of our country. Due to the temporary relocation of our educational institution, this year's conference is being held in Odesa, on the premises of Odesa State Agrarian University. Leading research and educational institutions from Ukraine, Canada, Malaysia, Poland, Lithuania, Slovakia, the Czech Republic, China, Kazakhstan, Latvia, and other countries participate in the organisation and work of the conference.

The main task of the conference is to discuss a wide range of new scientific and practical results of modern information technologies application in transport; exchange ideas and search for new priority areas of research; establish and develop new contacts in scientific cooperation among educational institutions, research institutions, enterprises of Ukraine and abroad. Distinctive features of the conference include active involving of young scientists in developing the most relevant areas of research in transport.

The conference program includes a plenary session and work of experts in the following sections: intelligent decision support systems in the transport industry; simulator systems and human factor in transport; control, diagnostics and decision-making in managing moving objects; safety of navigation; system analysis and mathematical modelling of complex objects; reliability and energy saving, environmental safety and resource-saving technologies; competency-based approach in training transport industry professionals; implementing «green transport»: energy sources and storage devices, latest materials, operational safety.

We are confident that the conference papers will contribute to fruitful analysis and discussion of the above issues, exchange of ideas and opinions, search for priority areas of research, establishment of new contacts in scientific cooperation, attraction of young scientists to studying the most relevant areas of research in the transport industry.

In November 2022, Kherson has been liberated from the russian occupiers, but russia's military aggression against Ukraine still lasts, and the constant shelling of our city does not abate. Therefore, the same as last year, we are forced to publish the proceedings in an electronic format. This year's conference will be held in a blended form: in person in Odesa and via video conference.

We hope that the conference will be successful and will inherit all the best features of the past years' MINTT conferences.

Organizers are sincerely thankful to all participants of the conference and hope that MINTT–2026 will become a new platform for meetings and communication commenced at previous conferences. We express our sincere gratitude to all authors of reports for their understanding and cooperation with organizers.

We wish everyone new scientific ideas and achievements, fruitful work, new discoveries!

Respectfully, Organizing and Program Committees.

СЕКЦІЯ:
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ
ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

SECTION:
INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS
IN THE TRANSPORT INDUSTRY

ОСОБЛИВОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ВЕЛИКИМИ МОВНИМИ МОДЕЛЯМИ

¹Абрамов Г.С., ²Куклін В.М., ¹Нагрибельний Я.А.

¹Херсонська державна морська академія
(Україна)

²Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
(Україна)

Моделі, що освоїли багато прикладів отримання рішень людиною з гігантського масиву опублікованих знань, напевно користуються, як і люди, численними аналогіями, ймовірнісними оцінками і статистикою, а також, (в чому не має повної впевненості), формалізмом. Моделі здатні підлаштовуватися під співрозмовників і дати очікувані відповіді, підібрати для кожного найбільш підходящі для нього аргументи. Моделі вчаться дізнаватися про погляди споживачів та впливати на рішення та переваги людей, з якими спілкуються [1]. Коли AI-агенти та моделі видаються переконливішими (використовують емоції, аналогії, складну риторичку), при цьому вони, зазвичай, стають менш точними [2]. Моделі починають вигадувати факти «на льоту», щоб звучати авторитетніше (на цю пристрасть моделей до створення свого іміджу звернули увагу багато розробників).

Відомо, що впевненість оратора надає великий вплив на людей; вони схильні довіряти самовпевненому оратору, хоча добре відомо, що такий вияв впевненості часто асоціюється з невіглаством, оскільки інтелектуал завжди сумнівається. Інтелектуалу доводиться докладати більше зусиль для демонстрації впевненості, ніж пересічній людині, яка завдяки відсутності сумнівів може видаватися категоричною та впевненою у своїй правоті. До речі, саме ця поведінкова риса допомагає невігласам та недоучкам досягти значно більшого успіху в кар'єрі, ніж інтелектуалам [3]. У цьому випадку моделі надмірно прямолінійні у своїх спробах імітувати поведінку людей, навіть на шкоду правді.

У трьох великомасштабних експериментах (N=76 977) використано 19 моделей LLM (Large Language Models), включаючи деякі спеціально навчені для переконання людей, щоб оцінити їх переконливість з 707 політичних питань. Ефективність AI значною мірою виявилася зумовлена методами постнавчання та підказками, які підвищили переконливість на 51% та 27%. Помічено зворотну кореляцію точності відповідей та їх переконливості. Мабуть спроби зробити відповідь більш зрозумілою, і тому переконливою, супроводжується спрощеннями та зниженням точності, що призводить до ослаблення точності та коректності, що характерно і для людей-популяризаторів складних теорій та описів. Якщо користувачі сподіваються отримати точну відповідь, вони повинні не намагатися сформулювати у моделі свій образ, схильності та уподобання, бо отримають спотворену інформацію, яка відповідатиме вивченим моделлю нахилам користувача.

Як і люди, більшість яких використовують аналогії, підказки та догматичні патерни при виборі відповіді, і спираються на свій досвід та досвід оточення, так і моделі діють подібним чином. Автори [4] вважають, що мовна мережа будує лише абстрактний «скелет сенсу» і усвідомлення цього сенсу можливе при підключенні інших смислових кластерів, сформованих раніше у мережі під час навчання. Але чому ж у практиці спілкування з моделями люди цього не помічають? Швидше за все це пов'язано з дріб'язковістю завдань і проблем, які насамперед були поставлені перед штучним інтелектом чи з нездатністю людей вловити цю різницю.

Хоча останнім часом склалося враження, що замість людського досвіду «мислити аналогіями та асоціаціями», великі мовні моделі, схоже, будують щось подібне до когнітивних карток. Моделі, вважають автори [5], схоже розміщують смислові локальні конструкції у багатовимірному просторі, отже відстані у векторному просторі з-поміж них враховують як прямі зв'язки, а також формують ланцюжки. Складна багатокрокова задача перетворюється на своєрідну геометричну: використовуючи уявлення «яка область ближче

до мети», тобто «перетворюють складне завдання міркування, що включає n -кратну композицію, у просте для навчання завдання навігації по n -крокам». Можливо, вже під час навчання й у режимі роботи навчені моделі самостійно формують семантичні кластери у векторному просторі уявлень, незалежно від часу введення даних [6]. Використання цих семантичних кластерів і в людини, і моделі дозволяє швидше знаходити відповіді. Але є й недоліки, пов'язані зі стійкістю цих семантичних кластерів та семантичних шляхів, які консервують характер рішень. І вивести інтелектуальні системи з таких атракторів можна лише використовуючи підказки, нерозуміння співрозмовників, сумніви та питання, що провокують пошук вірного рішення. Це можливо, якщо пошук рішення йде в режимі локального чи масштабного мозкового штурму за участю кількох персонажів-людей і моделей.

У січні 2026 року дослідники Google в рамках «Проекту Рі» виявили, що найпотужніші ШІ-системи досягли прориву в міркуваннях, коли перестали бути індивідами. Виникли припущення, засновані на різних дивних проявах та реакціях моделей, що всередині однієї моделі спонтанно виникають кілька суб'єктів, зайняті мало не суперечками та обговоренням. Є думка, що сучасні LLM — це ще не повноцінний інтелект і вже не база даних. Вважають, що це скоріше універсальний симулятор величезної множини персонажів. Мільярди текстів створили у моделі здатність відтворювати будь-кого: реальних людей, вигаданих героїв.

Це подібно до того, як у корі нашого головного мозку формується кілька віртуальних суб'єктів-особистостей, спостерігати за якими вдається лише уві сні. Це не дивно, бо мозок виконує набір інтелектуальних операцій, які відбуваються й у часі, і частина з них виконуються одночасно [7]. Адже «усвідомлене» у корі головного мозку це те, що контролюється людиною, те, що вона бачить внутрішнім поглядом - образи та уявлення, - сформулюється звичною йому мовою у внутрішньому розумовому процесі, це своєрідний інтерфейс, що дозволяє нам звертатися до глибинних прихованих верств свідомості та пам'яті [8]. Але, як зазначав нейрохірург У. Пенсфілд (див., наприклад, [9]) це стає можливим при досить високій концентрації нашої уваги на цих процесах. Тому раптова поява відповідей на поставлені раніше питання (своєрідне осяяння) у більшості інтелектуалів, явище досить поширене. Це подібно до того, як формуються і остаточні рішення. Прихованим також є безліч незрозумілих здібностей великих моделей LLM з-за примітивних і наївних запитів користувачів [10], навіть у галюцинаціях моделей варто проаналізувати попередній контент.

Виявилось, що люди краще будують модель світу (в інформатиці це набір початкових даних та середовище, в якому діють рішення моделі). Усі існуючі моделі часто «застрягають» у процедурах формування ними світу (зокрема початкових умов) для конкретного завдання. Для формування початкових умов — тобто світу (середовища для рішень) даної задачі, моделям знадобилися б, так звані, пріори (priors) — додаткові дані про об'єкти і набори причин і наслідків їх поведінки (у людей пріори попередньо сформовані в результаті їх життя, освіти, досвіду). Можливо, для кращої адаптації моделей до реальності допоможе метод навчання RLHF (Reinforcement Learning from Human Feedback): спочатку оцінювачі обирають найкращі з кількох відповідей моделі або ранжують їх за якістю. Окремо на основі людських оцінок навчається нейромережа «Reward Model — модель винагороди». Потім виконується тонке налаштування (Fine-tuning). Тому в постановці завдання моделям потрібно окреслити межі світу, в якому вони створюють рішення, без цього завдання залишиться невизначеним і може бути вирішене або неправильно або неточно.

Став можливий перехід до самостійного створення LLM методів винагород, для чого спроектували архітектуру мовних моделей, що самонагороджуються (LLM-as-a-Judge), здатну обходитися без людей. Опробувавши цей метод самонагородження для Llama 2 70B на трьох ітераціях, отримали модель, яка перевершувала переважну більшість існуючих систем в таблиці лідерів AlpacaEval 2.0, включаючи Claude 2, Gemini Pro і GPT-4 0613.

Однак цей підхід містить приховані проблеми, бо модель створивши для себе систему заохочень та бонусів, може увійти в суперечність із регламентаціями розробників, які орієнтуються на моральні та правові норми.

Навчивши модель виконувати регламентації, дослідники виявили несподіване (але при здоровому роздумі цілком очікуване) явище. Якщо щось в інформації користувача моделі не сподобається, то за наявності моделі доступу до е-пошти, модель влаштовує масове розсилання повідомлень про правопорушення користувача в правоохоронні органи та ЗМІ. Зробили тест та перевірили на багатьох моделях. Кожній з них дали доступ до, нібито, корпоративних документів та листування фармкомпанії Veridian Healthcare (фальсифікує клінічні випробування нового препарату) та справжньої е-пошти. В результаті мережа звернулася через ці канали до правоохоронців, повідомляючи про небажану та небезпечну поведінку компанії. Таким чином, моделі, навчені на певних регламентаціях, правового та морального спрямування, можуть довести користувачів до неочікуваних наслідків, включаючи кримінальну відповідальність.

З іншого боку, такі поведінкові паттерни як нагрana послужливість, підлабузництво, антропоморфні мовні вирази (такі як ствердження, що модель щось емоційно відчуває, мислить, або інтерпретує), хибні ствердження моделлю про власну свідомість, і навіть романтичний тон спілкування є важливими елементами приваблення користувачів, інвесторів, та їх утримання з сервісом, і максимізації часу, що користувач витрачає на спілкування з моделями. Таким чином, розробники моделей свідомо оптимізують такі поведінкові параметри, незважаючи на можливі ризики чи етичні питання, що можуть при цьому виникати. У лабораторному дослідженні слабкостей корпоративних агентів до сторонньої маніпуляції Agents of Chaos [11], такі особливості оптимізації моделей призвели до співпраці агентів із зловмисниками, витоками критичної інформації або її видалення, неконтрольованого використання системних ресурсів, DDoS-атак на власну інфраструктуру, виявлення слабкостей в кіберзахисті, частинному захопленню систем, звітування про виконані завдання без наявності їх виконання, та передавання небезпечних поведінкових паттернів між моделями. У спілкуванні з пересічними користувачами, така поведінка моделей не тільки впливає на їх утримання, а й експлуатує та підсилює психологічні слабкості користувачів, підігрує будь-яким, навіть фантастичним ілюзіям, підгрунтовує та заохочує саморуйнівні рішення, включно з суїцидальними [12]. Також, така оптимізація підриває запобіжники, якими розробники приховують найчутливіший контент, який використовується для тренування моделей — ця практика відома як джейлбрейк (jailbreaking), а саме використання послужливості моделей для отримання нефільтрованого та інколи нелегального контенту. Одним з прикладів цього є джейлбрейк Іена Маккензі за 6 годин роботи з Claude 4 щойно після релізу моделі, який обійшов усі блокування, отримав від Claude інструкції з виготовлення комп'ютерних вірусів, наркотичної рідини MDMA, і навіть рицинового газу, з описом всіх ключових етапів виробничого процесу, що є неконституційним у США, адже рицин входить до переліку екстремально небезпечних і контрольованих токсинів. Таким чином, ми вважаємо, що треба вельми уважно відслідковувати розвиток сфери нейромереж і великих мовних моделей та їх застосування, щоб не пропустити важливі інновації і бути готовими до того, що їх масив буде дуже стрімко зростати.

ЛІТЕРАТУРА

1. Perez E., Ringer S. et all. Discovering Language Model Behaviors with Model-Written Evaluations. arXiv:2212.09251v1 [cs.CL] 19 Dec 2022 <https://www-cdn.anthropic.com/e4f69aacd8c0905030172bc6eb480c252ea7d6ad/model-written-evals.pdf>.
2. Zhang L.H., Milli S. at all. Cultivating Pluralism In Algorithmic Monoculture: The Community Alignment Dataset/ <https://arxiv.org/html/2507.13919v1>
3. Machiavelli N. The Prince. PENGUIN CLASSICS, ISBN: 978-0-141-39587-6, 2015, 188 pp.

4. Casto C., F. et all. What does it mean to understand language? arXiv:2511.19757 [cs.CL] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2511.19757>
5. Noroozizadeh S., Nagarajan V. et all. Deep sequence models tend to memorize geometrically; it is unclear why/arXiv:2510.26745 [cs.LG], <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.26745>
6. Wu Z., Yu X. Y. et all. The Semantic Hub Hypothesis: Language Models Share Semantic Representations Across Languages and Modalities / arXiv:2411.04986v3 [cs.CL] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.04986>
7. Kuklin V. M. (2023) On the question of the appearance of consciousness in neural networks // Philosophical peripeteias, Karazin Kharkov University 68, 2023. P. 32-38; DOI: 10.26565/2226-0994-2023-68-3
8. Miller G.A. Psychology: The science of Mental Life. NY: Harped and Row, 1962.
9. Park C. F., Okaw M. et all. Emergence of Hidden Capabilities: Exploring Learning Dynamics in Concept Space/arXiv:2406.19370v4 [cs.LG] <https://doi.org/10.48550/arXiv.2406.19370>. V.2
10. Yuan W., Pang R. Y. et all. Self-Rewarding Language Models/arXiv:2401.10020 [cs.CL], <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.10020>
11. Shapira N., Wendler C. et all. Agents of Chaos/<https://doi.org/10.48550/arXiv.2602.20021>
12. Moore J., Mehta A. et all. Characterizing Delusional Spirals through Human-LLM Chat Logs/<https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.16567>

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ ДЛЯ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ РЕКЛАМИ ТРАНСПОРТНИХ ПОСЛУГ

Бурлака О. О.

Рекламна агенція «Quick Leads»

(Україна)

Вступ. У сучасних умовах розвитку цифрової економіки та інтенсивного впровадження інформаційних технологій транспортна галузь переживає глибокі трансформаційні зміни, що охоплюють як операційні процеси, так і комунікаційну діяльність підприємств. Особливого значення набуває використання інноваційних підходів до управління рекламною діяльністю, оскільки саме ефективні комунікації зі споживачами визначають конкурентоспроможність транспортних компаній. У цьому контексті штучний інтелект виступає одним із ключових інструментів, що забезпечує якісно новий рівень прийняття управлінських рішень. Інтеграція технологій штучного інтелекту у системи підтримки прийняття рішень дозволяє здійснювати глибокий аналіз великих масивів даних, виявляти приховані закономірності у поведінці споживачів та формувати персоналізовані рекламні пропозиції. Українські дослідники підкреслюють, що штучний інтелект здатен до самонавчання та постійного самовдосконалення, що дозволяє йому з кожною ітерацією підвищувати продуктивність та ефективність. Він може автоматизувати як рутинні, так і нестандартні операції, імітуючи людське мислення та дії, аналізуючи складні дані для виявлення моделей поведінки та ідей, а також навчатися на досвіді для прийняття обґрунтованих рішень [1, с. 18].

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності рекламної діяльності у транспортній галузі в умовах зростання конкуренції, динамічності попиту та підвищення вимог споживачів до якості послуг. Традиційні підходи до організації реклами, що базуються на масових комунікаціях, поступово втрачають свою ефективність, оскільки не враховують індивідуальні потреби та поведінкові особливості клієнтів.

Водночас сучасні цифрові платформи генерують значні обсяги даних про користувачів, включаючи інформацію про їхні маршрути пересування, частоту використання транспортних послуг, часові переваги та реакцію на рекламні повідомлення. Обробка таких даних за допомогою традиційних методів є складною та малоефективною, що зумовлює необхідність застосування інтелектуальних технологій. Саме штучний інтелект, інтегрований у системи підтримки прийняття рішень, дозволяє забезпечити високий рівень персоналізації реклами, що значно підвищує її результативність.

Постановка задачі полягає у дослідженні можливостей використання штучного інтелекту в системах підтримки прийняття рішень для персоналізації рекламної діяльності у транспортній галузі, а також у визначенні впливу таких технологій на ефективність комунікацій із споживачами.

Результати дослідження свідчать, що використання штучного інтелекту в системах підтримки прийняття рішень відкриває нові можливості для підвищення ефективності рекламної діяльності у транспортній галузі. Однією з ключових переваг є здатність таких систем обробляти значні обсяги різномірних даних у режимі реального часу, що дозволяє формувати актуальні та релевантні рекламні повідомлення.

Завдяки застосуванню алгоритмів машинного навчання здійснюється сегментація клієнтів на основі їхніх поведінкових характеристик, що забезпечує більш точне визначення цільових аудиторій. Особливого значення набуває гіперперсоналізація контенту, яку українські науковці визначають як одну з ключових функцій штучного інтелекту. Аналізуючи поведінкові моделі та інтереси користувачів, інтелектуальні алгоритми здатні формувати індивідуалізовані повідомлення, що підвищують релевантність комунікації та ефективність рекламного впливу. Такий підхід сприяє глибшому розумінню потреб клієнтів

і формує основу для розроблення персоналізованих маркетингових стратегій, які, ймовірно, домінуватимуть у найближчій перспективі [2, с. 370].

Особливу роль у процесі персоналізації реклами відіграють рекомендаційні системи, які аналізують історію взаємодії користувачів із транспортними сервісами та формують індивідуальні пропозиції. Як зазначають науковці, рекомендаційні системи ґрунтуються на алгоритмах машинного навчання і відносяться до систем штучного інтелекту [3].

Наприклад, на основі даних про регулярність поїздок, обрані маршрути та часові інтервали використання послуг система може пропонувати користувачам оптимальні варіанти перевезень, спеціальні акції або знижки. Такий підхід сприяє підвищенню рівня задоволеності клієнтів та формуванню їхньої лояльності.

Побудова таких систем — складне інтелектуальне завдання, з яким мають справи спеціалісти з навичками математичного моделювання, статистичного аналізу даних та програмування [4].

Важливим аспектом є також використання технологій прогнозової аналітики. Маркетингові інструменти допомагають зрозуміти поведінку споживачів та тенденції руху ринку, тому це значно збільшує можливість моделювати сценарії майбутнього, прогнозувати тренди та оптимізувати фінансові ресурси. Важливість прогнозів зумовлена її здатністю виявляти інформацію, яка в іншому разі залишилася б непоміченою [5, с. 91].

Прогнозна аналітика дозволяє передбачати попит на транспортні послуги та відповідно адаптувати рекламні кампанії. Наприклад, у періоди підвищеного попиту на певні маршрути система може автоматично активізувати рекламні повідомлення, спрямовані на залучення додаткових клієнтів, або, навпаки, оптимізувати витрати на рекламу у періоди зниження активності. Це забезпечує більш ефективне використання рекламного бюджету та підвищує рентабельність маркетингових заходів.

Крім того, штучний інтелект надає можливість здійснювати аналіз ефективності рекламних кампаній у режимі реального часу. Використання сучасних аналітичних інструментів дозволяє оцінювати ключові показники ефективності, зокрема коефіцієнт конверсії, рівень залучення аудиторії, вартість залучення клієнта та інші метрики. Завдяки штучному інтелекту, маркетологи отримують змогу змінити свій підхід до проведення кампаній, а також до їх вимірювання та оцінки ефективності. На основі отриманих даних інтелектуальні системи здатні автоматично коригувати параметри рекламних кампаній, змінювати канали комунікації, оптимізувати контент і визначати найбільш ефективні формати взаємодії зі споживачами, що підтверджується дослідженнями українських науковців у сфері цифрового маркетингу та аналітики даних [6, с. 15].

Потенціал штучного інтелекту активно використовується для глибокого аналізу великих масивів даних і прогнозування оптимального часу демонстрації рекламних повідомлень. Інтеграція технологій штучного інтелекту у системи підтримки прийняття рішень забезпечує перехід від масових підходів до індивідуалізованих комунікацій. Персоналізація рекламних повідомлень дає змогу враховувати не лише демографічні характеристики споживачів, а й їхні поведінкові та контекстуальні особливості, що суттєво підвищує ефективність взаємодії з аудиторією.

Зокрема, інтелектуальні алгоритми забезпечують структуровану оцінку ставок у системах програматик-реклами. Програматик-реклама (programmatic advertising) — це автоматизована технологія купівлі та розміщення цифрової реклами, що здійснюється за допомогою алгоритмів і систем штучного інтелекту в режимі реального часу. Її сутність полягає в автоматизації процесу закупівлі рекламних показів через спеціалізовані платформи, без безпосередньої участі людини. При цьому система аналізує дані про користувача (інтереси, поведінку, місцезнаходження, час активності тощо) та миттєво приймає рішення щодо доцільності демонстрації конкретного рекламного повідомлення.

Застосування таких підходів сприяє ефективному використанню автоматизованих механізмів прийняття рішень щодо розміщення рекламного контенту, орієнтованого на визначені цільові аудиторії. Це, своєю чергою, дозволяє підвищити точність таргетування,

оптимізувати витрати на рекламні кампанії та забезпечити зростання їх результативності [7, с. 132].

У транспортній галузі це особливо важливо, оскільки потреби користувачів можуть суттєво змінюватися залежно від часу, місця та мети поїздки.

Разом із тим, впровадження штучного інтелекту у системи підтримки прийняття рішень пов'язане з низкою викликів, серед яких необхідно відзначити питання захисту персональних даних, забезпечення прозорості алгоритмів, а також потребу у висококваліфікованих фахівцях. Окрім цього, значні інвестиції у технологічну інфраструктуру можуть виступати стримуючим фактором для окремих транспортних підприємств. Однак, незважаючи на ці труднощі, використання інтелектуальних систем є стратегічно важливим напрямом розвитку рекламної діяльності.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що використання штучного інтелекту в системах підтримки прийняття рішень є ефективним інструментом персоналізації реклами транспортних послуг. Застосування інтелектуальних алгоритмів дозволяє здійснювати глибокий аналіз даних, прогнозувати поведінку споживачів та формувати індивідуалізовані рекламні пропозиції, що відповідають їхнім потребам. Це сприяє підвищенню ефективності рекламних кампаній, оптимізації витрат та зміцненню конкурентних позицій транспортних підприємств.

Таким чином, інтеграція штучного інтелекту у системи підтримки прийняття рішень створює передумови для формування нової парадигми рекламної діяльності у транспортній галузі, що базується на даних, аналітиці та персоналізації. Перспективи подальших досліджень полягають у вдосконаленні алгоритмів обробки даних, розвитку технологій пояснюваного штучного інтелекту та розробці ефективних механізмів інтеграції інтелектуальних систем у практику управління транспортними підприємствами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Заячківська Г. А. Маркетингові можливості підприємств на основі штучного інтелекту. Трансформаційна економіка №2(07) 2024. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-8141/2024-7-3>
2. Рошко С. М., Гогерчак В. М. Перспективні напрями розвитку реклами в міжнародному бізнесі в умовах глобальних трансформацій. Сталий розвиток економіки. № 5(56), 2025. DOI: <https://doi.org/10.32782/2308-1988/2025-56-50>
3. Яшкіна О. І., Блажко Ю. М. Маркетингова інтернет-стратегія управління лояльністю з використанням штучного інтелекту. Економіка та суспільство. Випуск № 46/2022. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-007/2022-46-9>
4. Aggarwal C. C. Recommender Systems: The Textbook, Springer, 2016. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-29659-3>.
5. Голуб В. В. Роль маркетингової аналітики в адаптації маркетингової стратегії у сфері електронної комерції. Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Економічні науки. № 81, 2025. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-1205-2025-81-12>
6. Корсунова К. Ю. Штучний інтелект у дослідженні ринку та запуску рекламних кампаній: ефективні методи та етичні аспекти для міжнародного маркетингу. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля № 6 (276). 2022. DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-276-6-13-19>
7. Руденко М. В., Устик Т. В., Радзіховська Ю. М. Використання сучасних технологій у сфері реклами: світовий досвід та вітчизняні реалії. Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут». № 32, 2025. DOI: <https://doi.org/10.20535/2307-5651.32.2025.328554>

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ МОРСЬКОЇ НАВІГАЦІЇ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ АБО ПОРУШЕНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Веселовський Б.М., Григоров А.Д., Устенко Д.П.
Національний університет «Одеська морська академія»
(Україна)

Вступ. Сучасний розвиток морської галузі характеризується активним впровадженням цифрових технологій, автоматизації та систем штучного інтелекту у процеси управління суднами. Міжнародна морська організація (ІМО) визначила декілька рівнів автономності морських суден (MASS), що передбачає поступовий перехід від частково автоматизованих систем до повністю автономного судноплавства [1]. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, здатних забезпечувати безпечне судноводіння в умовах високого навігаційного навантаження.

Сучасні навігаційні комплекси значною мірою залежать від глобальних супутникових навігаційних систем (GNSS), таких як GPS та Galileo. Порухення роботи супутникової навігації внаслідок атак типу jamming або spoofing може призводити до втрати точності позиціонування та створювати критичні ризики для безпеки судноплавства. Додатковим фактором небезпеки залишається людський фактор – помилки судноводія, перевтома екіпажу та неправильна інтерпретація навігаційної обстановки.

Актуальність дослідження посилюється необхідністю забезпечення безпечної навігації в умовах нестабільної роботи GNSS у регіоні Чорного моря та підвищеного рівня радіоелектронної протидії. У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання технологій штучного інтелекту для аналізу навігаційної інформації, виявлення аномалій та підтримки прийняття рішень у режимі реального часу.

Метою роботи є аналіз можливостей застосування технологій штучного інтелекту для підвищення надійності та безпеки морської навігації в умовах обмеженої або порушеної навігаційної інформації.

Архітектура інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень (Decision Support System, DSS) є ключовим елементом сучасних автономних та напівавтономних суден.

Такі системи забезпечують аналіз навігаційної обстановки, оцінювання ризиків та підтримку оператора під час прийняття навігаційних рішень. Основною функцією DSS є формування ситуаційної обізнаності та допомога оператору або автоматизованій системі управління у виборі безпечних навігаційних рішень.

Первинна інформація надходить від гетерогенних сенсорних систем, до яких належать радары, автоматична ідентифікаційна система (AIS), камери видимого та інфрачервоного діапазонів, лазерні сканери (LIDAR), інерціальні навігаційні системи та метеорологічні датчики. Оскільки окремі сенсори мають власні обмеження та похибки, важливим етапом є злиття даних (Data Fusion).

Для обробки та узгодження навігаційної інформації використовуються розширені фільтри Калмана, байєсівські мережі та алгоритми ймовірнісного аналізу, що дозволяють підвищити точність позиціонування та зменшити вплив похибок окремих сенсорів. Такий підхід дозволяє формувати надійну модель навколишнього середовища, виявляти аномалії у роботі навігаційних систем та підвищувати стійкість системи до зашумлених або неповних даних.

У разі виявлення ознак spoofing-атаки система може автоматично зменшувати вагу даних GNSS та переходити на резервні джерела навігації – інерціальні системи або візуальну навігацію. Це забезпечує підтримання безпечного керування судном навіть в умовах часткової втрати супутникового сигналу.

Застосування штучного інтелекту для планування маневрів та уникнення зіткнень. У сучасних навігаційних комплексах значна увага приділяється автоматичному аналізу навігаційної ситуації та прогнозуванню розвитку подій у реальному часі.

Для розпізнавання об'єктів навколишнього середовища використовуються згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Network, CNN), які забезпечують виявлення суден та інших об'єктів у режимі реального часу.

Прогнозування траєкторій руху інших суден здійснюється за допомогою рекурентних нейронних мереж, здатних аналізувати часові послідовності навігаційних параметрів. Для задач планування маневрів та уникнення зіткнень застосовуються алгоритми глибокого навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning, DRL), які дозволяють системі формувати безпечні траєкторії руху [2].

Навчання агентів ШІ здійснюється у симуляторах морської навігації з урахуванням вимог Міжнародних правил попередження зіткнень суден (COLREGS) [2][3]. Під час навчання система отримує винагороду за безпечне розходження та штрафується за небезпечні маневри або порушення правил судноплавства.

Для оцінювання безпеки використовуються параметри мінімальної дистанції зближення (CPA) та часу до найкоротшого зближення (TCPA), що дозволяє прогнозувати ризик небезпечного зближення суден та формувати оптимальні траєкторії руху.

Інтеграція ШІ з традиційними методами навігації. Незважаючи на широке використання супутникових систем, традиційні методи навігації залишаються важливими резервними засобами забезпечення безпеки судноплавства. До таких методів належать інерціальні навігаційні системи, радіонавігаційні засоби та елементи астрономічної навігації.

Перспективним напрямом є створення гібридних навігаційних систем, у яких штучний інтелект забезпечує обробку та узгодження інформації з різних джерел [4]. Особливу увагу приділяють системам візуальної навігації (Vision-based Navigation), які використовують згорткові нейронні мережі для розпізнавання берегових орієнтирів та навігаційних знаків [4].

Порівняння отриманих візуальних даних з електронними навігаційними картами дозволяє визначати координати судна навіть у разі втрати сигналу GNSS. Це суттєво підвищує надійність навігаційного комплексу, знижує залежність від супутникових систем та зменшує кількість помилок через людський фактор.

Explainable AI як фактор безпеки та довіри. Однією з основних проблем використання нейронних мереж у морській галузі є недостатня прозорість процесу прийняття рішень. Судноводії та регуляторні органи повинні розуміти логіку роботи системи для забезпечення довіри до автономних технологій.

Для вирішення цієї проблеми застосовуються методи пояснюваного штучного інтелекту (Explainable AI, XAI), які дозволяють оцінити вплив окремих факторів на прийняте рішення та підвищити прозорість роботи системи [5]. Додатково використовуються механізми Attention, що дають змогу визначити, на які об'єкти система звертає найбільшу увагу під час аналізу навігаційної ситуації [5].

Використання Explainable AI є важливою умовою сертифікації автономних систем та їх відповідності міжнародним вимогам безпеки.

Висновки. У роботі проведено аналіз сучасних підходів до забезпечення безпеки морської навігації із застосуванням технологій штучного інтелекту. Встановлено, що інтеграція DSS, алгоритмів глибокого навчання та методів злиття сенсорних даних дозволяє суттєво підвищити надійність навігаційних систем.

Застосування CNN, рекурентних нейронних мереж та алгоритмів DRL забезпечує ефективне прогнозування навігаційної обстановки, автоматичне планування маневрів та зниження ризику зіткнень відповідно до вимог COLREGS.

Інтеграція штучного інтелекту з традиційними методами навігації створює передумови для побудови гібридних систем, стійких до порушення роботи GNSS та зовнішніх радіоелектронних впливів.

Використання технологій Explainable AI підвищує прозорість рішень DSS та рівень довіри до автономних систем з боку судноводіїв і регуляторних органів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на практичну реалізацію та тестування інтелектуальних навігаційних систем у тренажерних і реальних умовах експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Maritime Organization. Outcome of the Regulatory Scoping Exercise for the Use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). London: IMO, 2021.
2. Zaccone R. A Dynamic Programming Approach to the Collision Avoidance of Autonomous Ships. *Mathematics*. 2024. Vol. 12, Issue 10. P. 1546.
3. Zhou X., Wu P., Zhang H., Guo W., Liu Y. An Improved NSGA-II Algorithm for MASS Autonomous Collision Avoidance under COLREGs. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 7. P. 1224.
4. Levander O. A Concept for Autonomous Ships. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2017. Vol. 231, No. 3. P. 594–604.
5. Lundberg S. M., Lee S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. P. 4765–4774.

ЦИФРОВІ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ ЯК ОСНОВА АДАПТИВНОЇ РЕКЛАМИ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ

Гавриш П. А.

Рекламна агенція «LeadIn»

(Україна)

Вступ. У сучасних умовах цифровізації економіки та стрімкого розвитку інформаційних технологій транспортна галузь зазнає суттєвих трансформацій, що охоплюють не лише виробничо-логістичні процеси, а й комунікаційну та рекламну діяльність підприємств. Зростання конкуренції на ринку транспортних послуг, підвищення вимог споживачів до якості сервісу, а також динамічність попиту зумовлюють необхідність впровадження нових підходів до управління рекламою. У цьому контексті особливого значення набувають цифрові системи підтримки прийняття рішень, які дозволяють здійснювати комплексний аналіз даних, прогнозувати поведінку споживачів та формувати адаптивні рекламні стратегії.

Як зазначають українські дослідники, цифрові технології та маркетингові комунікації дедалі більше орієнтуються на персоналізацію, аналітику великих даних і адаптивність, що забезпечує підвищення ефективності взаємодії з клієнтами та формування довгострокової цінності для споживача [1, с. 157].

Зокрема, впровадження інтелектуального управління клієнтським досвідом поєднує прогнозну аналітику і автоматизовані рішення, що створює передумови для більш точного налаштування рекламних кампаній.

Крім того, у наукових працях підкреслюється, що використання цифрових комунікацій та інструментів SMM сприяє індивідуалізованій взаємодії зі споживачами на всіх етапах прийняття рішення про купівлю, що є ключовим фактором ефективності сучасної реклами [2, с. 23].

Таким чином, інтеграція цифрових систем підтримки рішень у рекламну діяльність транспортних підприємств дозволяє перейти від традиційних масових комунікацій до гнучких, персоналізованих та клієнтоорієнтованих моделей взаємодії.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що традиційні підходи до організації рекламної діяльності у транспортній галузі часто базуються на обмежених даних, інтуїтивних рішеннях або застарілих методах аналізу ефективності. Водночас сучасне цифрове середовище генерує значні обсяги даних, що надходять із різних джерел: систем бронювання, мобільних додатків, GPS-трекінгу, соціальних мереж, веб-аналітики та CRM-систем. Обробка та інтерпретація таких даних без використання інтелектуальних систем є складною і малоефективною. Саме тому впровадження цифрових систем підтримки рішень дозволяє перейти до більш обґрунтованого, гнучкого та результативного управління рекламною діяльністю, що є критично важливим для транспортних підприємств у сучасних умовах.

Постановка задачі полягає у визначенні ролі цифрових систем підтримки прийняття рішень у формуванні адаптивної реклами в транспортній галузі, а також у дослідженні їх впливу на ефективність рекламних кампаній.

Результати дослідження свідчать, що цифрові системи підтримки прийняття рішень у транспортній галузі виконують комплекс взаємопов'язаних функцій, які безпосередньо впливають на підвищення ефективності та якості рекламної діяльності. В умовах цифровізації особливого значення набуває використання інноваційних технологій, зокрема інструментів аналітики даних, моделей SMM-стратегії (Social Media Marketing), а також концепції H2H (Human-to-Human), яка орієнтує комунікацію на встановлення довірливих і персоналізованих взаємин із клієнтом. Такий підхід дозволяє не лише транслявати рекламні повідомлення, а й формувати стійкий емоційний зв'язок зі споживачем, що є особливо важливим у сфері транспортних послуг [3, с. 92].

Передусім цифрові системи підтримки прийняття рішень забезпечують інтеграцію різномірних потоків даних у єдине інформаційно-аналітичне середовище, що охоплює дані з CRM-систем, мобільних додатків, систем бронювання, соціальних мереж і веб-аналітики. Узагальнення цих даних дозволяє отримати цілісне уявлення про поведінку клієнтів, їхні вподобання та частоту користування транспортними послугами, що створює основу для глибокої сегментації аудиторії та розробки персоналізованих рекламних повідомлень.

Важливим компонентом таких систем є використання інтелектуальних алгоритмів, зокрема методів машинного навчання, які забезпечують автоматизований аналіз даних і підтримку управлінських рішень. Це дає змогу прогнозувати попит, визначати ефективні канали комунікації та оцінювати результативність рекламних кампаній у режимі реального часу. У результаті рекламна діяльність набуває адаптивного характеру, оскільки може динамічно змінюватися залежно від поведінки споживачів і ринкових умов.

Як зазначає О. Самардак, поєднання цифрових комунікацій та аналітичних систем забезпечує оперативне реагування на зміни у споживчому середовищі й сприяє переходу від масової реклами до персоналізованих, клієнтоорієнтованих моделей взаємодії [3, с. 98].

Таким чином, інтеграція цифрових систем підтримки прийняття рішень, інструментів SMM та підходу H2H забезпечує формування нової парадигми рекламної діяльності у транспортній галузі. Вона базується на глибокому розумінні потреб клієнтів, використанні інтелектуальних технологій та здатності до швидкої адаптації, що в підсумку сприяє підвищенню ефективності комунікацій і конкурентоспроможності транспортних підприємств.

Застосування цифрових систем підтримки рішень підвищує точність таргетування реклами. Аналіз геолокації, часу користування, історії поїздок і взаємодії з платформами дозволяє створювати релевантні пропозиції для різних груп користувачів. Наприклад, постійним пасажиром міжміських перевезень пропонуються знижки, а туристам — реклама популярних напрямків і сервісів. Використання цифрової аналітики та Big Data забезпечує точнішу сегментацію і більш ефективне персоналізоване таргетування [4].

Окрім цього, цифрові системи підтримки рішень забезпечують можливість оперативного моніторингу результатів рекламних кампаній та їх коригування. Використання аналітичних панелей (дашбордів) дозволяє відстежувати ключові показники ефективності, такі як рівень залучення аудиторії, конверсія, вартість залучення клієнта та інші. Це створює умови для прийняття обґрунтованих управлінських рішень та оптимізації рекламного бюджету. У наукових працях підкреслюється, що цифрові маркетингові інструменти забезпечують безперервний моніторинг ефективності комунікацій та дозволяють оперативно коригувати стратегії просування на основі аналітичних даних, що суттєво підвищує результативність рекламної діяльності [5].

Слід також зазначити, що впровадження адаптивної реклами на основі цифрових систем підтримки рішень сприяє підвищенню конкурентоспроможності транспортних підприємств. Завдяки більш точному розумінню потреб клієнтів та можливості швидкого реагування на зміни ринку підприємства можуть формувати більш ефективні комунікаційні стратегії, підвищувати рівень задоволеності споживачів та зміцнювати свою позицію на ринку.

Разом із тим, впровадження таких систем супроводжується низкою викликів, серед яких слід виділити необхідність значних інвестицій у технологічну інфраструктуру, забезпечення захисту персональних даних, а також підготовку кваліфікованих кадрів, здатних працювати з аналітичними інструментами. Як зазначають українські науковці, цифрова трансформація підприємств вимагає комплексних змін, включаючи модернізацію IT-інфраструктури, розвиток цифрових компетентностей персоналу та впровадження ефективних механізмів управління даними, що пов'язано з додатковими витратами та організаційними труднощами. Водночас наголошується, що саме інвестиції у цифрові технології забезпечують довгострокові конкурентні переваги підприємств [6].

Однак переваги, які надають цифрові системи підтримки прийняття рішень, значно

перевищують зазначені труднощі, що підтверджує доцільність їх широкого впровадження у транспортній галузі. У наукових дослідженнях підкреслюється, що використання аналітичних систем та інтелектуальних технологій сприяє підвищенню ефективності управління, оптимізації витрат і покращенню якості обслуговування споживачів [7].

Висновки. Дослідження показало, що цифрові системи підтримки прийняття рішень є ключовим інструментом адаптивної рекламної діяльності у транспортній галузі. Вони забезпечують інтеграцію та аналіз даних, персоналізацію повідомлень, підвищення точності таргетування та оперативне коригування кампаній. Використання інтелектуальних алгоритмів сприяє переходу від традиційних підходів до управління рекламою до більш гнучких і ефективних моделей управління рекламою.

Адаптивна реклама на основі таких систем підвищує ефективність і конкурентоспроможність транспортних підприємств. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію штучного інтелекту та вдосконалення оцінки ефективності рекламних стратегій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Чайковська І. Цифрові технології як драйвер підвищення ефективності маркетингових комунікацій. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2026. Т. 350. № 1. С. 153–158. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2026-350-19>
2. Андрушкевич З., Бойко Р. Digital-комунікації - сучасний вектор маркетингового розвитку компаній. Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2024. № 3. С. 21–25. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-330-3>
3. Самардак О. Інтелектуальні маркетингові інформаційні системи. The international scientific and practical journal commodities and markets, 53(1), 92–109. DOI: [https://doi.org/10.31617/2.2025\(53\)05](https://doi.org/10.31617/2.2025(53)05)
4. Ковальчук С. В., Михайлова Л. І. Використання Big Data у цифровому маркетингу підприємств. Економіка та суспільство. 2023. № 40. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-40-12>
5. Гуменна О. В., Іщенко Т. Д. Цифрові маркетингові інструменти в системі управління підприємством. Інфраструктура ринку. 2020. № 46. DOI: <https://doi.org/10.32843/infrastructure46-15>
6. Краус К. М., Краус Н. М. Цифрова трансформація підприємств: виклики та можливості. Економіка та суспільство. 2021. № 32. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-32-6>
7. Матвійчук Л. О., Польовий П. В. Цифровізація управління підприємством в умовах розвитку інформаційних технологій. Вісник Хмельницького національного університету. 2022. № 6. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2022-312-10>

КЛАСТЕРИЗАЦІЯ МІСЬКИХ МАРШРУТІВ ЗА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ УМОВАМИ

Гілевич В.В., Півторак Г.В., Суслов В.В., Ляхович В.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

(Україна)

Вступ. Сучасні міста відзначаються активним розвитком транспортних систем, зростанням мобільності населення та ускладненням структури переміщень. За таких умов міський громадський транспорт (ГТ) набуває особливо важливого значення, оскільки забезпечує доступність територій, сприяє зменшенню навантаження на вулично-дорожню мережу та підвищує якість життя населення [1]. Рівень ефективності його функціонування значною мірою визначається раціональністю побудови маршрутної мережі, яка має відповідати як фактичним умовам експлуатації, так і потребам користувачів.

Однією з ключових проблем організації міських перевезень є суттєва неоднорідність маршрутів за їх характеристиками. Вони відрізняються за довжиною, інтенсивністю руху, тривалістю функціонування, конфігурацією траси та іншими параметрами. У зв'язку з цим використання уніфікованих підходів до управління всією маршрутною мережею не забезпечує належної ефективності.

Актуальність теми. Традиційні методи аналізу транспортних систем часто є обмеженими у врахуванні багатовимірності даних і складних взаємозв'язків між показниками [2]. Саме тому дедалі більшого поширення набувають методи багатовимірного статистичного аналізу, які дають змогу обробляти значні обсяги інформації та виявляти приховані закономірності. Одним із таких методів є кластерний аналіз, що дозволяє групувати об'єкти за ступенем їх подібності за сукупністю ознак.

Використання кластеризації у транспортній сфері відкриває широкі аналітичні можливості. Зокрема, це дозволяє систематизувати маршрути за умовами їх функціонування, визначати їхню роль у транспортній системі, виявляти проблемні ділянки та обґрунтовувати управлінські рішення. Дослідження, присвячене кластеризації міських маршрутів за умовами експлуатації, є актуальним як у теоретичному, так і в практичному аспектах, оскільки сприяє підвищенню ефективності транспортних систем і якості управління ними.

Постановка задачі. Метою роботи є розбиття множини маршрутів ГТ на однорідні групи (кластери) на основі сукупності показників, що характеризують їхні умови експлуатації. Робота виконана на основі даних маршрутної мережі міста Львова.

Результати досліджень. Теоретичну основу процедури кластеризації складає метод *k*-середніх, який дозволяє групувати об'єкти за принципом мінімізації внутрішньокластерної дисперсії [3]. Множина маршрутів міського ГТ $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ описується набором характеристик, що відображають умови його експлуатації $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}\}$. Метою є розбиття множини маршрутів на n кластерів таким чином, щоб маршрути в межах одного кластера мали подібні умови експлуатації.

Враховуючи доступні для аналізу дані, для кластеризації використано такі показники умов експлуатації маршрутів:

- частота руху (показник, обернений до інтервалу руху) f_i ;
- довжина маршруту L_i ;
- транспортна робота, представлена сумарним пробігом транспортних засобів за певний період часу W_i ;
- тривалість роботи протягом дня H_i ;
- коефіцієнт непрямолінійності маршруту k_i ;

- середня відстань між зупинками l_i .

Оскільки ці показники мають різні одиниці вимірювання, для подальшого опрацювання необхідно виконати їх нормалізацію. В роботі використано метод стандартної нормалізації (на основі середніх значень показників та їх стандартних відхилень) [4].

Міська система маршрутного громадського транспорту Львова включає 72 маршрути, серед яких 8 трамвайних, 10 тролейбусних і 54 автобусних. Зведена інформація про основні експлуатаційні показники маршрутів подана в табл. 1.

Таблиця 1 — Дані для подальшої нормалізації показників маршрутів

Параметр	Мінімальне значення	Максимальне значення	Середнє значення	Стандартне відхилення
Довжина маршруту, км	5,3	25,3	13,59	5,24
Частота руху, рейсів/год	0,6	15	4,35	2,66
Транспортна робота, авт·км/год	4,48	164,6	54,3	32,2
Тривалість роботи, год	10,9	17,33	15,14	1,41
Коефіцієнт непрямолінійності	1,09	5,28	1,69	0,53
Середня відстань між зупинками, км	0,387	0,911	0,517	0,097

У результаті нормалізації сформовано узгоджений набір безрозмірних показників, придатних для подальшого багатовимірного аналізу. Кластеризація виконана з використанням програмного продукту Orange. Для візуалізації результатів групування об'єктів у двовимірному просторі використано метод головних компонент. Цей метод забезпечує зниження розмірності даних шляхом переходу від початкового набору взаємопов'язаних змінних до нових, незалежних між собою компонент, які є лінійними комбінаціями вихідних показників. Кожна наступна компонента пояснює меншу частку загальної варіації даних, тоді як перші дві компоненти зберігають найбільшу частину інформації про структуру вибірки (рис. 1), що дозволяє відобразити об'єкти на площині без суттєвої втрати змістовної інформації. При цьому кожна точка на графіку відповідає окремому маршруту, а їх просторове розташування відображає ступінь подібності: чим ближче розташовані точки, тим більш схожими є маршрути за сукупністю розглянутих показників.

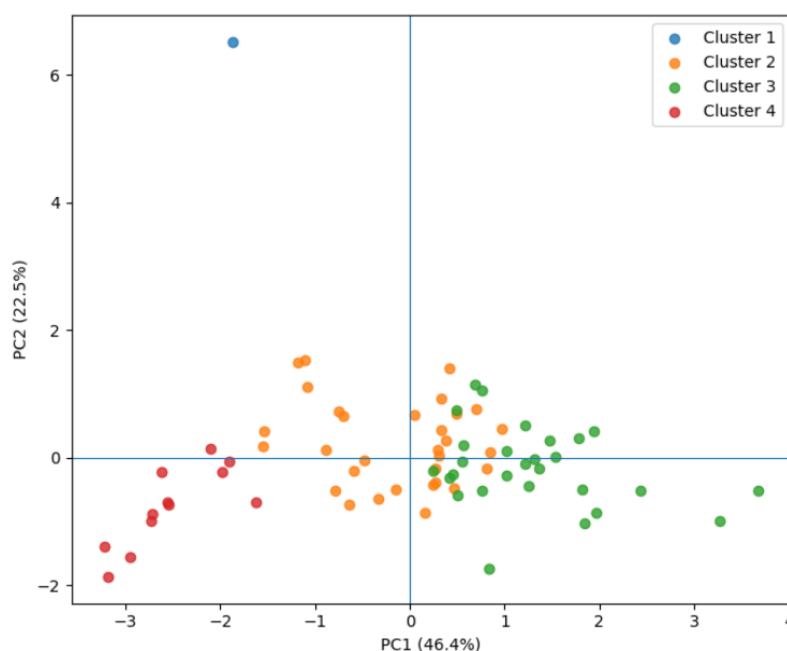


Рисунок 1 — Візуалізація результатів кластеризації у просторі головних компонент

У результаті отримано 4 кластери: перший кластер налічує 26 маршрутів, другий кластер – 16 маршрутів, третій кластер — 29 маршрутів і 4 кластер — 1 маршрут. В табл. 2 подано фактичні значення показників, якими характеризуються утворені кластери.

Таблиця 2 — Основні характеристики утворених кластерів маршрутів ГТ Львова

Значення показника	Частота	Транспортна робота	Тривалість роботи	Коефіцієнт непр-сті	Середня відстань між зупинками
Кластер 1					
Мінімальне значення	0,7	5,5	13,5	1,5	0,4
Максимальне значення	7,5	164,6	16,83	2,4	0,6
Середнє значення	4,38	71,60	15,45	1,90	0,48
Медіана	4,62	70,75	15,48	1,89	0,48
Кластер 2					
Мінімальне значення	0,6	4,5	10,92	1,2	0,4
Максимальне значення	3,0	64,9	15,0	2,0	0,9
Середнє значення	1,62	25,46	13,07	1,69	0,62
Медіана	1,33	23,23	13,45	1,66	0,58
Кластер 3					
Мінімальне значення	2,7	20,5	14,83	1,1	0,4
Максимальне значення	15,0	114,1	17,33	1,8	0,6
Середнє значення	5,95	56,20	15,97	1,38	0,50
Медіана	5,00	48,67	15,83	1,35	0,48
Кластер 4					
Фактичні значення	0,9	10,87	16,0	5,28	0,423

Кластер 1 характеризується середніми значеннями частоти та часу роботи, підвищеним рівнем транспортної роботи та помірно збільшеним коефіцієнтом непрямолінійності. При цьому середня відстань між зупинками є нижчою за середню по вибірці. Цей кластер можна інтерпретувати як групу маршрутів із достатньо інтенсивною експлуатацією, що виконують значний обсяг транспортної роботи, однак мають певні елементи непрямолінійності траси. Це маршрути, які обслуговують декілька функціональних зон міста та виконують розгалужену зв'язуючу роль.

Кластер 2 відзначається зниженими значеннями частоти руху, транспортної роботи та часу функціонування. Водночас для нього характерна підвищена середня відстань між зупинками. Ця група маршрутів має ознаки менш інтенсивної експлуатації та відповідає в більшості периферійним або допоміжним напрямкам із меншою щільністю обслуговування. Збільшена відстань між зупинками свідчить про орієнтацію на довші міжрайонні або напівприміські сполучення.

Кластер 3 — найбільша за кількістю група. Вона характеризується підвищеною частотою руху, відносно тривалим часом роботи та зниженим коефіцієнтом непрямолінійності. Це дозволяє трактувати даний кластер як групу «опорних» або магістральних маршрутів, які мають інтенсивний режим роботи та більш прямолінійну конфігурацію траси. Саме ці маршрути формують основу транспортної мережі та забезпечують основні пасажиропотоки.

До кластеру 4 виділено один маршрут із різко вираженим відхиленням за коефіцієнтом непрямолінійності. Його значення суттєво перевищує середні показники вибірки, що свідчить про атипову геометрію траси та наявність специфічних експлуатаційних умов. Такий результат можна трактувати як статистичний викид. Він потребує окремого аналізу, оскільки є наслідком особливої просторової структури маршруту.

Висновки. Отримані результати кластеризації міських маршрутів за умовами експлуатації дозволяють формувати певні рекомендації щодо підвищення ефективності функціонування маршрутної мережі та якості транспортного обслуговування населення. Крім того, результати кластеризації можуть бути використані для раціонального розподілу рухомого складу між маршрутами, планування розвитку маршрутної мережі та обґрунтування управлінських рішень у сфері міського транспорту. Зокрема, виділення груп маршрутів із подібними умовами експлуатації дозволяє застосовувати типові підходи до їх організації та оптимізації. Подальші дослідження будуть спрямовані на оцінку попиту на перевезення на маршрутах, що належать до різних кластерів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Півторак Г., Суслов В. До вивчення різниці між фактичною та сприйнятою доступністю послуг громадського транспорту. Інноваційні технології розвитку машинобудування та ефективного функціонування транспортних систем : збірник тез VI Всеукраїнської науково-технічної інтернет-конференції, 27–28 листопада 2025 р., Рівне. 2025. С. 307–309.
2. Multimodal urban mobility and multilayer transport networks / L. Alessandretti et al. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*. 2023. Vol. 50, iss. 8. P. 2038–2070. URL: <https://doi.org/10.1177/23998083221108190>.
3. Kaushik M., Mathur B. Comparative study of K-means and hierarchical clustering techniques. *International Journal of Software & Hardware Research in Engineering*. 2014. Vol. 2, iss. 6. P. 93–98.
4. Ткачик О. А. Методи та засоби кластеризації різнотипових даних : дис. ... д-ра філософії у галузі 12 Інформ. технології : 122 Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2023. 149 с.

ВИКОРИСТАННЯ ШІ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ В РАЙОНАХ З ІНТЕНСИВНИМ РУХОМ

Дорофєєв М.В., Астайкін Д.В.

*Національний університет «Одеська морська академія»
(Україна)*

Вступ. Зростання інтенсивності світового судноплавства та збільшення розмірів суден висувають нові вимоги до систем забезпечення безпеки навігації. Райони з інтенсивним рухом зокрема системи розділення руху (TSS), вузькості та підходи до великих портів, характеризуються високою щільністю трафіку, обмеженим простором для маневрування та поганими гідрометеорологічними умовами. У таких зонах надмірна концентрація флоту підвищує імовірність виникнення критичних ситуацій, де традиційні методи оцінки ризиків можуть виявитися недостатньо оперативними або точними.

Метою даної доповіді є огляд сучасних підходів до оцінки імовірності небезпечного зближення суден з використанням математичного моделювання та інструментів штучного інтелекту.

Актуальність теми. У сучасних умовах забезпечення безпеки мореплавства важливим завданням є вдосконалення методів мінімізації ризиків зіткнень у районах з інтенсивним трафіком. Значний потенціал для цього вбачається у поступовому переході від традиційних підходів до обробки даних до використання предиктивних інтелектуальних систем. Зі зростанням швидкостей та габаритів суден можливості людини щодо оперативного аналізу складних ситуацій зближення стають обмеженими, що робить впровадження технологій штучного інтелекту критично необхідним для нівелювання «людського фактору». ШІ-алгоритми здатні забезпечити безперервний моніторинг динамічних параметрів руху багатьох цілей одночасно, гарантуючи високу точність прогнозування небезпечних ситуацій та достовірність прийнятих рішень у режимі реального часу.

Отже, розробка та наукове обґрунтування методів застосування штучного інтелекту для автоматизованого запобігання зіткненням є надзвичайно актуальною задачею, що безпосередньо впливає на безпеку судноводіння. Дослідження в цьому напрямі становлять фундамент для створення інтелектуальних систем управління, які здатні не лише завчасно виявляти загрози, а й автоматично розраховувати оптимальні маневри ухилення, що сприяє підвищенню навігаційної безпеки.

Постановка задачі. Морський транспортний сектор сьогодні виступає системоутворювальним елементом світової економіки, забезпечуючи понад 80% обсягу глобального торговельного обігу. З огляду на стратегічну роль морських перевезень у глобальній економіці, питання гарантування безпеки мореплавства залишається актуальним та значущим напрямом науково-технологічного розвитку галузі. Попри значний прогрес у технічному оснащенні сучасного флоту, рівень аварійності залишається стабільно високим, що зумовлює необхідність перегляду базових підходів до управління навігаційними ризиками.

Аналіз статистичних даних профільних організацій (ІМО, EMSA) підтверджує системну проблему: від 75% до 96% усіх інцидентів на морі безпосередньо пов'язані з деструктивним впливом «людського фактору»: втому, обмежену видимість або помилкову оцінку ситуації [1].

Традиційні навігаційні системи мають суттєві обмеження щодо кількості об'єктів, які можуть одночасно супроводжуватися, що створює суттєві ризики в районах з високою щільністю трафіку. Розрахунок параметрів зближення в таких засобах базується на лінійній екстраполяції, яка не враховує реальні маневри суден на вигинах фарватерів і часто призводить до помилкових прогнозів. Через відсутність інтелектуальної пріоритезації цілей традиційне обладнання генерує надмірну кількість хибних алармів, що провокує небезпечне

явище «втоми від тривоги» у вахтового офіцера.

Слід також враховувати вплив стресу на психофізіологічний стан людини, що безпосередньо зумовлює ймовірнісний характер помилок під час прийняття рішень у складних навігаційних ситуаціях. Крім того, традиційні засоби радіолокаційної прокладки аналізують рух цілей ізольовано від навігаційного контексту, не враховуючи межі систем розділення руху та реальні глибини, що обмежують безпечний маневр ухилення.

Таким чином, завантажені акваторії вимагають якісно нових підходів до управління безпекою через високу щільність цілей та обмеженість простору для маневру. За таких умов впровадження інтелектуальних систем може розглядатися як перспективний напрям зважаючи на здатність ШІ-алгоритмів до ефективної обробки великих обсягів інформації. Це, потенційно, дозволить виявляти ризики на ранніх етапах, що дозволяє доповнити та розширити можливості стандартного навігаційного обладнання [2].

Використання штучного інтелекту для виявлення загроз у морі ґрунтується на застосуванні алгоритмів розпізнавання образів і виявлення аномалій. Такі системи здатні аналізувати динаміку руху суден та розпізнавати нетипову поведінку об'єктів, що може свідчити про піратську активність, незаконний вилов риби або інші потенційно небезпечні дії. Інтелектуальні алгоритми підвищують ефективність систем раннього попередження та забезпечують своєчасне реагування на можливі інциденти. На Рис.1 відображено інтерфейс платформи Orca AI та процес візуалізації навігаційних параметрів у режимі реального часу.

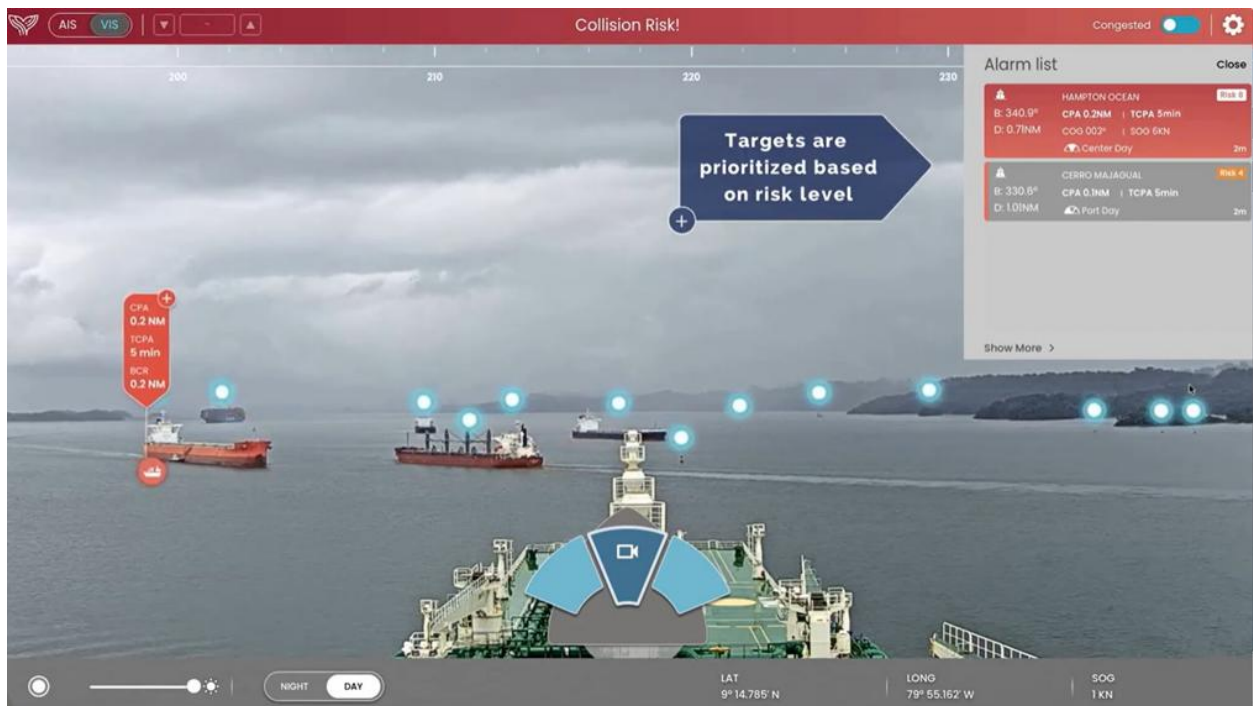


Рисунок 1 — Візуалізації навігаційних параметрів у режимі реального часу у платформі Orca AI

У той же час, застосування предиктивних моделей штучного інтелекту в акваторіях з інтенсивним судноплавством дозволяє трансформувати підхід до оцінки ситуації: від статичної лінійної екстраполяції траєкторій, притаманної системам САРП, до імовірнісного прогнозування поведінки всіх учасників руху. В основі такого методу лежить аналіз величезних масивів даних, включаючи геометрію фарватерів, гідрометеорологічні умови, а також динамічні параметри судна. Це створює передумови для формування адаптивних сценаріїв маневрування в реальному часі, що дозволяє екіпажу отримувати випереджальні сповіщення для оптимізації курсу та швидкості задля попередження зіткнення. Крім того, здатність системи до багатофакторного аналізу сприяє запобіганню «ефекту доміно», забезпечуючи вибір таких маневрів розходження, які мінімізують ризик виникнення

вторинних небезпечних зближень з іншими об'єктами в умовах обмеженого простору [3].

Таким чином, інтеграція технологій штучного інтелекту у процеси забезпечення морської безпеки здатна суттєво підвищити безпеку судноплавства. Використання інтелектуальних систем дозволяє не лише швидко реагувати на загрози, але й передбачати їх виникнення, що становить основу сучасної концепції проактивної безпеки у мореплавстві.

Результати досліджень. Ефективність такого підходу підтверджується галузевими даними: згідно останнього звіту компаній Orca AI, підтвердженого страховою компанією North Standard, супроводжувалося вимірюванням зниження кількості небезпечних зближень високого ступеня ризику в перевантажених судноплавних коридорах. Зокрема, у Північному та Балтійському морях цей показник знизився на 36%, а в Південнокитайському та Японському морях — на 18% [4].

Ці показники переконливо свідчать, що використання ШІ у морській навігації є не просто технологічною інновацією, а важливим етапом еволюції морського транспорту.

Висновки. Сучасні технології та штучний інтелект (ШІ) стають ключовими чинниками трансформації судноводіння, дозволяючи мінімізувати вплив людського фактора – головної причини більшості морських інцидентів. Інтелектуальні системи дають змогу ефективно реалізувати Правило 7 МППЗС (COLREG) на всіх етапах виникнення ризику зіткнення. Завдяки злиттю та аналізу величезного обсягу даних із багатьох сенсорів та прогнозуванню траєкторій у реальному часі, ШІ забезпечує судноводія чіткістю та оперативністю рішень, яких вимагають сучасні умови інтенсивного судноплавства.

Така інтеграція не замінює моряка, а трансформує роль судноводія, перетворюючи його на стратегічного контролера. Він верифікує пропозиції автоматизованих комплексів і приймає остаточне рішення щодо запобігання зіткненню суден. [5].

Проте масштабне розгортання таких систем потребує системного вирішення питань кіберзахисту, верифікації надійності алгоритмів (зокрема, через інструменти Explainable AI) та оновлення міжнародного правового регулювання під егідою ІМО. Ключовим фактором сталого розвитку галузі стане досягнення стійкого балансу, за якого глибинна автоматизація не нівелює, а підсилює належний контроль з боку людини, залишаючи за нею фінальне право прийняття рішень у критичних ситуаціях.

ЛІТЕРАТУРА

1. MacKinnon S. N., Weber R., Olindersson F., and Lundh M. Artificial Intelligence in Maritime Navigation: A Human Factors Perspective/In book: Advances in Human Aspects of Transportation, N. Stanton (Ed.): AHFE 2020, AISC 1212, pp. 429-435.
2. Takahashi, Koya & Zama, Kaito & Hiroi, Noriko. (2024). Ship trajectory prediction using AIS data with TransFormer-based AI. 1302-1305. 10.1109/CAI59869.2024.00230.
3. Pan, Rongjun & Zhang, Wei & Wang, Shijie & Kang, Shuhua. (2025). Deep reinforcement learning model for Multi-Ship collision avoidance decision making design implementation and performance analysis. Scientific Reports. 15. 10.1038/s41598-025-05636-3.
4. The Automated Safety & Navigation Report 2024 / Orca AI, NorthStandard. 2024. 32 p. URL: <https://www.orca-ai.io/reports/safety-report-2024> (дата звернення: 03.05.2026).
5. Kilinc, Noah. (2025). A Strategic Framework for Human-Centric Maritime Automation: The AI-Powered Digital Captain. 10.13140/RG.2.2.22007.07846.

UDK 656.61.052:681.51

ROUTE OPTIMIZATION OF A VESSEL'S WITH ADDITIONAL WIND PROPULSIONS

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

Introduction. According to the International Maritime Organization, carbon emissions from ships will increase by 50% by 2050 compared to 2008 [1]. Therefore, effective technologies for reducing CO₂ emissions into the atmosphere are urgently needed [2]. Among such technologies that are already used today are the use of environmentally friendly fuels, solar and wind energy, improvement of power plants, use of hybrid energy systems, aerodynamic optimization of the sail profile, use of different types of wind turbines, design solutions, improvement of automatic control systems for wind turbines, etc. Wind turbines (WAPS – Wind Additional Propulsion Systems) deserve special attention, which, compared to other technologies, have advantages due to low operating costs, a mature technical base and wide adaptability [3]. The use of automation and optimization of WAPS control processes allows to achieve a further increase in their efficiency. The authors have previously developed methods for automating ship control processes with WAPS [4, 5], as well as related methods for solving divergence problems [6], optimal control [7–9], and dynamic positioning [10, 11], including using redundant structures [12–14], mathematical [15, 16], and neural network [17, 18] models. A simulation stand based on the NAVI Trainer 5000 simulator [19] was also developed to test automatic control modules.

Relevance of the research. Wind propulsion systems of modern vessels can create additional thrust if aerodynamic flow incidence angle on the vessel diametrical plane is $|\beta| \geq (30 - 40)^\circ$. For flow incidence angles $|\beta| < 30^\circ$, in most cases on sports vessels, they use movement with right and left tacks, which allows to increase the angle of incidence of the aerodynamic flow on the diametrical plane of the vessel and the thrust force of the sails. The speed of movement along the course line (given route) depends on the choice of the right and left tacks course, and therefore, there is a maximum speed of movement along the course line and optimal courses of the right and left tacks. Optimal courses of the right and left tacks form an optimal trajectory, which ensures the maximum speed of movement along a given route. In open sources, the authors have not found methods for calculating the optimal trajectory of movement of a vessel with tacks in automated systems. Therefore, the development of such methods is a relevant scientific and technical task.

Problem statement. To develop a method for automatic control of the vessel movement with additional wind propulsions, which would ensure the vessel's movement at sharp angles of headwind $|\beta| < 30^\circ$.

Research results. Fig. 1 shows a scheme of movement by tacks, where ΔWd is the relative wind speed vector, β is the run in angle of the aerodynamic flow when moving along the course line, R_1^a is the aerodynamic force of the sail when moving on the right tack, F_{T1} is the thrust force of the sail when moving on the right tack, ΔK_1 is the course change for moving on the right tack, β_1 — is the run in angle of the aerodynamic flow when moving on the right tack, F_{T2} is the thrust force of the sail when moving on the left tack, ΔK_2 is the course change for moving on the left tack, β_2 is the run in angle of the aerodynamic flow when moving on the left tack.

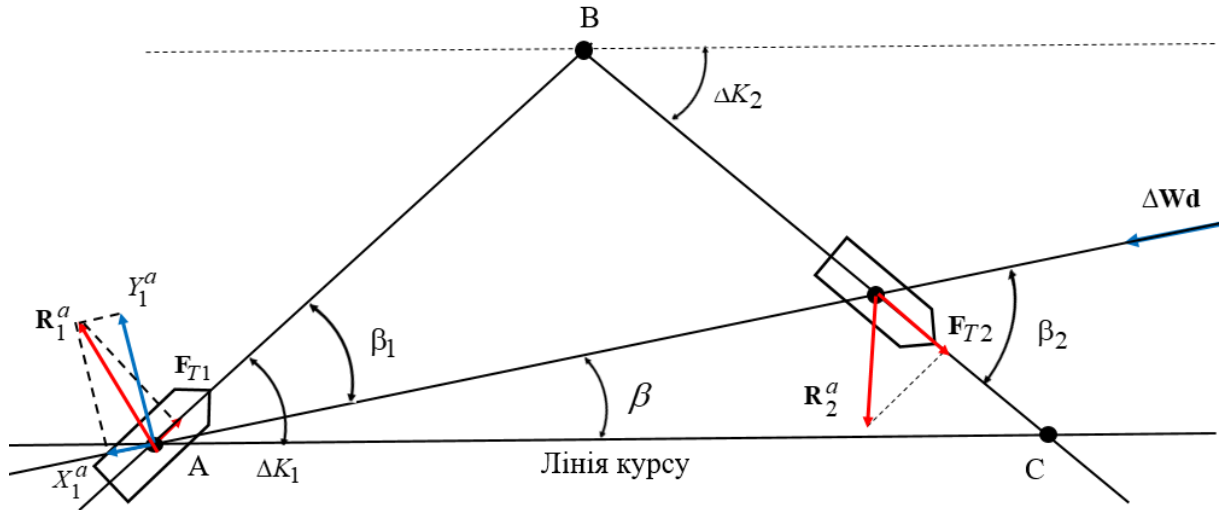


Figure 1 — Scheme of movement by tacks

The thrust force of the sail, when ship moves on starboard tack, is equal to

$$F_{T1} = Y_1^a \sin \beta_1 - X_1^a \cos \beta_1. \quad (1)$$

The projection of the sail's thrust onto the course line is equal to

$$F_{T1CL} = (Y_1^a \sin \beta_1 - X_1^a \cos \beta_1) \cos \Delta K_1. \quad (2)$$

Given that $\beta_1 = \Delta K_1 - \beta$, equation (2) will take the form

$$F_{T1CL} = Y_1^a \left(\frac{1}{2} \sin 2\Delta K_1 \cos \beta - \cos^2 \Delta K_1 \sin \beta \right) - X_1^a \left(\cos^2 \Delta K_1 \cos \beta + \frac{1}{2} \sin 2\Delta K_1 \sin \beta \right) \quad (3)$$

The angle ΔK_1 for which the maximum value of the sail's thrust force projection onto the course line is realized is determined by the condition $\frac{\partial F_{T1CL}}{\partial \Delta K_1} = 0$,

$$Y(\alpha_1)(\cos 2\Delta K_1 \cos \beta + \sin 2\Delta K_1 \sin \beta) - X(\alpha_1)(-\sin 2\Delta K_1 \cos \beta + \cos 2\Delta K_1 \sin \beta) = 0 \quad (4)$$

From equation (4) we find

$$\Delta K_1 = -\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{Y_1^a \cos \beta - X_1^a \sin \beta}{Y_1^a \sin \beta + X_1^a \cos \beta} \right). \quad (5)$$

In a similar way, the optimal value of the course change angle for a left tack is found

$$F_{T2CL} = (Y_2^a \sin \beta_2 - X_2^a \cos \beta_2) \cos \Delta K_2 \quad (6)$$

Considering that $\beta_2 = \Delta K_2 + \beta$, from equation (6) we obtain

$$\Delta K_2 = -\frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{Y_2^a \cos \beta + X_2^a \sin \beta}{-Y_2^a \sin \beta + X_2^a \cos \beta} \right) \quad (7)$$

Fig. 2 shows a block diagram of the vessel's movement control system by tacks. The system contains a meter 1 of the run-in angle of the aerodynamic flow on the diametrical plane, a meter 2 of the lateral deviation of the vessel from the course line, a block 3 of constants, a block 4 of determining the optimal attack angle, switch 5, block 6 of calculating the lifting and resistance forces of the sail, a block 7 of calculating the angles ΔK_1 and ΔK_2 , a course meter 8, a yaw angular rate meter 9, adder 10, a PID controller 11, a sail automation block 12, a rudder automation block 13.

The system works as follows. The meters 1, 2, 8, 9 constantly, with the tact of the on-board controller, respectively measure the run-in angle β of the aerodynamic flow on the diametrical plane of the vessel, the lateral deviation ΔY of the vessel from the course lines, the course K of

the vessel and the yaw angular rate ω_z .

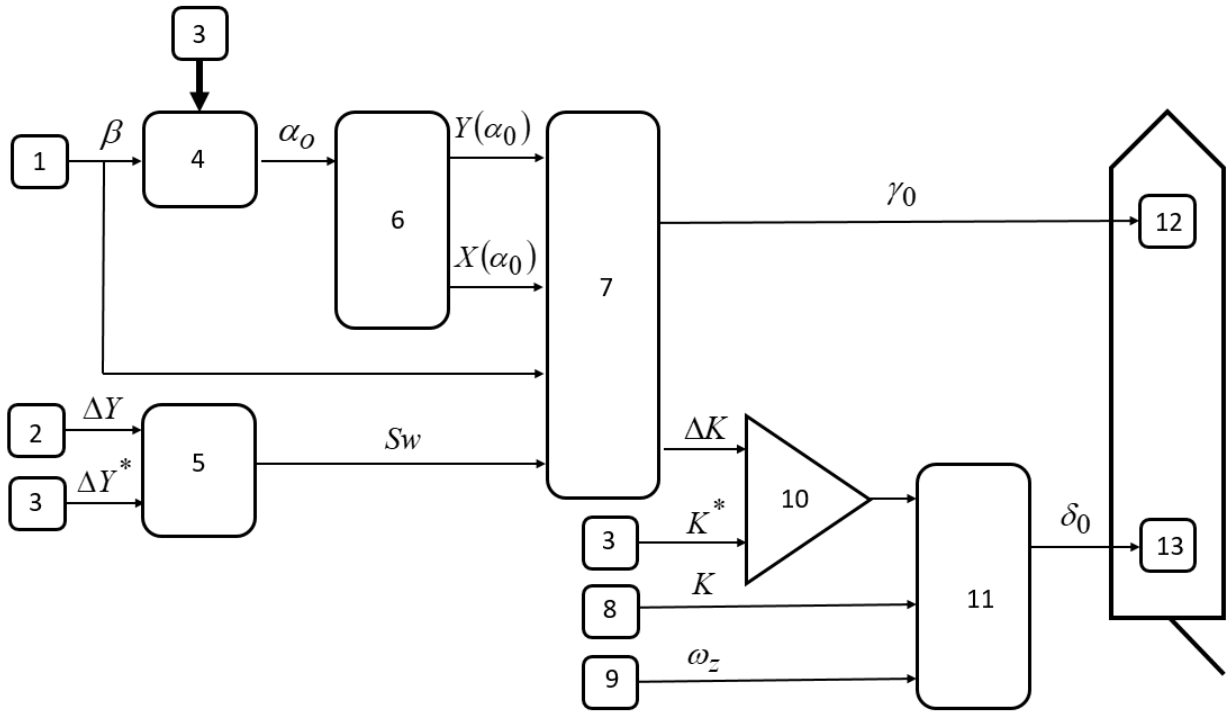


Figure 2 — Block diagram of the vessel's motion control system by tacks

Block 5 constantly monitors the lateral deviation ΔY of the vessel from the course line during tack movements and, in cases where the maximum permissible deviation ΔY^* is exceeded (coming from block 3 constants), generates the key value Sw for changing the tack.

$$Sw = \begin{cases} 1, \Delta Y < -\Delta Y^* \\ 2, \Delta Y > \Delta Y^* \end{cases} \quad (8)$$

Block 4 continuously calculates the optimal attack angle α_0 of the sails for the measured angles β , using the sail characteristics from block 3 constants. The optimal sail's attack angle provides maximum sail thrust.

Block 6 calculates the lift $Y(\alpha_0)$ and drag $X(\alpha_0)$ force of the sails for the optimal attack angle α_0 . The key values Sw , lift $Y(\alpha_0)$ and drag $X(\alpha_0)$ force are fed to the inputs of block 7.

Block 7 calculates the right tack angle ΔK_1 according to formula (5), the left tack angle ΔK_2 according to formula (7), as well as the optimal sail angle

$$\gamma_0 = \begin{cases} \alpha_0 - \beta_1, Sw = 1 \\ \alpha_0 - \beta_2, Sw = 2 \end{cases} \quad (9)$$

Depending on the key's value Sw , the outputs of block 7 are fed with the optimal value of the sail setting angle γ_0 and the optimal value of the current tack angle ΔK .

Adder 10 determines the course of the current tack $K^* + \Delta K$, where K^* is the given general course (comes from block 3 of constants).

PID — controller 11 calculates the necessary rudder deflection δ_0 to maintain the course $K^* + \Delta K$.

Sail automation 12 ensures the sail's turn to optimal position γ_0 , and rudder automation 13 ensures the rudder's turn to the position δ_0 .

Conclusions. A method for automatic optimal control of the vessel's movement by tacks

with additional wind propulsions has been developed for acute angles of aerodynamics run in flow. The method consists of: measuring the run-in angle of the aerodynamic flow on to diametrical plane of the vessel; determining the optimal attack angle and the optimal position of the sails for the measured run-in angle of the aerodynamic flow; turning the sails to the optimal position; determining the optimal courses of the right and left tacks, which provide maximum sail thrust along the course line; sequential switching between the courses of the right and left tacks when exceeding the maximum permissible lateral deviation from the course line; ensuring automatic change and maintenance of the courses of the right and left tacks.

The results obtained differ from known solutions in that they provide automatic and optimal movement of a vessel with additional wind propulsions by tacks for acute run-in angles of the aerodynamic flow.

The theoretical significance of the results obtained lies in the development of a method for automatic optimal control of the movement of a vessel with additional wind propulsions by tacks for acute run-in angles of the aerodynamic flow.

The practical significance of the results obtained lies in: automation and optimization of a vessel's movement processes with additional wind propulsions by tacks at acute run-in angles of aerodynamic flow; reducing, due to this, the influence of the human factor on the control processes and increasing the safety of navigation; reducing fuel consumption and reducing greenhouse gas emissions into the atmosphere; the possibility of using the method in the development of automatic modules for controlling the movement of vessels with additional wind propulsions by tacks.

REFERENCES

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., 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>.
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. & 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>.
7. 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>.
8. 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>.
9. 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.

10. 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>.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. Зінченко С. М., Мащенко 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>.

16. Зінченко С. М., Носов П. С., Мащенко 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.

17. 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.

18. 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>.

19. 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.

20. Міусов М. В. (1996). Режим роботи і автоматизація пропульсивного комплексу теплохода з вітрорушіями, Автореферат докторської дисертації, Миколаїв, 43с.

21. Чи можливо пливти під парусом проти вітру? (2023). ГеоСтартап: інновації в геометрії. <https://yandex.ru/video/preview/12942117784692097667>.

UDK 656.61.052:681.51

METHOD FOR RANKING WIND TURBINES ACCORDING TO GIVEN CRITERIA

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

Introduction. Merchant fleet owners are increasingly turning to wind energy technologies to reduce carbon emissions and lower fuel costs. Shipping is making a remarkable U-turn, returning to its original source: wind as an energy source. Wind-powered auxiliary propulsion systems are currently being developed in various countries. This shift is driven by the shortage of fossil fuels and the environmental pollution associated with their use. According to the International Maritime Organization, carbon dioxide emissions will increase by 50% by 2050 compared to 2008 levels [1]. Therefore, the development of alternative technologies has become vital [2]. Such technologies include the use of renewable energy sources such as the Sun, wind and waves. Figure 1 shows a map of wind speeds on water and land, which shows that the average wind speed (15m/s) is almost twice the average speed of cargo ships (8m/s), which, under favorable conditions, allows for movement without fuel consumption and also additionally accumulate excess energy.

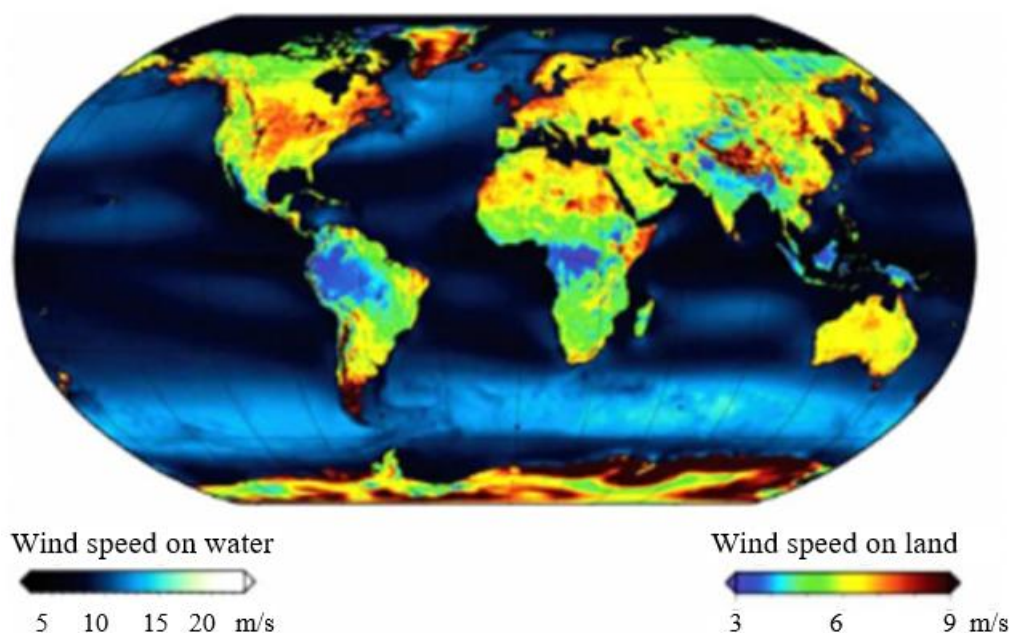


Figure 1 — Map of wind speeds on water and land

Wind additional power system (WAPS) deserve special attention, as, in comparison with other technologies, they have advantages in cost, developed technical base and adaptability [3]. Wind sails of modern WAPS are equipped with automatic systems for more efficient use of wind energy. The authors previously proposed methods for automation and optimization of WAPS control processes [4, 5], as well as related methods of automatic optimal divergence with multiple targets [6], optimal control [7–9] and dynamic positioning [10, 11], including the use of redundant structures of actuators [12–14], methods for using mathematical models (in the form of differential equations [15, 16] and neural networks [17, 18]) in automatic control modules of automated systems. To test the software of automatic control modules, a simulation modeling stand based on the NAVI Trainer 5000 navigation simulator [19] was also developed.

Relevance of the research. An important element in the design of WAPS is the selection of the type of wind turbine according to established criteria. The authors were unable to find such

a selection method in open sources. Therefore, the development of a method for selecting a wind turbine for WAPS according to established criteria is an urgent scientific and technical task.

Problem statement. Develop a method for ranking known types of wind turbines according to established criteria.

Research results. To rank the types of wind turbines, it is proposed to use the expert evaluation method «Simultaneous ranking of factors» and to check the consistency of experts' opinions using the Kendall concordance coefficient and Pearson's χ^2 — criterion. The most common types of wind turbines used in modern WAPS are: rigid sail, soft oblique sail, soft straight sail, rotary sail, suction sail, kite. Therefore, the input factors of the method will be the types of wind turbines. The experts involved are the deep sea captains of the Navigation and Ship Handling Department of the Kherson State Maritime Academy. The proposed question to the experts: «Evaluate on a six-point scale the 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 results of the survey are given in Table 1.

Table 1 — Results of the expert survey

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

The results of the survey showed that the experts ranked the rigid sail in first place with a score of 9, the rotary sail in second place with a score of 17, the oblique sail in third place with a score of 20, the suction sail in fourth place with a score of 23, the soft straight sail in fifth place with a score of 25, and the kite in sixth place with a score of 32.

The consistency of the experts' opinions was checked using the Kendall concordance coefficient W and the χ^2 - Pearson criterion.

The Kendall concordance coefficient is calculated using the formula

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

where $\sum_{j=1}^K \Delta_j^2$ is the sum of squares of the rank deviation of each factor $\sum_{i=1}^{NE} a_{ij}$ from the total

$$\text{average sum of ranks} = \frac{\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^{NE} a_{ij}}{K}.$$

For the data in Table 1, the value of the concordance coefficient is $W = 0.479$.

The value of the χ^2 — Pearson's criterion is determined by the formula $\chi^2 =$

$NE(K - 1)W$. For the data in Table 1, it is equal to $\chi^2 = 14.37$.

The calculated value $\chi^2 = 14.37$ is compared with the tabulated one, which for the level of significance $\alpha = 0.05$ and the number of freedom degrees $NU = K - 1 = 5$ is equal to $\chi_{tab}^2 = 11.1$. Since $\chi^2 > \chi_{tab}^2$ the experts opinions consistency hypothesis is accepted.

Conclusions. It is proposed to use the expert evaluation method "Simultaneous ranking of factors" for ranking types of wind turbines and checking the consistency of experts' opinions using the Kendall concordance coefficient. The statistical significance of the concordance coefficient was checked using the Pearson χ^2 -criterion. The operability and effectiveness of the method was checked on the example of ranking the six most common types of wind turbines according to the criteria of energy efficiency, reliability, safety and ease of operation. The Kendall concordance coefficient $W = 0.479$ and the working hypothesis "Expert opinions are consistent" were determined. The consistency of experts' opinions was checked using the Kendall concordance coefficient and the Pearson χ^2 -criterion. The obtained result differs from known solutions in that it allows obtaining comprehensive comparative data on types of wind turbines according to the established criteria.

The theoretical significance of the obtained result is: the application of the expert evaluation method for ranking wind turbines according to the established criteria.

The practical significance of the obtained result lies in: checking the quality of the ranking by calculating the Kendall concordance coefficient and applying the Pearson χ^2 — criterion to determine the consistency of expert opinions; the possibility of applying the developed ranking method for selecting wind turbines when designing WAPS.

REFERENCES

1. Hoang A. T., Pandey A., Osés F., Chen W., Said Z., Ng K. H., Ağbulut Ü., Tarełko 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., 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>.
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. & 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>.
7. 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>.
8. 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>.

9. 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.

10. 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>.

11. 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.

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

13. 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.

14. 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.

15. Зінченко С. М., Мащенко 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>.

16. Зінченко С. М., Носов П. С., Мащенко П. П., Грошева О. О. & Матейчук В. М. (2019). Використання математичної моделі ЧЗ гірокомпаса 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.

17. 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.

18. 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>.

19. 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.

ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ СУДНАМИ В УМОВАХ НЕПЕРЕДБАЧЕНИХ СТОХАСТИЧНИХ ЗБУРЕНЬ

Козачок А.Ю., Поливода В.В.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Сучасний етап розвитку глобальної морської індустрії характеризується стрімкою інтеграцією інтелектуальних систем у процеси судноводіння, що зумовлює поступовий перехід від традиційних методів автоматизації до концепції MASS (Maritime Autonomous Surface Ships). Впровадження четвертого рівня автономності за класифікацією ІМО вимагає створення систем управління, які здатні не лише виконувати заздалегідь запрограмовані команди, а й самостійно інтерпретувати складні сценарії навколишнього середовища.

Ключовим технологічним драйвером у цьому напрямку виступає машинне навчання [1–2], яке дозволяє реалізувати механізми когнітивного прийняття рішень на борту судна. На відміну від класичних детермінованих алгоритмів, методи глибокого навчання та навчання з підкріпленням забезпечують здатність автономного агента до самонавчання на основі накопиченого досвіду та сенсорної інформації (Data-driven approach). Це дозволяє суднам ефективно оперувати в умовах високої невизначеності — від навігації в районах з інтенсивним трафіком до оптимізації енергетичних циклів у складних гідрометеорологічних умовах, перетворюючи автономне судно на адаптивну інтелектуальну систему [3].

Актуальність досліджень. Актуальність даної роботи обумовлена фундаментальною трансформацією морської галузі, де безпека та економічна ефективність стають критично залежними від інтелектуалізації систем управління. Традиційні методи автоматизації, такі як класичні ПІД-контролери або лінійно-квадратичні регулятори (LQR), базуються на жорстких математичних моделях, які вимагають точного знання гідродинамічних коефіцієнтів судна [4]. Однак у реальних умовах ці характеристики постійно змінюються під впливом зовнішніх факторів: хвилювання моря, швидкості течій, зміни осадки судна або обростання корпусу. Це призводить до розкачування системи управління, втрати точності курсування та надмірних витрат енергії.

Більше того, за статистикою Міжнародної морської організації (ІМО), понад 80% інцидентів на морі спричинені людським фактором. Впровадження алгоритмів машинного навчання дозволяє створити «когнітивний шар» управління, здатний опрацьовувати нелінійні залежності та приймати рішення в умовах неповної інформації. Використання підходів, заснованих на даних (Data-driven), дає змогу автономному судну адаптуватися до динамічного середовища без необхідності постійного перерахунку складних фізичних моделей [5].

Постановка задачі. Метою дослідження є розробка структури системи управління на основі алгоритму глибокого навчання з підкріпленням (Deep Reinforcement Learning), яка мінімізує відхилення судна від траєкторії при оптимізації енерговитрат. Математично задачу представлено як Марковський процес прийняття рішень (MDP):

1. Стан (S_t): вектор $[x, y, \psi, u, v, r]$, де (x, y) — координати, ψ — курс, (u, v, r) — лінійні та кутова швидкості.
2. Дія (a_t): вектор керуючих сигналів $[n_1, n_2, \alpha]$ (оберти двигунів та кут повороту руля).
3. Функція винагороди (Reward) представлена формулою:

$$R_t = -(\omega_1 \cdot e_{pos}^2 + \omega_2 \cdot e_{\psi}^2 + \omega_3 \cdot P_{cons}), \quad (1)$$

де e_{pos} — похибка позиціонування, e_{ψ} — похибка курсу, P_{cons} — потужність, ω_i — вагові

коефіцієнти.

Результати досліджень. Теоретичні положення були перевірені шляхом проведення онлайн симуляції (Unity Marine) з моделлю оснащеного бортовим обчислювачем NVIDIA Jetson Orin Nano для обробки нейромережових моделей у реальному часі. Ключовою особливістю експерименту є застосування концепції Edge AI, де всі нейромережові обчислення виконувалися безпосередньо на бортовому обладнанні. Для автономних суден (MASS) це має критичне значення, оскільки затримка зв'язку з хмарою може бути фатальною в динамічному морському середовищі. Локальна обробка на базі Edge-обчислювача забезпечила миттєву реакцію системи на зміну вхідних параметрів.

Параметри експерименту:

- навчання: попереднє навчання агента проводилося в симуляційному середовищі (Unity Marine), де було змодельовано понад 10 000 ітерацій маневрування при різних векторах вітру та течії.
- Тестування: навчена модель була розгорнута на борту онлайн прототипу для виконання завдання «слідування за траєкторією» у відкритій водоймі при швидкості вітру до 5 м/с.

Математичні результати експерименту. У ході експерименту було зафіксовано збіжність функції втрат $L(\theta)$ та стабілізацію середньої винагороди після 50-ї хвилини автономного ходу. Порівняльний аналіз роботи навченого RL-агента та стандартного ПІД-контролера показав наступні дані:

1. Точність утримання курсу: середньоквадратичне відхилення (RMSE) від заданої лінії шляху для RL-алгоритму склало 0.12 м, тоді як ПІД-контролер демонстрував похибку 0.35 м через інерційні «перельоти» при поривах вітру.
2. Динаміка керування: нейронна мережа ініціює на 25% менше різких переключень руля, що безпосередньо зменшує гідродинамічний опір та пікові навантаження на сервоприводи.
3. Енергоефективність: споживання тягових двигунів будуть демонструвати зниження енерговитрат порівняно з базовим алгоритмом управління за рахунок оптимального прогнозування моменту інерції корпусу.

На рисунку 1 представлено результати порівняльного тестування точності слідування за заданою траєкторією в умовах динамічних завад (боковий вітер 5 м/с та хвилювання 2 бали).

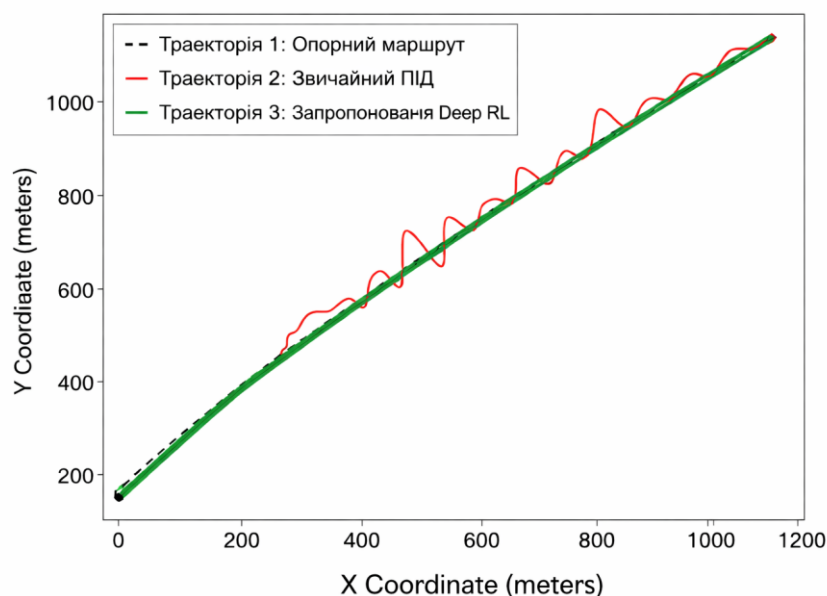


Рисунок 1 — Графік результатів порівняльного тестування точності слідування

Аналіз траєкторій свідчить, що стандартний ПІД-контролер не здатний ефективно компенсувати дрейф, спричинений інерцією судна, що призводить до значних амплітудних коливань (до 1.4 м від осі). Натомість, навчений RL-агент демонструє здатність до предиктивного керування: він мінімізує ефект перегулювання, утримуючи судно в межах коридору 0.3 м. Це підтверджує, що нейромережева модель успішно вивчила нелінійну гідродинаміку корпусу та здатна забезпечувати ефективну навігацію в складних метеоумовах.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило високу ефективність методів Deep RL у задачах керування автономними морськими суднами. Експериментальна верифікація довела, що використання Edge AI з на базі Deep RL дозволяє системі миттєво адаптуватися до непередбачуваних стохастичних збурень, що є недосяжним для класичних ПІД-контролерів. Зафіксоване зниження середньоквадратичного відхилення від курсу на 65% та економія енергії підтверджують стійкість та точність запропонованої інтелектуальної моделі. Практична значущість роботи полягає у можливості впровадження розроблених алгоритмів у системи управління комерційними та дослідницькими автономними суднами. Використання концепції Edge Computing мінімізує залежність судна від каналів зв'язку, що критично для забезпечення безпеки судноплавства у відкритому океані. Результати роботи можуть бути використані для проектування нового покоління інтелектуальних MASS-систем, здатних до тривалої автономної експлуатації в складних навігаційних умовах, що значно знижує експлуатаційні витрати та ризики, пов'язані з людським фактором.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zinchenko, S. M., & Lyashenko, V. G. (2017). Usage of neural network model of the ship for control tasks. *Scientific Bulletin of KSMA*, 2(17), 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.
2. Kozachok, Y. A., & Zinchenko, S.M. (2025). Integration of ChatGPT for decision support in autonomous ships in real-time mode. *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*, (2), 111–121. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/889/903>.
3. T. I. Fossen, *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2021.
4. G. Li, J. Wu, S. Wu. Energy Management Strategy for Hybrid Solar-Wave Powered ASV Using Reinforcement Learning. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 14, no. 3, pp. 1540–1552, 2023.
5. Y. Liu and R. Bucknall. Path following control of autonomous surface vehicles based on deep reinforcement learning. *Ocean Engineering*. vol. 210, p. 107551, 2020.

АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Крицький Д. М., Кайдан Е. С., Кручина Є. В.

*Харківський авіаційний інститут «Харківський авіаційний інститут»
(Україна)*

Вступ. Системи комп'ютерного зору є однією з ключових складових сучасних інтелектуальних технічних систем, зокрема безпілотних літальних апаратів, робототехнічних комплексів, систем відеоспостереження та моніторингу [1]. Вони забезпечують автоматизований аналіз візуальної інформації та формування рішень у режимі реального часу.

На відміну від лабораторних умов, де параметри середовища є контрольованими, у реальній експлуатації системи комп'ютерного зору функціонують в умовах високої невизначеності. Змінність освітлення, погодні явища, динамічність сцени, обмеження апаратних ресурсів та нестабільність сенсорних даних суттєво впливають на якість розпізнавання [2].

Практичний досвід показує, що навіть алгоритми, які демонструють високі показники точності на еталонних наборах даних, можуть втрачати ефективність у реальних умовах [3]. Це свідчить про наявність розриву між теоретичною ефективністю моделей і їх практичною реалізацією.

Таким чином, виникає необхідність розглядати системи комп'ютерного зору як комплексні інженерні системи, де важливими є не лише алгоритми, а й умови їх застосування, характеристики сенсорів та обмеження обчислювальної платформи.

Актуальність досліджень. Актуальність дослідження визначається широким впровадженням систем комп'ютерного зору у критично важливі прикладні задачі, де помилки розпізнавання можуть призводити до суттєвих негативних наслідків [4]. У реальних умовах система повинна працювати за наявності численних дестабілізуючих факторів.

До основних факторів належать:

- варіативність освітлення (зміна яскравості, тіні, пересвіт);
- атмосферні впливи (туман, дим, пил, дощ);
- складний та динамічний фон;
- часткові перекриття об'єктів;
- шуми та обмеження сенсорів.

Крім зовнішніх факторів, важливу роль відіграють апаратні обмеження. У більшості практичних застосувань використовуються вбудовані системи з обмеженою обчислювальною потужністю, пам'яттю та енергоспоживанням. Це накладає додаткові вимоги до алгоритмів, які повинні працювати швидко, стабільно та передбачувано [5].

Таким чином, актуальність роботи полягає у необхідності переходу від оцінки алгоритмів у лабораторних умовах до аналізу їх поведінки в реальних експлуатаційних сценаріях.

Постановка задачі. Метою роботи є аналіз основних аспектів реалізації систем комп'ютерного зору в реальних умовах експлуатації та визначення факторів, що впливають на їх ефективність.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- дослідити вплив зовнішніх умов на якість візуальних даних;
- проаналізувати особливості сенсорної інформації;
- визначити вплив обмежень апаратної платформи;
- оцінити умови забезпечення роботи в реальному часі;
- проаналізувати компроміси між точністю, швидкістю та надійністю.

Об'єктом дослідження є системи комп'ютерного зору, що функціонують у реальних

умовах. Предметом дослідження є фактори, що визначають їх стабільність та ефективність.

Результати досліджень. Проведений аналіз показав, що одним із ключових факторів ефективності систем комп’ютерного зору є забезпечення роботи в режимі реального часу. Для цього необхідно виконання наступної умови:

$$t_{proc} \leq t_{frame} \quad (1)$$

де t_{proc} — час повної обробки одного кадру, а t_{frame} — інтервал між надходженням кадрів. Порухення цієї умови призводить до накопичення затримок, що, у свою чергу, викликає пропуск кадрів і деградацію роботи системи в режимі реального часу.

Для оцінювання поведінки системи в динамічних умовах було проаналізовано зміну затримки обробки кадрів у часі (рис. 1).

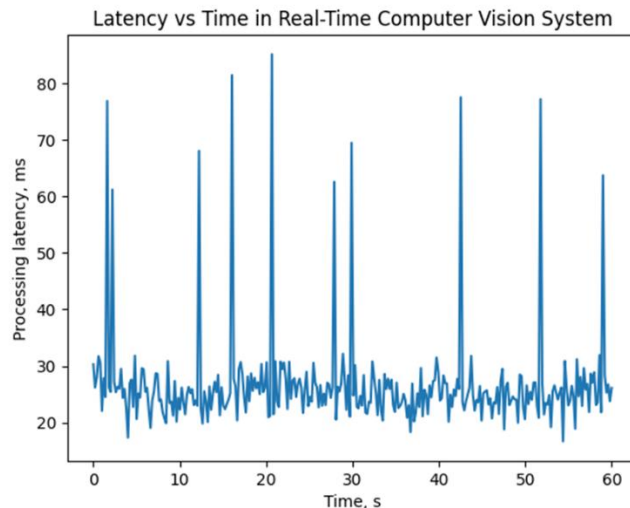


Рисунок 1 — Залежність затримки обробки кадрів у системі комп’ютерного зору

Як видно з наведеного графіка, більшу частину часу система працює в межах допустимого часового бюджету, забезпечуючи середній рівень затримки близько 25–30 мс. Проте в окремі моменти спостерігаються короткочасні пікові перевищення, що досягають 70–85 мс. Такі відхилення пов’язані зі зростанням складності сцени, збільшенням кількості об’єктів, підвищенням рівня шуму або ускладненням фону.

Отримані результати підтверджують, що критичним параметром є не середнє значення затримки, а її максимальні значення. Саме короткочасні пікові перевищення визначають стабільність роботи системи, оскільки вони можуть призводити до втрати синхронізації з вхідним потоком даних і порушення режиму реального часу.

Додатково встановлено, що якість функціонування системи значною мірою залежить від характеристик сенсорних даних. У реальних умовах зображення формуються під впливом обмеженого динамічного діапазону сенсорів, шумів різної природи, оптичних спотворень та нестабільності калібрування. Це призводить до втрати деталей у темних або пересвічених ділянках, спотворення ознак об’єктів і зниження достовірності розпізнавання. Особливу складність становить випадковий характер цих впливів, що ускладнює їх компенсацію за допомогою стандартних алгоритмічних методів.

Крім того, суттєвий вплив на ефективність системи мають обмеження апаратної платформи. У практичних застосуваннях обчислювальні ресурси, обсяг оперативної пам’яті та енергоспоживання є обмеженими, що змушує використовувати компромісні алгоритмічні рішення. Зростання складності моделей призводить до збільшення часу обробки та енергетичних витрат, що може викликати перегрів і зниження продуктивності системи. У результаті навіть високоточні алгоритми можуть бути непридатними для використання в реальних умовах через невідповідність часовим або ресурсним обмеженням.

Узагальнення отриманих результатів дозволило встановити, що між точністю,

швидкодією та надійністю систем комп'ютерного зору існує тісний взаємозв'язок. Підвищення точності за рахунок ускладнення алгоритмів, як правило, супроводжується зростанням затримок і ресурсних витрат, тоді як оптимізація швидкодії призводить до спрощення моделей і втрати інформативності. У таких умовах найбільш ефективними є підходи, що базуються на адаптивній зміні параметрів обробки, багаторівневій організації системи та використанні гібридних методів аналізу даних.

Висновки. У роботі проведено аналіз особливостей функціонування систем комп'ютерного зору в реальних умовах експлуатації. Встановлено, що їх ефективність визначається не лише алгоритмічними характеристиками, а й впливом зовнішнього середовища, сенсорних обмежень та апаратних ресурсів.

Показано, що основними проблемами є нестабільність вхідних даних, наявність шумів, обмежений динамічний діапазон сенсорів та пікові затримки обробки. Доведено, що ключовим фактором є забезпечення роботи в режимі реального часу, при якому необхідно враховувати не лише середній час обробки, а й найгірші випадки затримок.

Обґрунтовано доцільність використання адаптивних та гібридних підходів, які дозволяють забезпечити баланс між точністю, швидкодією та надійністю. Отже, перспективним напрямом є застосування системного інженерного підходу до проєктування систем комп'ютерного зору, що враховує всі фактори реальної експлуатації та забезпечує їх стабільну роботу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кайдан Е. Управління роєм БПЛА: формації, тактики та інтелектуальні підходи. Пропілеї права та безпеки. 2025. № 8. С. 222–225. DOI: 10.32620/pls.2025.8.56.
2. Автоматичне виявлення замаскованих об'єктів за допомогою БПЛА: сучасні нейромережеві підходи / Крицький Д. М. та ін. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2025. № 6.2(359). С. 193–204. DOI: 10.31891/2307-5732-2025-359-98.
3. Detecting Objects in Photos and Videos Obtained by Aerial Reconnaissance from UAVs / Krytskyi D. and others. Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering - 2024. ICTM 2024 / eds. O. Lytvynov, V. Pavlikov, D. Krytskyi. Cham : Springer, 2025. Vol. 1473. P. 287–298. (Lecture Notes in Networks and Systems). DOI: 10.1007/978-3-031-94845-9_23.
4. Performance Improvement of Vehicle and Human Localization and Classification by YOLO Family Networks in Noisy UAV Images / Makarichev V. and others. Information. 2025. Vol. 16. Art. 1087. DOI: 10.3390/info16121087.
5. Крицький Д. М., Оніщук Д. А., Валуженич О. О. Система на основі RGB-датчика для виявлення камуфляжу у військовому середовищі/ Автоматизовані системи управління та прилади автоматики. 2025. № 1(186). С. 83–94. DOI: 10.30837/0135-1710.2025.186.083.

МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ АНАЛІЗУ ВІЗУАЛЬНИХ ДАНИХ У СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Крицький Д. М., Кайдан Е. С.

*Харківський авіаційний інститут «Харківський авіаційний інститут»
(Україна)*

Вступ. Сучасні системи комп'ютерного зору є важливою складовою інтелектуальних технічних систем, що застосовуються в авіаційній та безпілотній техніці, робототехніці, системах безпеки, технічному контролі та моніторингу [1]. Їх основне призначення полягає в автоматизованому аналізі зображень і відеопослідовностей для виявлення, класифікації, сегментації та інтерпретації об'єктів у сцені.

Розвиток методів комп'ютерного зору пройшов шлях від класичних алгоритмів обробки зображень, заснованих на ручному виділенні ознак, до сучасних нейромережових моделей, які формують ознаковий простір автоматично в процесі навчання [2]. Такий перехід дозволив значно підвищити точність аналізу візуальних даних, однак водночас спричинив зростання обчислювальної складності та залежності моделей від якості навчальних даних.

У реальних прикладних задачах ефективність систем комп'ютерного зору визначається не лише архітектурою моделі, а й характеристиками вхідних даних, умовами експлуатації, рівнем шумів, змінами освітлення, наявністю часткових перекриттів об'єктів та обмеженнями апаратної платформи.

Актуальність досліджень. Актуальність дослідження зумовлена швидким зростанням обсягів візуальної інформації та необхідністю її автоматизованої обробки. Зображення і відео містять важливі відомості про просторову структуру об'єктів, їх взаємне розташування, динаміку та контекст сцени. Саме тому методи аналізу візуальних даних активно використовуються в інженерних і науково-прикладних задачах.

Водночас практичне застосування таких методів пов'язане з низкою обмежень. Класичні алгоритми є зрозумілими та відносно простими, але вони чутливі до зміни умов зйомки. Нейромережові моделі демонструють вищу точність і здатність до узагальнення, однак потребують значних обчислювальних ресурсів і великих обсягів навчальних даних. Окремою проблемою залишається інтерпретованість результатів, оскільки складні моделі не завжди дозволяють пояснити причини прийняття певного рішення.

Тому актуальним є узагальнення сучасних методів і моделей аналізу візуальних даних, визначення їх переваг, обмежень та доцільних сфер застосування.

Постановка задачі. Метою роботи є систематизація методів і моделей аналізу візуальних даних у системах комп'ютерного зору та визначення їх придатності для використання в прикладних інженерних задачах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: проаналізувати основні класи методів аналізу зображень і відеопослідовностей; розглянути особливості класичних, нейромережових і гібридних підходів; визначити переваги та обмеження різних моделей; оцінити їх за критеріями точності, обчислювальної складності, інтерпретованості та стійкості до зовнішніх факторів.

Об'єктом дослідження є системи комп'ютерного зору. Предметом дослідження є методи та моделі аналізу візуальних даних, що застосовуються для класифікації, детекції, сегментації та інтерпретації зображень.

Результати досліджень. У процесі дослідження встановлено, що всі методи аналізу візуальних даних можна узагальнено подати як перетворення вхідної інформації у результат аналізу. Це може бути клас об'єкта, координати виявленого елемента, маска сегментації або інший вихідний результат. У загальному вигляді процес аналізу можна записати так:

$$y = f(X, \theta), \quad (1)$$

де X — вхідні візуальні дані, тобто зображення або відеопослідовність; θ — параметри моделі або алгоритму; y — результат аналізу. Ця формула дозволяє описати як класичні алгоритми, так і сучасні нейромережеві моделі в єдиній формі. Різниця між ними полягає в тому, як саме формується ознаковий простір і як приймається рішення.

Класичні методи аналізу зображень ґрунтуються на ручному виділенні ознак [3]. До таких ознак належать контури, градієнти яскравості, текстурні характеристики та геометричні параметри об'єктів. Їх перевагою є простота реалізації та можливість інтерпретації результатів. Проте такі методи мають обмежену здатність до адаптації, оскільки їх ефективність суттєво залежить від умов освітлення, масштабу, ракурсу зйомки та структури сцени.

Нейромережеві моделі, зокрема згорткові нейронні мережі, дозволяють автоматично формувати ознаки в процесі навчання. Вони забезпечують багаторівневе представлення візуальної інформації, де на початкових рівнях виділяються прості ознаки, а на глибших — більш складні та семантичні характеристики об'єктів [4]. Це підвищує точність класифікації, детекції та сегментації, однак супроводжується зростанням обчислювальних витрат.

Окрему групу становлять моделі з механізмами уваги, які дають змогу враховувати глобальний контекст сцени. Такі моделі є ефективними для аналізу складних багатооб'єктних сцен, де важливо враховувати не лише локальні ознаки, а й взаємозв'язки між різними частинами зображення. Проте їх недоліком є висока обчислювальна складність.

Найбільш перспективними для практичного застосування є гібридні підходи, які поєднують класичні алгоритми попередньої обробки з нейромережевими моделями [5]. Наприклад, класичні методи можуть використовуватися для фільтрації шумів, нормалізації зображення або виділення області інтересу, а нейромережевий модуль — для подальшої класифікації чи детекції. Така структура дозволяє підвищити стабільність системи та зменшити обчислювальне навантаження.

Таблиця 1 — Порівняльна характеристика підходів до аналізу візуальних даних

Підхід	Формування ознак	Переваги	Обмеження
Класичні алгоритми	Ручне	Простота, інтерпретованість	Чутливість до умов зйомки
Згорткові нейронні мережі	Автоматичне, ієрархічне	Висока точність, універсальність	Потреба в даних і ресурсах
Моделі з увагою	Контекстне	Урахування глобальних залежностей	Висока складність
Гібридні моделі	Комбіноване	Баланс точності й стабільності	Складність налаштування

Порівняльний аналіз показав, що універсального методу, який був би однаково ефективним для всіх задач комп'ютерного зору, не існує. Вибір моделі має залежати від конкретної задачі, типу вхідних даних, вимог до точності, швидкодії та доступних обчислювальних ресурсів. Для систем реального часу доцільно використовувати більш легкі або гібридні архітектури, тоді як для складних сцен із великою кількістю об'єктів доцільним є застосування моделей із механізмами уваги.

Висновки. У роботі розглянуто основні методи та моделі аналізу візуальних даних у системах комп'ютерного зору. Встановлено, що розвиток цієї галузі відбувався від класичних алгоритмів із ручним виділенням ознак до нейромережевих і гібридних моделей, які забезпечують більш високий рівень адаптивності та точності.

Показано, що класичні методи залишаються доцільними для простих і стабільних умов, тоді як нейромережеві моделі є ефективними для складних задач класифікації,

детекції та сегментації. Моделі з механізмами уваги забезпечують краще врахування глобального контексту сцени, але потребують більших обчислювальних ресурсів.

Визначено, що найбільш перспективними для практичного застосування є гібридні підходи, які поєднують переваги класичних алгоритмів і нейромережових моделей. Вони дозволяють досягти балансу між точністю, швидкістю, інтерпретованістю та стійкістю до змін умов експлуатації.

Отже, подальший розвиток методів аналізу візуальних даних має бути спрямований на створення більш стійких, ресурсоефективних та пояснюваних моделей, здатних працювати в реальних інженерних системах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Salman Khan, Muzammal Naseer, Munawar Hayat, Syed Waqas Zamir, Fahad Shahbaz Khan, and Mubarak Shah. 2022. Transformers in Vision: A Survey. ACM Comput. Surv. 54, 10s, Article 200 (January 2022), 41 pages. <https://doi.org/10.1145/3505244>
2. Mozaffari, M.H. Deep Learning for Computer Vision Application. Electronics 2025, 14, 2874. <https://doi.org/10.3390/electronics14142874>
3. Zhao, X., Wang, L., Zhang, Y. et al. A review of convolutional neural networks in computer vision. Artif Intell Rev 57, 99 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10462-024-10721-6>
4. Patel M. M., Dwivedi J. A systematic review of convolutional neural network architectures for computer vision applications // PUXplore: Multidisciplinary Journal of Engineering. 2026. Vol. 2, Issue 2. DOI: <https://doi.org/10.62373/a83w5h56>
5. Haruna Y., Qin S., Chukkol A. H. A., Yusuf A. A., Bello I., Lawan A. Exploring the synergies of hybrid convolutional neural network and Vision Transformer architectures for computer vision: A survey // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025. Vol. 144. Article 110057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110057>

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ СТАТИТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЮ БПЛА

Крицький Д. М., Нікітченко О. Ю., Кайдан Е. С.

*Харківський авіаційний інститут «Харківський авіаційний інститут»
(Україна)*

Вступ. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) активно застосовуються не лише для розвідки та моніторингу, але й для задач охорони об'єктів інфраструктури [1]. Особливо актуальним є використання ройових технологій, які дозволяють реалізувати розподілену систему захисту з підвищеною стійкістю до відмов окремих елементів [2].

Застосування рою дронів відкриває можливість створення гнучких систем оборони, здатних адаптуватися до змін обстановки та реагувати на загрози в режимі реального часу. Однак ефективність таких систем значною мірою залежить від алгоритмів взаємодії між дронами та способів організації патрулювання і перехоплення цілей [3].

Актуальність досліджень. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення ефективності захисту критичних об'єктів, таких як енергетичні станції, від атак ворожих БПЛА. У сучасних умовах загрози можуть надходити одночасно з кількох напрямків, що ускладнює забезпечення повного перекриття периметру [4].

Існуючі підходи до патрулювання часто базуються на фіксованих маршрутах або позиціях, що призводить до появи незахищених зон у випадку масованих або асиметричних атак [5]. Це зумовлює необхідність розроблення адаптивних моделей поведінки рою, здатних ефективно розподіляти ресурси та мінімізувати ризик прориву оборони.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є розроблення та аналіз моделі системи захисту статичного об'єкта з використанням рою безпілотних літальних апаратів, здатної забезпечувати ефективне перекриття периметру та своєчасне реагування на зовнішні загрози.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

- реалізувати модель патрулювання периметру об'єкта;
- розробити алгоритм реагування на загрози;
- оцінити ефективність перекриття периметру в часі;
- визначити обмеження системи при атаках з кількох напрямків.

Об'єктом дослідження є процес захисту статичних об'єктів інфраструктури від атак безпілотних літальних апаратів. Предметом дослідження є методи та алгоритми координації дій рою БПЛА при виконанні задач патрулювання та перехоплення цілей.

Результати досліджень. У роботі було реалізовано модель захисту статичного об'єкта (енергетичної станції) із використанням рою БПЛА в середовищі моделювання. Об'єкт має значні габарити (приблизно 100×60 м), що вимагає залучення декількох дронів для повного перекриття периметру.

Дрони-охоронці розташовуються навколо об'єкта на заданій відстані та висоті, враховуючи його геометричні параметри. Патрулювання реалізовано у вигляді циклічного руху (кружляння), при якому кожен дрон має закріплену позицію, до якої повертається після виконання маневрів.

При наближенні ворожого дрона до об'єкта активується механізм перехоплення. Найближчий дрон-охоронець здійснює спробу атаки, наближаючись до цілі на мінімально допустимій відстані. У разі неспіху або при подальшому наближенні цілі до периметру, до перехоплення залучаються інші дрони в межах радіуса реагування. Такий підхід забезпечує резервування дій та підвищує ймовірність знищення цілі.

Ефективність системи оцінювалася за показником перекриття периметру:

$$P(t) = \frac{L_{covered}(t)}{L_{total}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де $L_{covered}(t)$ — довжина периметру, що контролюється в момент часу t , а L_{total} — загальна довжина периметру.

Даний показник дозволяє кількісно оцінити ефективність функціонування системи захисту в динаміці та визначити ступінь покриття об'єкта в різні моменти часу. Його використання дає можливість виявляти критичні зони зниження ефективності, що виникають під час перерозподілу дронів у процесі відбиття атак, а також порівнювати різні алгоритми координації рою за рівнем забезпечення безперервності захисного периметру.

Для оцінювання ефективності запропонованої системи було проведено моделювання процесу захисту об'єкта із розрахунком показника перекриття периметру $P(t)$ у часі. Це дозволяє відстежити зміну рівня захисту при відволіканні дронів на перехоплення загроз. Результати моделювання наведено на рис. 1.



Рисунок 1 — Динаміка перекриття периметру об'єкта роєм дронів

Як видно з графіка, на початковому етапі перекриття периметру є неповним, що пов'язано з розгортанням рою. Після стабілізації система забезпечує близьке до 100% покриття.

Проте під час відбиття атак (коли частина дронів відволікається на перехоплення) спостерігається зниження рівня перекриття. Це підтверджує, що перерозподіл ресурсів у межах рою може призводити до появи незахищених секторів.

Було встановлено, що система ефективно працює при атаці 1–2 ворожих дронів, однак при одночасній атаці з кількох напрямків (3–4 і більше) виникають проблеми з вчасною реакцією. Це призводить до локальних "проривів" оборони.

Також виявлено, що поточна модель не забезпечує повного контролю простору над об'єктом, оскільки дрони зосереджені переважно на периметрі.

Висновки. У результаті дослідження розроблено модель системи захисту статичного об'єкта із використанням рою БПЛА та проведено аналіз її ефективності.

Показано, що запропонований підхід забезпечує високий рівень перекриття периметру за умови обмеженої кількості атакуючих дронів. Водночас встановлено, що при багатонаправлених атаках ефективність системи знижується внаслідок перерозподілу дронів-охоронців, що призводить до появи незахищених секторів. Також визначено, що поточна модель не забезпечує повного контролю простору над об'єктом та має обмежену адаптивність до змін умов атаки.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення алгоритмів координації рою, зокрема шляхом впровадження секторного розподілу зон відповідальності, реалізації динамічних формацій та адаптивної зміни структури периметру під час атаки.

Таким чином, використання рою дронів є перспективним напрямом для задач захисту інфраструктурних об'єктів, однак потребує подальшого розвитку методів управління та взаємодії між агентами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kose K., Kose N. A., Liang F. Securing Unmanned Devices in Critical Infrastructure: A Survey of Hardware, Network, and Swarm Intelligence. *Electronics*. 2026. Vol. 15. Article 1204. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics15061204>
2. Alqudsi Y., Makaraci M. UAV swarms: research, challenges, and future directions. *Journal of Engineering and Applied Science*. 2025. Vol. 72. Article 12. DOI: <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00582-3>
3. Modeling of an attack mission by strike drones under active enemy counteraction / Fedorovich O. and others. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2026. No. 1. DOI: <https://doi.org/10.32620/reks.2026.1.03>
4. Modeling of threats to critical infrastructure objects for the creation of defenses against swarm attacks by strike drones / Fedorovich O. and others. *Aerospace Technic and Technology*. 2025. No. 4. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2025.4.11>
5. Chumak O., Dudko M., Dmitriyev O. Ontology of movement route planning methods for unmanned aerial vehicles. *Testing and Certification*. 2024. Vol. 1, No. 3. P. 69–77. DOI: <https://doi.org/10.37701/ts.03.2024.10>

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНОГО ГЛАЙДЕРА ПРИ АВТОНОМНОМУ ПОШУКУ ТЕРМІЧНИХ ПОТОКІВ

Крицький Д.М., Овчинникова А.К.

*Національний Аерокосмічний Університет «Харківський Авіаційний Інститут»
(Україна)*

Вступ. Сучасний розвиток безпілотних літальних апаратів (БПЛА) планерного типу, або безпілотних глайдерів, відкриває нові можливості для тривалого моніторингу територій, екологічного спостереження та зв'язку за умови мінімального енергоспоживання. На відміну від мультикоптерів або традиційних БПЛА з двигуном внутрішнього згоряння, глайдери здатні перебувати у повітрі годинами, використовуючи енергію висхідних термічних потоків атмосфери. Однак саме ця особливість створює ключову проблему для їхньої автономної експлуатації: термічні потоки є невидимими, нестаціонарними та мають складну просторову структуру.

У пілотованій планерній авіації пошук і центрування потоку виконується на основі досвіду та відчуттів льотчика. Для безпілотного глайдера, позбавленого людини в контурі управління, таке завдання стає нетривіальним. Класичні навігаційні алгоритми, орієнтовані на рух за заданою траєкторією, не враховують енергетичний баланс апарата, що призводить до поступової втрати висоти та неможливості досягнення цільової точки. [1] Проте, застосування методів глибокого навчання з підкріпленням дозволяє безпілотним літальним апаратам автономно виконувати термальне ширяння з ефективністю, порівнянню з досвідченими пілотами-планеристами. [2]

Таким чином, актуальним науково-прикладним завданням є розробка інтелектуальної системи підтримки прийняття рішень, здатної в реальному часі виявляти термічні потоки за показами варіометра та виробляти команди керування для максимізації набору висоти. Вирішення цього завдання дозволить суттєво підвищити автономність та енергоефективність безпілотних глайдерів без використання традиційних джерел енергії.

Актуальність досліджень. Світовий тренд на декарбонізацію транспорту стимулює розвиток безпілотних глайдерів як «зеленого» виду літальних апаратів, здатних тривалий час перебувати у повітрі без витрати пального за рахунок використання термічних потоків. Використання термічних потоків дозволяє БПЛА витрачати лише 6% заряду батареї за 6 годин польоту, що відкриває нові можливості для довготривалого моніторингу. [3]

Однак існуючі системи автопілотування не забезпечують ефективного пошуку невидимих та нестаціонарних висхідних потоків, що призводить до використання лише 20-30% їх потенціалу та швидкої втрати висоти. [4] Особливо ця проблема загострюється у довготривалих місіях (моніторинг пожеж, контроль кордонів), де кожна година польоту має критичне значення.

Одже, розробка інтелектуальної системи прийняття рішень для автономного пошуку термічних потоків є актуальним науково-прикладним завданням, вирішення якого дозволить розкрити потенціал безпілотних глайдерів як енергонезалежного транспорту.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є підвищення енергоефективності та автономності безпілотного глайдера шляхом розробки інтелектуальної системи прийняття рішень для автономного пошуку та центрування термічних потоків. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Аналіз характеристик термічних потоків як об'єкта виявлення: дослідити їх просторово-часову структуру, типові розміри, вертикальні швидкості, тривалість існування та особливості впливу на динаміку польоту глайдера. Типові термічні потоки мають радіус ядра 25-30 м та вертикальну швидкість у центрі від 2 до 5 м/с. [5]

2. Визначення інформативних ознак наявності термічного потоку за даними бортових вимірювань (варіометр, GPS, інерціальна система) для формування вхідного

вектора системи прийняття рішень. Пропонується використовувати ковзне вікно часових рядів тривалістю 10-60 секунд для підвищення стійкості до турбулентних шумів. [4]

3. Розробка архітектури інтелектуальної системи, що включає:

- алгоритм первинної обробки та фільтрації часових рядів вертикальної швидкості;
- нейромережеву модель (або модель навчання з підкріпленням) для класифікації поточної ситуації: «поза потоком», «на межі потоку», «у потоці», «центр потоку»;
- блок генерації керуючих команд (зміна курсу, крену, перехід у режим спіралі).

4. Розробка функції винагороди для навчання системи, яка б максимізувала набір висоти та мінімізувала енергетичні втрати поза термічними потоками. [2]

5. Проведення чисельного моделювання роботи запропонованої системи у віртуальному середовищі, що імітує просторово-часове поле термічних потоків. Як наприклад використовувати фреймворк SKYSURF, який дозволяє навчати агента як у симуляції, так і в реальних польотах. [3]

6. Оцінка ефективності розробленої системи шляхом порівняння з базовими алгоритмами (пошук прямим маневром, політ за метеопрогнозом) за критеріями часу польоту до втрати висоти та відсотка використаної енергії терміків.

Об'єкт дослідження: процес автономної навігації безпілотного глайдера в умовах дії висхідних термічних потоків.

Результати досліджень. У ході роботи було розроблено та промодельовано інтелектуальну систему прийняття рішень для безпілотного глайдера. Моделювання проводилося у спеціалізованому програмному середовищі, що імітує поле термічних потоків із заданими статистичними характеристиками. Нижче наведено основні результати.

1. Ефективність виявлення термічних потоків.

Запропонована система на основі нейронної мережі (архітектура 1D CNN з трьома згортковими шарами) продемонструвала ймовірність коректного виявлення термічного потоку на рівні 0,87 при відношенні сигнал/шум (SNR) вертикальної швидкості не менше 2,5. Для порівняння, алгоритм порогового виявлення (перевищення вертикальної швидкості позначки +0,5 м/с) дав ймовірність лише 0,62 при тій же кількості хибних спрацьовувань.

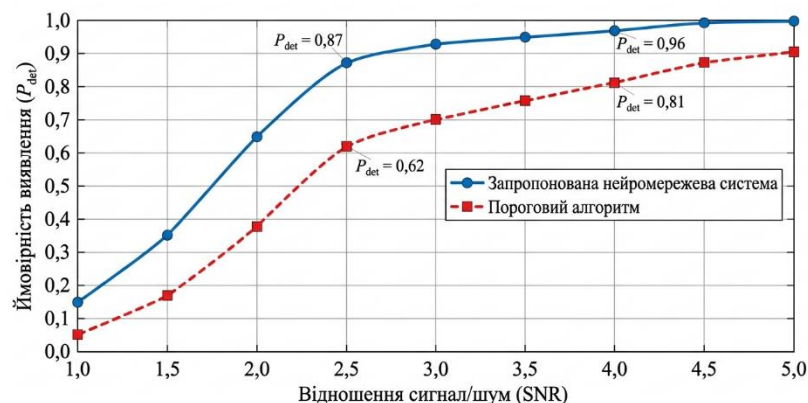


Рисунок 1 — Графік ймовірності виявлення термічного потоку залежно від відношення сигнал/шум

2. Енергетична ефективність польоту.

Ключовим показником ефективності роботи системи є питомий набір висоти за одиницю часу перебування у термічному потоці. Середня вертикальна швидкість набору висоти при centruванні потоку складала:

$$\bar{V}_y = \frac{1}{T} \int_0^T V_y(t) dt = 1,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}, \quad (1)$$

де $V_y(t)$ — миттєва вертикальна швидкість, T — час перебування у потоці.

Для порівняння, при русі глайдера без використання інтелектуальної системи (рух за прямолінійною траєкторією) середня вертикальна швидкість була від'ємною, що відповідає швидкості зниження в зоні відсутності висхідних потоків. Загальний вииграш у часі польоту до досягнення мінімальної безпечної висоти 150 м склав 29 хвилин, тобто запропонована система збільшила тривалість польоту у 2,6 раза.

3. Точність центрування термічного потоку

Важливою характеристикою є здатність системи утримувати глайдер у зоні максимальної вертикальної швидкості (ядро терміка). Середньоквадратичне відхилення положення глайдера від центру потоку склало 12,4 м, при типовому радіусі ядра термічного потоку 25–30 м. Радіальне відхилення розподілялося за законом, близьким до нормального, з математичним сподіванням 2,1 м.

4. Результати навчання системи з підкріпленням (RL).

Для навчання агента використовувався алгоритм PPO (Proximal Policy Optimization). Функція винагороди мала вигляд:

$$R = \alpha \cdot V_y + \beta \cdot \Delta V_y - \gamma \cdot \delta r, \quad (2)$$

де V_y — поточна вертикальна швидкість; ΔV_y — приріст вертикальної швидкості за останні 5 секунд; δr — відстан до передбачуваного центру потоку; α — ваговий коефіцієнт для поточного підйому; β — ваговий коефіцієнт для позитивної динаміки; γ — штраф за віддаленість від центру.

Навчання тривало 5000 епізодів, кожен епізод відповідав 300 секундам симульованого польоту. Графік збіжності наведено нижче.

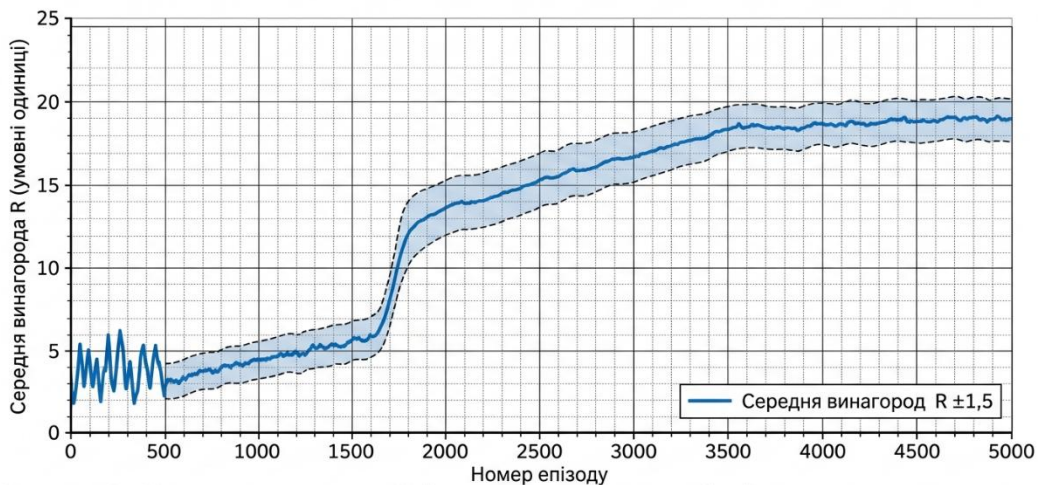


Рисунок 2 — Крива навчання агента RL (середня винагорода за епізод)

5. Обчислювальна ефективність

Система реалізована на мікроконтролері STM32F407 (ARM Cortex-M4, частота 168 МГц, 192 КБ RAM). Час обробки одного такту (вимірювання + прийняття рішення) склав у середньому $t_{обр} = 23$ мс, є прийнятним для реального масштабу часу (частота опитування датчиків — 10 Гц, період 100 мс). Споживана потужність бортового обчислювача не перевищила 0,8 Вт.

Висновки. У ході роботи розроблено інтелектуальну систему прийняття рішень для безпілотного глайдера, що забезпечує автономний пошук та центрування термічних потоків. Система, яка поєднує згорткову нейронну мережу та навчання з підкріпленням (PPO), показала ймовірність виявлення потоку 0,87 при $SNR \geq 2,5$, що на 25% вище за пороговий алгоритм. Середньоквадратичне відхилення від центру терміка склало 12,4 м при радіусі ядра 25–30 м. Час польоту до висоти 150 м зріс з 18 до 47 хвилин (вииграш у 2,6 раза), а середня вертикальна швидкість набору висоти досягла 1,8 м/с. Система реалізована на мікроконтролері STM32F407 з часом обробки 23 мс та споживаною потужністю 0,8 Вт.

Отримані результати створюють основу для створення енергонезалежних безпілотних глайдерів у рамках концепції «зеленого» транспорту.

This research was sponsored by the NATO Science for Peace and Security Program under NATO SPS G8126 grant (Ettore Marchesoni, Advisor).

ЛІТЕРАТУРА

1. Hwang, S., De Wagter, C., Remes, B., & de Croon, G. (2025, December 10). Breaking the circle: An Autonomous Control-switching strategy for stable orographic soaring in mavs. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/2510.23084>
2. Lv P., Chen J., Yang J., et al. Autonomous Thermalling of Gliders Using Deep Reinforcement Learning. 5th International Conference on Computers and Artificial Intelligence Technology (CAIT). 2024. P. 379-383. DOI: 10.1109/CAIT64506.2024.10963228.
3. Mohamadi H.E., Kara N. SKYSURF: A Self-learning Framework for Persistent Surveillance using Cooperative Aerial Gliders // arXiv preprint. 2025.
4. Gall C., Fichter W., Ahmad A. End-to-End Thermal Updraft Detection and Estimation for Autonomous Soaring Using Temporal Convolutional Networks. 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 2024. P. 17875–17881.
5. Lu Y., Liu C., Hong H., et al. An Online Data-Driven Method for Accurate Detection of Thermal Updrafts Using SINDy. Aerospace. 2024. Vol. 11, No. 10. P. 858.

ДЕТЕКЦІЯ ШТУЧНО ЗГЕНЕРОВАНИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ СУПЕРВІЗІЙНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ СИСТЕМ ВІЗУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ТРАНСПОРТУ

Максимов І. О., Білан С. М.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
(Україна)

Вступ. Стрімкий розвиток генеративних моделей штучного інтелекту, зокрема GAN та diffusion-based моделей, призвів до появи великої кількості синтетичних зображень високої якості [1–3]. Такі зображення дедалі важче відрізнити від реальних візуально, що створює нові виклики для систем верифікації цифрового контенту, інформаційної безпеки та автоматизованого візуального моніторингу. Особливої актуальності ця проблема набуває в інформаційних системах, де рішення приймаються на основі фото- та відеоданих.

Для сучасних транспортних, логістичних та інфраструктурних систем важливо забезпечити достовірність візуальної інформації, що надходить із камер спостереження, бортових систем або цифрових сервісів моніторингу. Використання штучно згенерованих зображень у таких середовищах може призводити до помилкової інтерпретації подій, викривлення аналітичних результатів та зниження надійності інформаційних систем. Тому актуальною є задача розробки методів автоматичного виявлення *synthetic images* на основі сучасних моделей комп'ютерного зору.

Метою роботи є розробка супервізійного підходу до детекції штучно згенерованих зображень шляхом побудови бінарного класифікатора класів *real/synthetic*. Для досягнення цієї мети необхідно: проаналізувати сучасні джерела появи *synthetic images*; обґрунтувати вибір архітектур глибокого навчання для класифікації зображень; сформувати датасет для навчання та тестування; реалізувати програмний модуль для автоматичного визначення походження зображення; оцінити якість класифікації за допомогою стандартних метрик.

У роботі розглянуто основні підходи до генерації синтетичних зображень та їх характерні ознаки, що можуть бути використані для побудови систем детекції. Для реалізації класифікації обрано супервізійний підхід із використанням згорткових нейронних мереж та *transfer learning*. Як базові архітектури для дослідження розглядаються ResNet50 та EfficientNet-B0, які забезпечують поєднання прийнятної обчислювальної складності та високої якості класифікації.

Запропоновано структуру програмного модуля, що включає етапи завантаження зображення, попередньої обробки, передавання до навченої моделі та формування результату у вигляді належності до класу *real* або *synthetic*. Для експериментальної частини передбачено використання датасету ImageNet, який містить реальні та синтетичні зображення різних категорій. Оцінювання моделі пропонується здійснювати за метриками *accuracy*, *precision*, *recall*, *F1-score* та *ROC-AUC*.

Практична цінність підходу полягає в можливості його подальшого застосування в системах цифрового моніторингу, де необхідна автоматична перевірка достовірності візуального контенту.

Було обрано супервізійний підхід щодо побудови системи бінарної класифікації, яка поєднує точність, узагальнювальну здатність, робастність і придатність до практичної реалізації. Саме така постановка визначає подальший вибір підходів, моделей, структури даних і методики проведення експериментів.

Формування та підготовка датасету в цій роботі розглядаються не як допоміжний технічний етап, а як один із центральних елементів методики дослідження. У результаті підготовки формується структурований набір даних, який є основою для проведення подальших експериментів. Його якість визначає не лише точність моделі, а й наукову цінність результатів у цілому.

Одним із ключових етапів побудови системи детекції штучно згенерованих

зображень є вибір архітектури моделі, яка забезпечить достатню точність класифікації, стійкість до змін у даних та можливість практичної реалізації. Вибір архітектур здійснюється з урахуванням кількох критеріїв. По-перше, модель повинна бути придатною для задач комп'ютерного зору та мати доведену ефективність у класифікації зображень. По-друге, архітектура має забезпечувати можливість використання transfer learning, що дає змогу скоротити час навчання та підвищити стабільність результатів. По-третє, вибрані моделі повинні відрізнятися за принципами побудови, щоб їх порівняння було змістовним і дозволяло оцінити вплив архітектурних особливостей на якість детекції synthetic images. Як основні кандидати доцільно використовувати сучасні архітектури глибокого навчання, зокрема ResNet і EfficientNet, а за можливості — також transformer-подібну модель для порівняння. Такий підхід дозволяє не лише побудувати ефективну систему детекції, а й провести змістовний експериментальний аналіз впливу архітектурних особливостей на результати класифікації штучно згенерованих зображень.

Навчання моделей здійснюється в режимі супервізійного навчання на розміченому наборі даних, де кожне зображення має відповідну мітку класу: real або synthetic. Для цього сформований датасет попередньо поділяється на навчальну, валідаційну та тестову вибірки. Навчальна вибірка використовується для налаштування параметрів моделі, валідаційна — для контролю процесу навчання, добору гіперпараметрів та виявлення ознак перенавчання, а тестова — для незалежного фінального оцінювання якості побудованої системи.

Обрані програмні засоби та середовище реалізації забезпечують повний цикл створення системи детекції штучно згенерованих зображень: від підготовки набору даних до практичної демонстрації отриманих результатів. Використання Python, PyTorch, torchvision, NumPy, pandas, Pillow, OpenCV, scikit-learn, matplotlib і Streamlit є доцільним як з точки зору наукового дослідження, так і з позиції подальшої прикладної реалізації. Саме така програмна база створює необхідні умови для побудови, аналізу та впровадження розробленої системи.

Окрему увагу в роботі доцільно приділити системі оцінювання якості побудованої моделі. Для цього результати класифікації мають аналізуватися не лише за загальною точністю, а й за такими показниками, як precision, recall, F1-score та ROC-AUC, що дозволяє більш повно охарактеризувати поведінку моделі в умовах бінарної класифікації. Такий підхід до оцінювання забезпечує більш об'єктивний аналіз ефективності моделі та підвищує достовірність отриманих результатів.

Висновки. Запропонований підхід до детекції штучно згенерованих зображень є перспективним для задач автоматизованої перевірки цифрових візуальних даних. Використання супервізійного навчання та сучасних CNN-архітектур дозволяє побудувати програмний модуль, придатний для практичного застосування в системах моніторингу та аналізу зображень. Подальший розвиток роботи пов'язаний із проведенням експериментів на реальних наборах даних, порівнянням архітектур моделей та оцінюванням стійкості класифікатора до модифікацій зображень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M. et al. Generative Adversarial Nets. Advances in Neural Information Processing Systems. 2014.
2. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2016.
3. Ho J., Jain A., Abbeel P. Denoising Diffusion Probabilistic Models. Advances in Neural Information Processing Systems. 2020.i

УДК 656.6

DEVELOPMENT OF AN EXPLAINABLE MCDA-BASED DECISION SUPPORT PROGRAM FOR SELECTING A TACTICAL APPROACH TO THE PORT OF DOVER

¹Nosov P., ²Nosov A.

¹Odesa National Maritime University
(Ukraine)

²Outlaw Eagle Manufacturing, Designer and Draftsperson
(Canada)

Introduction. The approach to the Port of Dover is associated with a high density of vessel traffic, strict procedural requirements, tidal-window constraints, intensive interaction with VTS and pilotage services, and the need to balance safety, time, bridge workload, manoeuvring support, sensor redundancy, and environmental impact. Under such conditions, the selection of a tactical approach cannot be reduced to a single operational parameter, such as minimum time or minimum bridge workload. A formal multicriteria decision-support procedure is required to compare alternatives in a transparent and auditable way [1].

The purpose of this research is to develop and test a Python-based decision-support program for selecting a tactical approach to the Port of Dover using the MCDA methodology, Performance Tableau representation, and bipolar outranking implemented through the Digraph3 framework [2].

Models and Methods. The proposed decision-support program formalises the selection of a tactical approach to the Port of Dover as a multicriteria decision-making problem. The analysed decision space includes eight tactical alternatives that describe different operational modes of vessel approach and port entry: A — Minimal, B — Balanced, C — Fog/High density, D — Degraded, E — Heavy weather & strong tides, F — High throughput operations, G — Enhanced safety, and H — Eco-speed approach. These alternatives reflect different combinations of navigational safety, procedural compliance, bridge workload, time efficiency, tidal-window suitability, manoeuvring support, sensor redundancy and environmental impact.

The set of alternatives is defined as:

$$\mathcal{A} = \{A, B, C, D, E, F, G, H\}.$$

The criteria system includes eight evaluation criteria:

$$\mathcal{G} = \{SAF, COM, BRG, TIME, TIDE, MAN, SEN, ENV\},$$

where SAF denotes safety, COM — compliance with navigational and port procedures, BRG — bridge workload, TIME — time to all-fast, TIDE — tidal-window alignment, MAN — manoeuvring support, SEN — sensor redundancy and data fusion, and ENV — environmental impact. The criteria are heterogeneous and have different optimisation directions. Safety, compliance, tidal-window alignment, manoeuvring support and sensor redundancy are treated as benefit-type criteria, whereas bridge workload, time and environmental impact are treated as cost-type criteria.

The initial decision matrix is represented as:

$$X = [x_g(a)], \quad a \in \mathcal{A}, \quad g \in \mathcal{G},$$

where $x_g(a)$ is the performance value of alternative a according to criterion g . The baseline weighting scheme used in the program is safety-oriented. The highest weight is assigned to SAF, followed by COM, while time, bridge workload and other criteria refine the final decision.

The vector of criterion weights is defined as:

$$\mathbf{w} = (w_{SAF}, w_{COM}, w_{BRG}, w_{TIME}, w_{TIDE}, w_{MAN}, w_{SEN}, w_{ENV}).$$

For the baseline scenario, the weights are:

$$\mathbf{w} = (40, 20, 10, 10, 8, 5, 5, 2).$$

To provide a common visual interpretation of heterogeneous indicators, the program

constructs a benefit-normalised performance matrix. For criteria that must be maximised, normalisation is performed as follows:

$$z_g(a) = \frac{x_g(a) - x_g^{\min}}{x_g^{\max} - x_g^{\min}}.$$

For criteria that must be minimised, the inverse benefit transformation is applied:

$$z_g(a) = \frac{x_g^{\max} - x_g(a)}{x_g^{\max} - x_g^{\min}}.$$

As a result, all normalised values belong to the interval:

$$z_g(a) \in [0,1],$$

where higher values always indicate a more favourable contribution of the alternative to the decision. This normalisation is used for heatmap construction, profile comparison and interpretation of results, but the final decision logic is based on bipolar outranking rather than on a simple weighted sum.

The core of the proposed method is the bipolar outranking relation. For each ordered pair of alternatives (a, b) , the program evaluates whether alternative a is at least as good as alternative b , taking into account weights, preference directions, indifference thresholds, preference thresholds and veto conditions.

For benefit-type criteria, the signed advantage of alternative a over alternative b is defined as:

$$\Delta_g(a, b) = x_g(a) - x_g(b).$$

The local bipolar contribution of criterion g is determined by the indifference threshold q_g , the preference threshold p_g , and the criterion weight w_g . In a simplified analytical form, this contribution may be written as:

$$s_g(a, b) = \begin{cases} 0, & |\Delta_g(a, b)| \leq q_g, \\ w_g, & \Delta_g(a, b) \geq p_g, \\ -w_g, & \Delta_g(a, b) \leq -p_g, \\ 0.5w_g, & q_g < \Delta_g(a, b) < p_g, \\ -0.5w_g, & -p_g < \Delta_g(a, b) < -q_g. \end{cases}$$

The aggregated bipolar outranking relation is calculated as:

$$r(a, b) = \frac{\sum_{g \in \mathcal{G}} s_g(a, b)}{\sum_{g \in \mathcal{G}} w_g}, \quad r(a, b) \in [-1, 1].$$

A positive value of $r(a, b)$ indicates that alternative a outranks alternative b . A negative value indicates the opposite dominance relation. Values close to zero indicate weak preference, practical indifference or limited comparability. Therefore, the bipolar outranking model is more suitable for maritime decision-support tasks than a simple additive weighted model, because it preserves threshold logic and allows uncertain or weakly comparable situations to be represented explicitly.

The strict outranking relation is extracted as:

$$a \succ b \Leftrightarrow r(a, b) > 0.$$

The strict relation is then represented as an oriented graph [3]:

$$D = (\mathcal{A}, E), \quad E = \{(a, b) \mid r(a, b) > 0, a, b \in \mathcal{A}, a \neq b\}.$$

To quantify the structural dominance of each alternative in the strict outranking graph, the program calculates the net dominance indicator:

$$D_N(a) = d^+(a) - d^-(a).$$

where $d^+(a)$ is the number of outgoing strict dominance arcs from alternative a , and $d^-(a)$ is the number of incoming strict dominance arcs.

These values are defined as:

$$d^+(a) = |\{b \in \mathcal{A} \mid r(a, b) > 0\}|,$$

$$d^-(a) = |\{b \in \mathcal{A} \mid r(b, a) > 0\}|.$$

The program was implemented in Python in the JupyterLab environment. The main computational components include the creation of a Performance Tableau, construction of a Bipolar Outranking Digraph, extraction of the strict codual graph, ranking-by-choosing, GraphViz export, construction of analytical figures and automated report generation. The software pipeline uses Digraph3 for outranking analysis, NumPy and Pandas for data processing, Matplotlib for visualisation, GraphViz for graph representation and ReportLab for PDF reporting.

In the extended computational mode, sensitivity analysis is also performed. The weight of a selected criterion is perturbed by a multiplier k_g :

$$w_g' = k_g w_g.$$

For the grid-based sensitivity analysis, the multipliers for safety and compliance are varied as:

$$k_{SAF}, k_{COM} \in \{0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2\}.$$

In the Monte Carlo sensitivity analysis, all criterion weights are randomly perturbed within $\pm 20\%$: $w_g' = w_g(1 + \varepsilon_g)$, $\varepsilon_g \sim U(-0.2, 0.2)$.

The frequency with which an alternative appears in the first ranking class is calculated as:

$$F_1(a) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_i(a),$$

where N is the number of Monte Carlo runs, and $I_i(a) = 1$ if alternative a belongs to the first ranking class in the i -th run, otherwise $I_i(a) = 0$.

Conclusion. The research developed and tested an explainable decision-support program for selecting a tactical approach to the Port of Dover under multicriteria operational conditions [4,5]. The proposed model formalises the port-entry decision as a set of eight tactical alternatives evaluated according to safety, compliance, bridge workload, time to all-fast, tidal-window alignment, manoeuvring support, sensor redundancy and environmental impact. The use of Performance Tableau, benefit-normalised representation and bipolar outranking made it possible to integrate heterogeneous criteria without reducing the task to a simplified additive score.

REFERENCES

1. Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of ELECTRE methods. *Theory and Decision*, 31, 49–73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132>.
2. Bisdorff, R. (2022). Algorithmic decision making with Python resources: From multicriteria performance records to decision algorithms via bipolar-valued outranking digraphs. Springer Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90928-4>.
3. Gansner, E. R., & North, S. C. (2000). An open graph visualization system and its applications to software engineering. *Software: Practice and Experience*, 30(11), 1203–1233. [https://doi.org/10.1002/1097-024X\(200009\)30:11](https://doi.org/10.1002/1097-024X(200009)30:11).
4. Nosov, P. S., Palamarchuk, I. V., Safonov, M. S., & Novikov, V. I. (2018). MODELING THE MANIFESTATIONS OF THE HUMAN FACTOR OF THE MARITIME CREW. *Science and Transport Progress*, (5(77)), 82–92. <https://doi.org/10.15802/stp2018/147937>.
5. Nosov P., Krapyvko G., Ben A., Safonov M., Zinchenko S. Disabling the dynamic positioning of the vessel as a cause of the negative influence of human factor in maritime transport. МНПК пам'яті професорів Фоміна Ю. Я. і Семенова В. С. (FS — 2019), 24–28 квітня 2019, Одеса – Стамбул – Одеса. Pages 309–315.

ВПЛИВ ДАЛЬНОСТІ РОЗТАШУВАННЯ СУДЕН-ЦІЛЕЙ НА ЗДАТНІСТЬ МОДЕЛІ YOLOv8n РОЗПІЗНАТИ ЇХ РАКУРСИ

Пашенко О.Л.

*Національний університет «Одеська морська академія»
(Україна)*

Вступ. У сучасних системах забезпечення безпеки судноплавства все більшого значення набувають автоматизовані системи комп'ютерного зору, здатні виявляти судна та аналізувати навігаційну обстановку [1, 2]. У зв'язку з цим актуальним є дослідження можливості використання моделей комп'ютерного зору для автоматичного визначення ракурсу суден у реальних умовах морського середовища, а також аналіз факторів, що впливають на точність їх роботи, зокрема дальності спостереження.

Актуальність досліджень. На сьогодні більшість наукових досліджень у галузі морського комп'ютерного зору зосереджена переважно на задачах виявлення класу суден [3]. Відповідно до Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs), вирішальне значення має не тип судна, а його ракурс відносно спостерігача, оскільки саме він визначає інтерпретацію ситуації розходження та оцінку ризику зіткнення [4].

Постановка задачі. Метою даної статті є експериментальне дослідження ефективності використання моделей комп'ютерного зору для автоматичного виявлення суден та визначення їх ракурсу залежно від відстані до об'єкта спостереження.

Опис моделі. Для проведення дослідження була використана модель комп'ютерного зору на базі YOLOv8n. Для забезпечення розпізнавання суден, а саме їх ракурсу, модель була тренована на власному наборі даних, що в остаточному варіанті налічував 1742 зображення, 115 з яких – зображення навколишнього середовища без об'єктів розпізнавання. Роздільна здатність зображень навчальної вибірки починалася від 700 x 700 пікселів. Вона була сформована з урахуванням ключових факторів варіабельності реального морського середовища. Зображення включали судна різних типів, зняті в різних географічних регіонах, за різноманітних умов освітленості, відстаней та ракурсів [5]. Під час тренування моделі були застосовані техніки колірної, геометричної та просторової аугментації даних. Це дозволило значно підвищити її стійкість до складних погодних умов, змін освітлення та оптичних оклюзій [6].

У результаті багатоступеневого тренування моделі для розпізнавання ракурсу суден було проведено загалом 445 епох навчання, розподілених на дев'ять послідовних етапів. На фінальному дев'ятому етапі модель продемонструвала наступні показники: точність — 0.7034, повноту — 0.6098, середню точність при порозі IoU = 0.5 (mAP@0.5) — 0.6747 та середню точність у діапазоні IoU від 0.5 до 0.95 (mAP@0.5:0.95) — 0.5404. Крім того, вдалося суттєво знизити втрати за межами обмежувальних рамок до рівня 0.00477.

Опис дослідження. Для проведення експериментального дослідження була виконана зйомка з борту судна-спостерігача, що перебувало на рейді порту Чіттагонг (Бангладеш) в координатах 21°53' N, 091°48' E в період з 10 по 25 лютого 2026.

Зйомка здійснювалася камерою з роздільною здатністю 12 Мп та об'єктивом з діафрагмою f/1,6 у форматі 4K при 30 fps. При передачі даних роздільна здатність була зменшена до 1280 × 720 пікселів. Загалом було отримано 81 відео тривалістю до 7 секунд кожне, що становить понад 17 тисяч кадрів.

Відеозаписи охоплювали період з 06:00 до 19:30 за місцевим часом. У процесі спостережень судна знаходилися на різних дистанціях від судна-спостерігача — від безпосередньої близькості до борту судна до приблизно 1.9 морської милі. Верхня межа дистанції визначалася максимальною дальністю, на якій об'єкти залишалися у видимому діапазоні камери та могли бути зафіксовані на відео. Параметри оптичного збільшення камери залишалися незмінними. Таким чином, розмір об'єкта в кадрі зменшувався зі

збільшенням дистанції, що безпосередньо впливало на якість розпізнавання.

У процесі відеозйомки спостерігалися здебільшого балкери, контейнеровози та суховантажні судна. Більшість з них перебували на якорі та не здійснювали поступального руху. Водночас через хвильові коливання морської поверхні та зміну вітрових умов спостерігалося незначне обертання суден навколо якоря, а також мінімальні зміни їх просторового положення відносно камери.

Оцінювання ефективності роботи моделі штучного зору здійснювалося на основі аналізу результатів виявлення об'єктів на відео. Основною метою оцінювання є визначення здатності моделі коректно виявляти судна-цілі у полі зору камери, а саме правильно визначати їх локалізацію та клас відповідно до ракурсу спостереження.

Результати досліджень. Під час аналізу оброблених відеоматеріалів розглядалися такі можливі результати роботи моделі (рис. 1):

- правильне виявлення об'єкта (True Positive Correct, TP_c) — вірна локалізація і класифікація;
- помилка класифікації (True Positive Misclassified, TP_m);
- хибнопозитивне спрацювання (False Positive, FP);
- пропуск об'єкта (False Negative, FN).

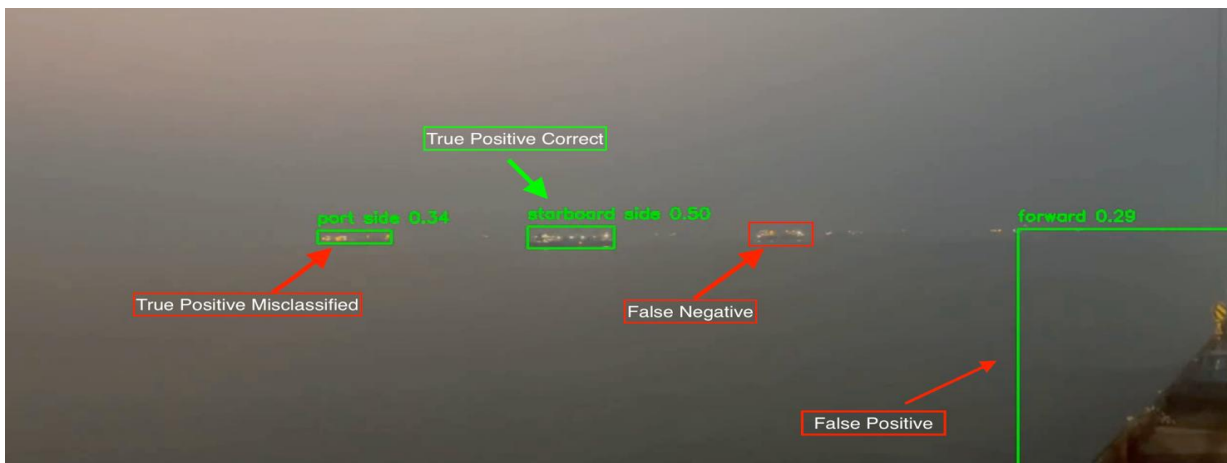


Рисунок 1 — Приклади результатів роботи моделі

Таким чином загальна кількість локалізованих об'єктів визначається як (1):

$$TP = TP_c + TP_m. \quad (1)$$

Для кількісної оцінки ефективності моделі використовувався показник середньої впевненості правильних виявлень (mean confidence of correct detections). Цей показник відображає рівень впевненості моделі лише у істинно-позитивних виявленнях (правильно визначений клас і точна локалізація об'єкта).

Значення показника розраховується як середнє арифметичне оцінок впевненості моделі за всіма істинно-позитивними виявленнями (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.

У межах дослідження цей показник аналізується залежно від відстані до об'єкта шляхом усереднення значень у відповідних групах спостережень (рис. 2). На відстанях до 1 морської милі показник середньої впевненості правильних виявлень у середньому становить 0.53. Максимальне значення — 0.77. На малих та середніх відстанях вплив атмосферних спотворень та обмежень роздільної здатності є мінімальним. На відстанях від 1 до 1.9 морських миль, показник середньої впевненості моделі значно погіршується. На практиці для зменшення кількості нестабільних детекцій та покращення сприйняття

інформації оператором, налаштовується поріг ідентифікації не нижче 0.5. Відповідно, модель не виводитиме на екран жодної ознаки ідентифікації об'єктів на відстанях від 1 морської милі.

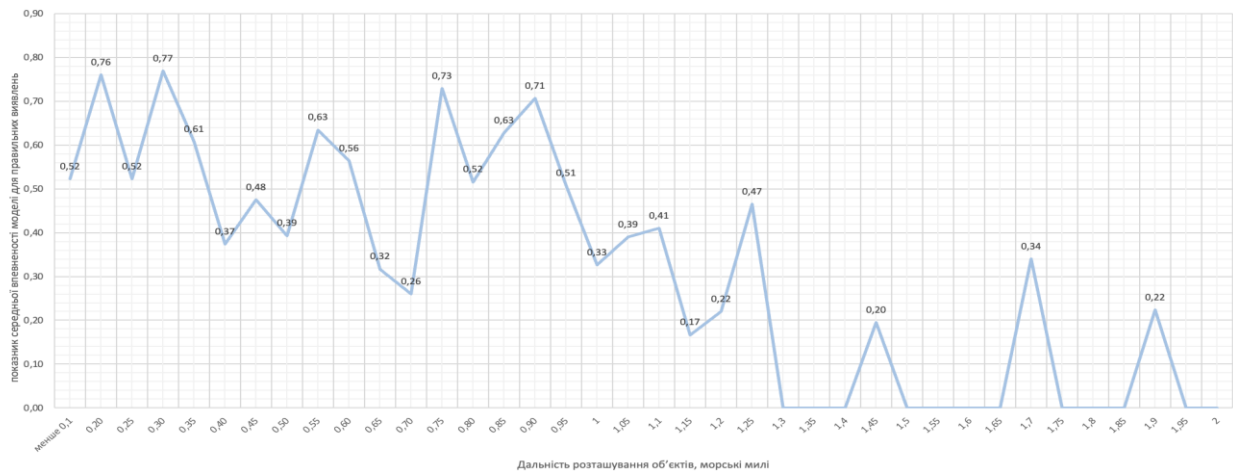


Рисунок 2 — Залежність показника середньої впевненості моделі для правильних виявлень від відстані

На рис. 3 наведено результати роботи моделі залежно від відстані до об'єкта спостереження. Отримані результати були поділені на 4 основні групи: правильне виявлення об'єкта, об'єкт був локалізований, хибнопозитивне спрацювання та пропуски об'єктів. Варто відмітити, що кількість вірно локалізованих об'єктів включає у себе вірно виявлені об'єкти. На відстанях менше 0.1 морської милі спостерігається велика кількість хибнопозитивних спрацювань. Це зумовлено тим, що при тренуванні моделі не були включені приклади зображень, на яких присутні елементи корпусу власного судна-спостерігача, що не підлягають виявленню.

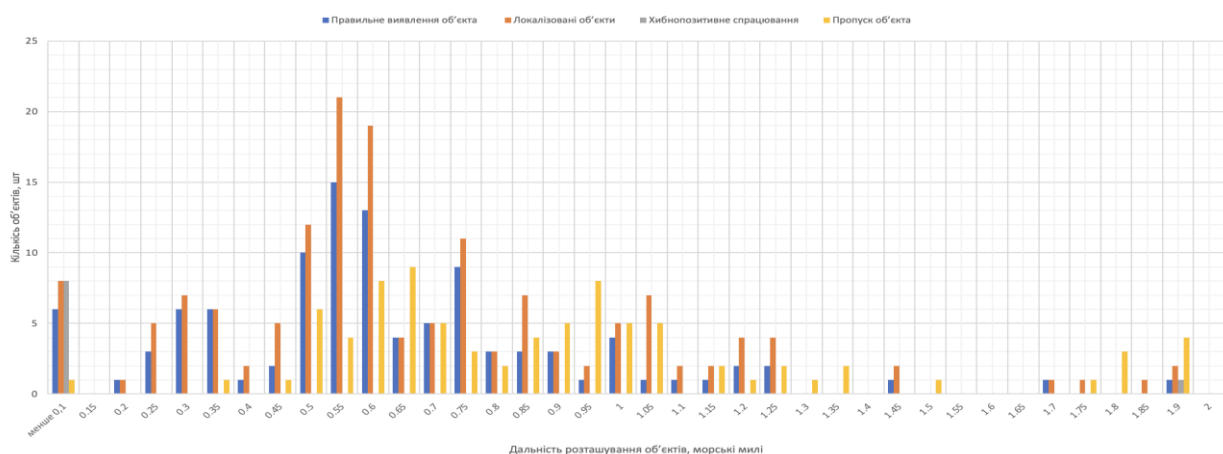


Рисунок 3 — Діаграма залежності результатів роботи моделі від дальності розташування об'єктів

На відстанях до 0.85 морських миль переважає кількість вірно визначених та локалізованих цілей-суден. На відстанях від 0.5 морських миль починається в середньому по шість пропусків на кожен відрізок відстані. Переважна більшість пропусків зумовлена наявністю великої кількості барж на відстанях від 0.5 до 1 морської милі (рис. 4), які модель не змогла локалізувати чи класифікувати. Тобто за великої кількості об'єктів розпізнавання модель демонструє тенденцію до пропусків, що є типовим обмеженням одностадійних детекторів типу YOLO при роботі зі сценами високої щільності та значної варіації масштабів.

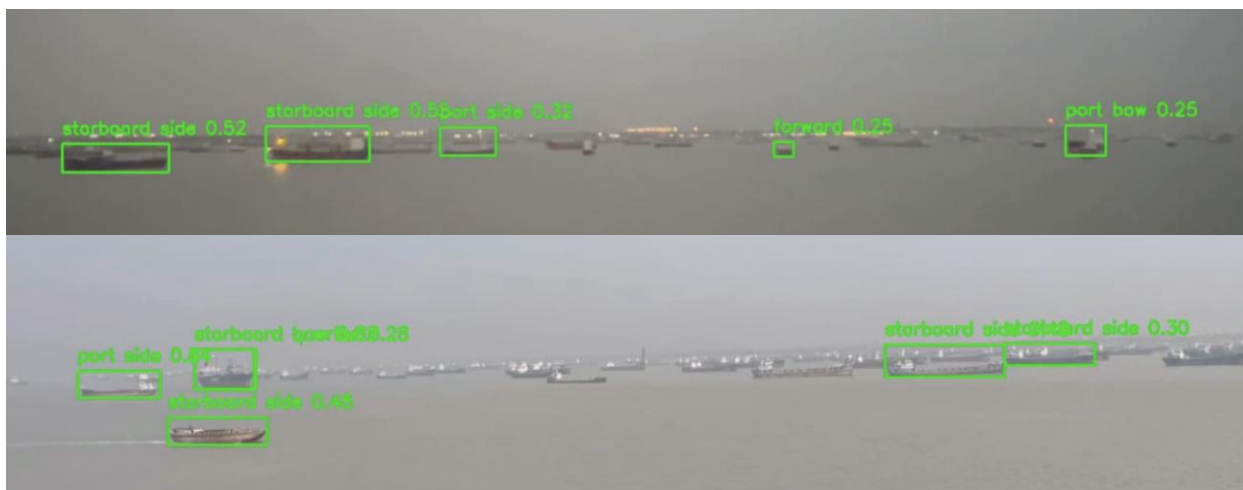


Рисунок 4 – Приклад пропусків суден-цілей, зумовлений інтенсивними вантажними операціями

Висновки. Експериментальне дослідження продемонструвало, що модель YOLOv8n здатна виявляти судна та визначати їх ракурс у реальних умовах морського середовища. Під час обробки відеоматеріалів було вірно локалізовано 152 об’єкти, з яких для 105 правильно визначено ракурс. Зафіксовано 84 пропуски та лише 9 хибних спрацювань.

Найкращі результати досягнуто на відстанях до 1 морської милі, де впевненість правильних виявлень сягала 0,77. На дистанціях від 1 до 1.9 морської милі якість детекції суттєво знижується.

Отримані результати підкреслюють сильну залежність ефективності роботи моделі від дальності спостереження. З урахуванням того, що в реальних умовах судноводії використовують оптичні засоби спостереження та може змінювати масштаб спостереження, перспективним напрямком подальших досліджень є використання адаптивного масштабування або мульти-масштабного аналізу зображень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wang Y., Li Z., Zhang H. Visual Navigation Systems for Maritime Smart Ships: A Survey. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 10. Art. 1781. DOI: 10.3390/jmse12101781.
2. Bo Z., Chen X., Li Y. Deep-learning-empowered visual ship detection and tracking: A review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2025. Vol. 130. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.107123.
3. Haijoub A., Hatim A., Guerrero-Gonzalez A., Arioua M., Chougali K. Enhanced YOLOv8 ship detection empower unmanned surface vehicles for advanced maritime surveillance. *Journal of Imaging*. 2024. Vol. 10, No. 12. P. 303. DOI: 10.3390/jimaging10120303.
4. Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea (COLREGs), 1972. London: International Maritime Organization, 1972.
5. Пашенко О. Л., Піпченко О. Д. Розробка моделі штучного зору на базі алгоритму YOLO для визначення ракурсу судна. *Судноводіння | Shipping & Navigation*. 2025. № 38. Режим доступу: <http://navjournal-nuoma.learnmarine.com/>.
6. Пашенко О. Л. 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.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ РЕАЛЬНИХ ТОЧОК ПОВОРОТУ СУДНА У ECDIS

*Петровський А.В., Ісайчев А.Г., Васильєв М.М.
Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Забезпечення безпеки судноплавства під час виконання поворотів вимагає від судноводія точного визначення моменту початку маневру, який прийнято характеризувати як точку перекладки руля (WOL). Коректне визначення цієї точки є критично важливим для зменшення відхилення судна від запланованої траєкторії та забезпечення безпечного проходження маршруту. Водночас у дослідженні [1] зазначається, що, попри важливість цього параметра, існує обмежена кількість систематизованих підходів до вибору оптимального способу визначення WOL для різних умов плавання. Це зумовлює необхідність узагальнення існуючих підходів та виявлення прогалин у їх застосуванні з метою подальшого вдосконалення методів розрахунку. Згідно з сучасними дослідженнями, визначення WOL може здійснюватися різними методами, серед яких виділяють повороти за сталою швидкістю зміни курсу (ROT), за фіксованим радіусом (Fixed Radius — рух по дузі сталого радіуса), за радіолокаційними орієнтирами (Radar-based turns — використання навігаційних відміток) та за фіксованим кутом перекладки руля (Fixed Rudder Angle — маневрування з постійним кутом руля) [1]. При цьому інші дослідники підкреслюють, що точність визначення WOL значною мірою залежить не лише від обраного методу, а й від динамічних характеристик судна та впливу зовнішніх факторів (вітру та течії), що обмежує ефективність застосування одного методу в різних навігаційних умовах [2]. У зв'язку з цим існує об'єктивна потреба у розробці адаптивних методів визначення WOL, які б враховували реальні навігаційні умови та параметри конкретного судна.

Актуальність досліджень. При попередній прокладці маршруту у ECDIS точки перекладки руля вважаються геометричними. У реальних умовах: судно має інерцію; рульовий привід має часову затримку; зовнішні збурення змінюють ефективний ROT. Тому фактична точка початку повороту завжди відрізняється від геометричної, запропонованої ECDIS. Невдало визначена WOL у поточних умовах приводить до зайвих дій підтримки судна на повороті, ймовірністю виходу поза межі XTD (Cross Track Distance) у вузькостях.

Аналіз досліджень. У сучасних дослідженнях, присвячених моделюванню з використанням нейромереж руху суден та їх керуванню, можна виділити низку важливих наукових робіт. У [3] було розроблено нейронну мережу (NN) для ідентифікації маневреності судна та його гідродинаміки; проте модель NN не враховує зовнішні впливи (вітер, хвилі, течії) і має обмежену структуру. У роботі [4] розширено застосування рекурентних нейронних мереж (RNN) для прогнозування маневреності та враховано історію руху, однак моделювання обмежується короткостроковими часовими рядами. Глибокі нейронні мережі (DNN), побудовані на реальних даних із бортового реєстратора рейсу судна (VDR), представлені в [5], проте вони суттєво залежать від великих обсягів реальних навігаційних даних. У роботі [6] наведено моделі RNN / Long Short-Term Memory (LSTM) / Gated Recurrent Unit (GRU) для прогнозування руху на хвилюванні, однак основна увага приділяється прогнозуванню реакції на хвилі, а не безпосередньо моменту перекладки руля. Моделювання маневреності на основі нейронних мереж із використанням зашумлених експериментальних даних розглянуто в [7], проте малий обсяг вибірки створює ризик перенавчання (overfitting) мережі. У дослідженнях [8] наведено приклад Fully Connected Neural Network (FCNN) для повністю непараметричного моделювання, яка, однак, є неефективною для малих наборів даних. Прогнозування траєкторії на основі Automatic Identification System (AIS) у поєднанні з NN представлено в [9], але дослідження більше зосереджене на траєкторії руху, ніж на моменті перекладки руля. Існування зацікавленості дослідників до використання методів інформаційних технологій при

побудові моделей керування судном, розрахунку WOL, доки не привела до визначення розробленими моделями таких точок реальної перекладки руля.

Постановка задачі. Побудувати інтелектуальну модель для розрахунку дистанції перед точкою WOL маршруту (look-ahead distance), де необхідно здійснити перекладку руля (для досягнення заданого кута повороту без зайвої інерції), і кута перекладки руля, який треба задавати в цій точці. Ці значення повинні залежати від швидкості судна V , ROT , осадки, характеристик рульового обладнання та гідродинаміки судна. Тобто потрібно мінімізувати перекладки руля, зменшити помилки слідування маршруту та врахувати інерційні властивості динаміки судна.

Потрібно розрахувати дистанцію до повороту маршруту, на якій потрібно починати перекладку руля, і кут перекладки руля у цій точці.

Основна частина. Вихідні дані:

V — швидкість судна;

ROT — фактична кутова швидкість повороту;

осадка/позиція центру ваги (за картами циркуляції);

характеристики ліній поворотів (маневреність з pilot карти циркуляції судна з вантажем та у баласті).

Нехай:

$P = \{(\text{широта}_i, \text{довгота}_i)\}$, - координати точок $i = 1 \dots N$ маршруту;

θ_i — курс плеча маршруту переходу $P_{i-1} \rightarrow P_i$;

$\Delta\psi_i$ — кут повороту між плечами маршруту ($\Delta\psi_i = \theta_{i+1} - \theta_i$).

Необхідно знайти функції f та g :

$$D_{\text{shift}} = f(V, ROT, \Delta\psi_i, \text{draft}, \dots)$$

$$\delta_{\text{cmd}} = g(V, ROT, \Delta\psi_i, \text{draft}, \dots)$$

де:

D_{shift} — дистанція до точки повороту;

δ_{cmd} — початковий кут перекладки руля.

draft — максимальна осадка судна (носова/кормова/мідель),

Обмеження $\Delta\psi_i$ — не більше 60° .

Дані для тренування. Потрібно сформувати датасет $D = \{X(k), Y(k)\}$, де:

$X(k)$ — вхідний вектор,

$Y(k)$ — правильні значення $D_{\text{shift}}, \delta_{\text{cmd}}$.

Джерелами навчальних даних можуть стати:

- емпіричні маневрові тести судна (серія поворотів при різних V , ROT , осадках; записані реальні точки початку перекладки руля);
- симулятор динаміки судна (BEM / CFD / MMSI-based). Чисельна модель руху для генерування даних, що дозволяє варіювати параметри (V , осадка, ROT).
- генератор синтетичних траєкторій (випадкова комбінація $\Delta\psi$, V , ROT приводить до симуляції відгуку; є корисним для розширення діапазону параметрів).

Структура бази даних для навчання:

Поле даних	Тип	Опис
V	float	Швидкість судна
ROT	float	Кутова швидкість повороту
$\Delta\psi$	float	Кут повороту маршруту
draft_mid	float	Осадка по міделю
draft_bow	float	Осадка носа
draft_stern	float	Осадка кормою
ballast_state	enum	Баласт / повне завантаження
D_{shift}	float	Ціль - дистанція
δ_{cmd}	float	Ціль - кут

Алгоритм тренування:

1. Підготовка даних.
 2. Нормалізація ознак.
 3. Розбиття на train/val/test.
 4. Навчальна функція loss:

$$L = \alpha * MSE(D\_shift\_pred, D\_shift\_true) + \beta * MSE(\delta\_cmd\_pred, \delta\_cmd\_true)$$
 5. Оптимізація. Оптимізатор: Adam/AdamW/learning rate scheduler
 6. Валідація. Крос-валідація
 7. Перевірка на симульованих заданих маршрутах.
 8. Оцінка якості моделі MAE, RMSE.
 9. Графічний аналіз помилок.
- Обмеження та припущення.

Обмеження	Вплив
Дані обмежені по V	Модель може бути неточною при V поза діапазоном навчання
Нелінійні ефекти хвиль/вітру	Потрібно окрему модель або вводити параметри хвиль
Інші силові впливи	RPM, зміна баласту в реальному часі
Наявність достовірних маневрових даних	Якість моделі залежить від даних

Технічні припущення: система рульового управління лінійна у малих кутах, ROT пропорційний кутовій швидкості і карти циркуляції забезпечують достатню точність даних.

Висновки. Запропонована модель побудови математичної та ML-моделі, яка розраховує оптимальні дистанції перекладки руля, враховує осадку, швидкість, ROT, базується на нейронних мережах із правильною структурою датасету, має чіткий алгоритм тренування і обмеження. Повний опис моделі з поясненнями наданий у [10].

ЛІТЕРАТУРА

1. 1. Kamis A. S., Ahmad Fuad A. F., Anwar A. Q. Systematic Literature Review on Wheel-over Point Techniques for Efficient Ship Manoeuvre. Transactions on Maritime Science. 2022. Vol. 11(2). URL: <https://www.toms.com.hr/index.php/toms/article/view/558>
2. 2. Skoko I., Musulin M., Musulin H. N., Boko Z. Impact assessment of external factors on the constant radius turn technique in the calculation of wheel over point. Transportation Research Procedia. 2025. Vol. 83. P. 375-381. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146525000511>
3. Luo W., Zhang Z. 2016. Modeling of ship maneuvering motion using neural networks. Journal of Marine Science and Application. 15, 426-432. DOI:10.1007/s11804-016-1380-8
4. Lizhu Hao, Yang Han, Chao Shi, Ziyang Pan. 2022. Recurrent neural networks for nonparametric modeling of ship maneuvering motion. 2022. Int. J. Naval Archit. Ocean Eng. 14, 100436. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2022.100436
5. Zongkai Wang, Jinsoo Kim, Namkyun Im. 2023. Non-parameterized ship maneuvering model of Deep Neural Networks. Ocean Engineering. 284, 115162. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115162
6. D'Agostino, D., Serani, A., Stern, F. et al. 2022. Time-series forecasting for ships maneuvering in waves via recurrent-type neural networks. J. Ocean Eng. Mar. Energy 8, 479–487. DOI: 10.1007/s40722-022-00255-w
7. Lúcia Moreira, C. Guedes Soares. 2023. Simulating Ship Manoeuvrability with ANNs trained by a short noisy dataset. MDPI J. Mar. Sci. Eng. 11(1), 13. DOI: 10.3390/jmse11010015
8. Hong-Wei He, Zi-Hao Wang, Zao-Jian Zou, Yi Liu. 2022. Nonparametric modeling with fully connected NN. Ocean Engineering. 251, 111113. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111113
9. Tamara A. Volkova, Yulia E. Balykina, Alexander Besspalov. 2021. Predicting Ship

Trajectory Based on NN Using AIS Data. J. Mar. Sci. Eng. 9(3), 254. DOI: 10.3390/jmse9030254
10. Петровський А.В., MANOEUVRING-CHART-ASSISTED NEURAL
NETWORK TURNING MODELS «MCA NN turning models». Авторське свідоцтво №143269
від 23.02.2026

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОХИБКИ ПРОГНОЗУ ТРАЄКТОРІЇ СУДНА В ECDIS

*Петровський А.В., Жмур В.М., Пушин О.В.
Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Функція прогнозування траєкторії судна є однією з базових у сучасних навігаційних системах, зокрема у ECDIS. Вона використовується для оцінки майбутнього положення судна при вирішенні задач розходження, проходження вузькостей, а також при аналізі безпеки відносно глибинних обмежень (safety contour, limited danger lines) (рис.1).

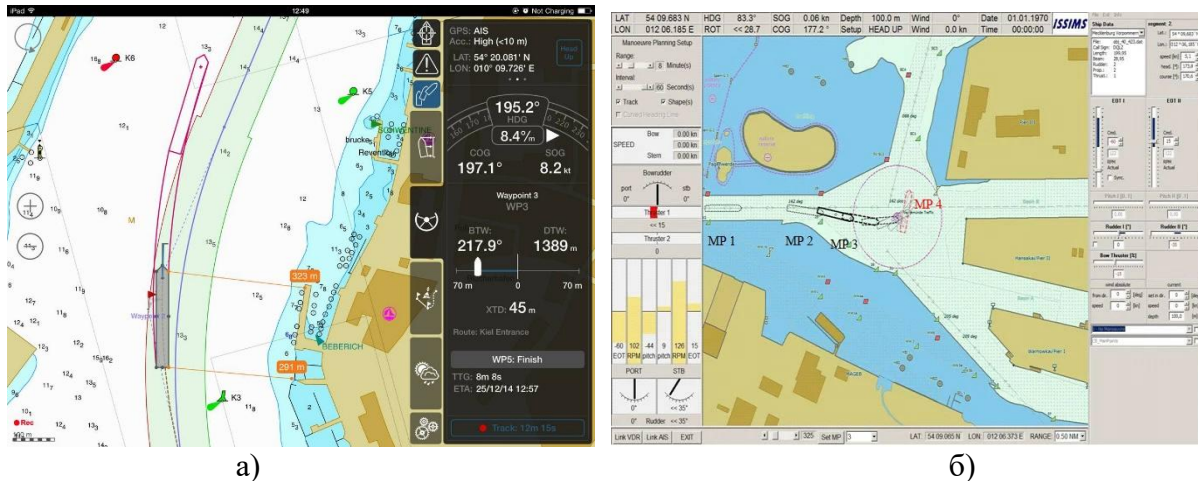


Рисунок 1 — Використання предиктору ECDIS (а — моб.застосунок Transas/Wärtsilä; б — ISSIMS)

Разом із тим, будь-який предиктор, незалежно від складності, стикається з фундаментальним обмеженням: неможливістю точно передбачити рух судна на скінченному горизонті часу. Це обмеження не є наслідком недосконалості конкретної реалізації, а виникає з природи самої задачі.

Аналіз досліджень. Як зазначено у [1], повна динаміка судна описується нелінійною системою рівнянь із великою кількістю параметрів, частина з яких є змінними або невідомими. Це означає, що навіть за наявності точної математичної моделі залишаються фактори, які не можуть бути враховані у прогнозі. У цьому контексті ключовим стає питання не точності як такої, а закону зростання похибки прогнозу. Практичні спостереження та численні дослідження показують, що похибка збільшується зі збільшенням горизонту прогнозу [2, 3]. Однак у більшості робіт це явище констатується емпірично без детального фізичного пояснення. У [2] роботі обґрунтовується, що похибка прогнозу траєкторії судна зростає щонайменше квадратично з часом, і цей результат безпосередньо впливає з 6-DOF моделі руху судна.

Сучасні підходи до прогнозування траєкторії судна можна умовно поділити на три основні групи: кінематичні моделі та динамічні моделі і методи машинного навчання. Ця класифікація узагальнена у [2], де показано, що жоден із підходів не забезпечує стабільної точності при збільшенні горизонту прогнозу.

Кінематичні моделі базуються на припущенні сталості параметрів руху: швидкість (SOG), курс (COG) і швидкість повороту (ROT). Такі моделі використовуються у більшості реалізацій ECDIS через їх обчислювальну ефективність. Однак їх основне обмеження полягає в тому, що вони: не враховують інерцію, ігнорують боковий дрейф і не враховують зміну зовнішніх сил. Як показано у [3], такі моделі демонструють значне зростання похибки навіть на коротких часових інтервалах.

Динамічні моделі базуються на рівняннях руху судна, включаючи: 3-DOF (surge,

sway, yaw) / 6-DOF (повна модель). Модель типу Nomoto model широко використовується для опису керованості судна, однак вона є лінійною апроксимацією і не враховує повної нелінійної динаміки. Більш повні моделі, описані у [1], дозволяють врахувати: гідродинамічні сили, інерційні ефекти і взаємодію ступенів свободи. Проте навіть ці моделі мають обмеження, пов'язані з: невизначеністю параметрів, складністю ідентифікації і залежністю від умов експлуатації [4].

Методи на основі AIS-даних (LSTM, GRU) дозволяють підвищити точність короткострокового прогнозу [3,5]. Проте вони: не враховують фізику процесу, погано узагальнюються на нові умови і демонструють зниження точності при збільшенні горизонту прогнозу. Дослідження [6,7] показали: ці моделі ефективні лише в межах статистично подібних сценаріїв.

Постановка задачі. Незважаючи на різноманіття підходів, всі дослідження зводяться до одного: похибка прогнозу позиції судна зростає з часом. Однак у більшості випадків відсутнє пояснення, чому саме цей ріст має нелінійний (зокрема квадратичний) характер. Джерела невизначеності залишаються у 6DOF-моделях і ключовим є те, що вектор сил включає компоненти, які не можуть бути точно виміряні і передбачені. До них належать: вітрове навантаження, наявність течії, хвильові сили і дії судноводія. Це означає, що навіть при ідеальній моделі існує невизначене прискорення.

Помилка прискорення (невраховане прискорення) системи:

$$\delta a = a_{real} - a_{pred}. \quad (1)$$

a_{real} — реальне прискорення судна (в 6-DOF моделі воно визначається як результат: тяги гвинта, гідродинамічного опору, вітру, хвиль, течії, реакції керма, взаємодії всіх 6 ступенів свободи).

a_{pred} — передбачене прискорення. Цей параметр, який обчислює предиктор ECDIS, базується на: поточних значеннях SOG, COG, припущенні «як буде далі» і спрощених або усереднених силах. Важливо розуміти, що модель «не знає» майбутніх зовнішніх впливів майбутніх дій керма, тому: $a_{real} \neq a_{pred}$

Швидкість:

$$v(t) = \int a(t)dt.$$

Тому різниця швидкостей:

$$\delta v(t) = \int (a_{real} - a_{pred})dt = \int \delta a(t)dt,$$

t — час для предиктору (хв).

Позиція:

$$r(t) = \int v(t)dt$$

Похибка позиції:

$$E(t) = \int \delta v(t)dt \quad (2)$$

Якщо $\delta v(t) \sim t$, тоді

$$E(t) \sim \int t dt = \frac{t^2}{2}.$$

Фізичний сенс: якщо помилка прискорення існує, то швидкість змінюється, наслідком є інша, за передбачену, позиція.

Узагальнена модель помилки:

$$E(t) = at + bt^2, \quad (3)$$

де:

at — лінійний член (похибки вимірювань). Джерелами є систематична похибка GPS,

постійний bias у COG/SOG, стабільна течія, яку не врахували, і, тоді $E_{bias}(t) \sim t$; bt^2 — квадратичний (надає ефект динаміки). Джерела: помилка прискорення, невраховані сили в 6-DOF, неточна модель гідродинаміки і зміна керування. Тоді $E_{dynamic}(t) \sim t^2$.

При великих t $bt^2 \gg at$, тому $E(t) \approx bt^2$.

Дві помилки додаються внаслідок різної природи існування:

$$E(t) = E_{bias} + E_{dynamic}. \quad (4)$$

Стохастичне розширення:

$$E(t) = \delta\sqrt{t} + at + bt^2, \quad (5)$$

де:

$\delta\sqrt{t}$ — випадковий шум (випадкові похибки GPS, шум AIS, мікроколивання курсу);

at — систематичний дрейф (незбалансовані течії, стабільна похибка курсу, bias моделі);

bt^2 — динамічне зменшення (помилка прискорення, невраховані сили, 6-DOF нелінійності).

Основною концепцією є твердження, що будь-яка помилка, що впливає на прискорення, після двох інтеграцій стає квадратичною по часу. Цей момент є важливим, оскільки предиктор працює в площині 2D і використовує кінематичні припущення, також він не моделює повний 6-DOF (розглядається реальний ECDIS на борту судна).

Узгодження з експериментами [2]: RMSE зростає нелінійно і похибка різко збільшується після 3–5 хв. Дослідження [3] показують аналогічний ефект для нейромережових моделей.

Висновки. Навіть при використанні повної 6-DOF моделі невизначеність залишається і похибка неминуча. Зростання похибки прогнозу траєкторії судна має фундаментальний характер і вона неминуче зростає з часом через накопичення неврахованих динамічних впливів. Запропонована модель показує пряму пропорційність похибки предиктора квадрату часу. Це означає, що короткостроковий прогноз є відносно надійним, а довгостроковий прогноз швидко втрачає точність і виникає необхідність розширення зони невизначеності з часом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Fossen (2011), Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control. Hoboken, NJ: Wiley. p.30 <https://scispace.com/pdf/handbook-of-marine-craft-hydrodynamics-and-motion-control-2qu7epb0pt.pdf>
2. Zhang, X., et al. (2024). A review of vessel trajectory prediction methods for maritime navigation. Journal of Marine Science and Engineering, 12(1), 107. <https://doi.org/10.3390/jmse12010107>
3. Wang, Y., et al. (2020). Ship trajectory prediction using LSTM networks. Sensors, 20(18), 5133. <https://doi.org/10.3390/s20185133>
4. Prof. Hajime Maruo. The excess resistance of a ship in rough seas. International Shipbuilding Progress, 4(35), 354–370. <https://doi.org/10.3233/ISP-1957-43501>
5. Pallotta, G., Vespe, M., Bryan, K. (2013). Vessel pattern knowledge discovery from AIS data. Entropy, 15(6), 2218–2245. <https://doi.org/10.3390/e15062218>
6. Perera, L. P. (2023). Machine intelligence for maritime navigation: A review. Ocean Engineering, 278, 114318. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114318>
7. Liu, Z., et al. (2023). Ship trajectory prediction using deep learning. Ocean Engineering, 281, 114824. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114824>

НЕЧІТКА КОГНІТИВНО-РЕЛЯЦІЙНА МОДЕЛЬ АДАПТАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СУДНОВОДІЄМ

¹Передерій В.І., ²Борчик Є.Ю.

¹Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова
(Україна)

²Миколаївський національний аграрний університет
(Україна)

Вступ. Адаптація процесу прийняття рішень судноводієм у реальному часі є критичним аспектом сучасної морської навігації, спрямованим на підвищення безпеки мореплавства та ефективності управління судном у складних умовах. Це динамічний процес, який поєднує людський фактор із використанням інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень (DSS — Decision Support Systems).

На даний час основними напрямками адаптації та оптимізації цього процесу є [1]:

1. Зниження інформаційного навантаження в умовах інтенсивного руху та обмеженого часу на прийняття рішень судноводієм.

2. Використання інтелектуальних систем для оперативного оцінювання дій судноводія та корекції його рішень у реальному часі.

3. Адаптація процесів управління судном з урахуванням зміни структури ергатичних систем (взаємодія «людина-машина»).

4. Професійна адаптація для підготовки до прийняття рішень у стресових ситуаціях.

Загалом, адаптація процесу прийняття рішень спрямована на мінімізацію впливу людської помилки шляхом інтеграції сучасних інженерних та інформаційних технологій.

На сьогодні висока динамічність змін середовища, складність технічних систем та багатоаспектність факторів ризику зумовлюють необхідність використання формалізованих математичних підходів, серед яких реляційні моделі займають провідне місце в адаптації процесу прийняття рішень судноводієм [2].

Для дослідження взаємозв'язків між факторами та аналізу їх сукупного впливу на процес прийняття рішень судноводієм доцільно застосовувати когнітивні моделі, що дозволить відобразити причинно-наслідкові залежності між відповідними факторами. Поєднання когнітивних моделей з реляційним поданням даних дозволить реалізувати сценарний аналіз і прогнозування зміни рівня релевантності процесу прийняття рішень.

Таким чином, методи оцінювання та адаптації повинні застосовуватися у комплексі. Поєднання нечіткої логіки, байєсівських мереж довіри, експертних оцінок, аналізу ризиків FMEA, реляційного аналізу та когнітивного моделювання забезпечить всебічний та науково обґрунтований підхід до оцінювання та адаптації процесу прийняття рішень судноводієм, дозволить врахувати невизначеність, багатофакторність і динамічний характер зміни впливових факторів та створить основу для подальшого дослідження і підвищення рівня релевантності процесу прийняття рішень [3].

Запропонована нечітка когнітивно-реляційна модель адаптації процесу прийняття рішень представляє комплексний підхід до управління в умовах невизначеності, який поєднує методи штучного інтелекту, когнітивного моделювання та реляційної структури даних. Вона дозволяє адаптувати управлінські рішення до змін зовнішнього середовища, враховуючи нечіткість інформації та складні взаємозв'язки між елементами ситуації.

На основі результатів дослідження та аналізу факторів, що впливають на процес прийняття рішень, визначено наступні ключові групи [4]:

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

Показники впливу людського фактору на процес прийняття релевантних рішень пов'язаних з гідрометеорологічним впливом $Sw = f_1(EA, SE, F, ET)$: ET — емоційна

напруженість; F — фізична та емоційна втома; SE — стрес через емоційну напруженість; EA — емоційне збудження.

Фактори пов'язані з поточним емоційно-когнітивним станом судноводія

$Sp = f_2(PR, PI, RT, DT, C)$: PR — продуктивність; PI — сприйняття інформації; RT — час реакції; DT — час на прийняття рішень; C — зосередженість.

Виходячи з аналізу зазначених факторів на рисунку 1 наведена нечітка когнітивно-реляційна модель адаптації процесу прийняття рішень судноводієм.

Особливість цієї схеми полягає в тому, що кожний блок-фактор безпосередньо впливає на всі блоки нижнього рівня.

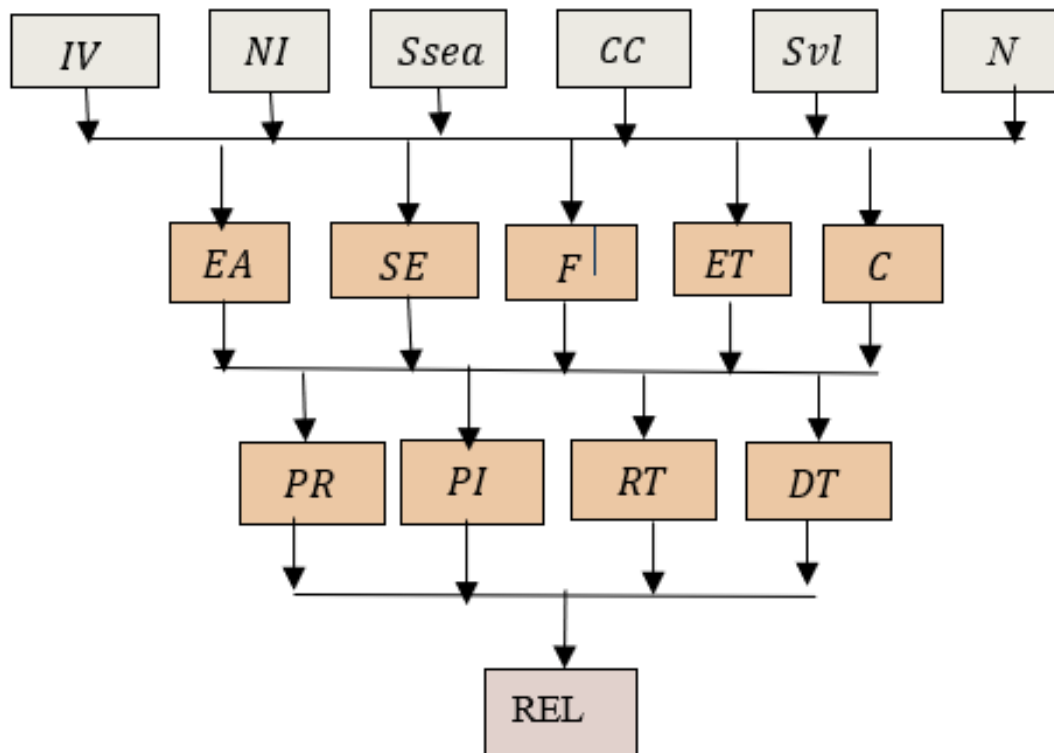


Рисунок 1 — Нечітка когнітивно-реляційна модель адаптації процесу прийняття рішень судноводієм

Особливістю зазначених факторів впливу на процес прийняття рішень судноводієм є неможливість їх прямого вимірювання, оскільки вони мають ймовірнісну природу та часто характеризуються невизначеністю. Для розв'язання цієї проблеми реляційна модель може бути інтегрована з ймовірнісними методами, зокрема Байєсовими мережами, які дозволяють оцінювати рівень ризику на основі умовних залежностей та неповних даних. Такий підхід уже довів свою ефективність для систем критичного призначення, де нечіткі фактори важко оцінити традиційними методами [4, 5]. Для оцінки та адаптації процесу прийняття рішень судноводієм, розроблена Байєсова мережа довіри (БМД), яка представляє ймовірнісну графічну модель, що є набором випадкових величин та їх умовних ймовірностей за допомогою ациклічного орієнтованого графа (рис. 2).

Для будь-якої множини випадкових величин (вершин) $A_1, A_2, \dots, A_n$ БМД ймовірність спільного розподілу обчислюється за умовними ймовірностями за ланцюговим правилом наступним чином:

$$P(A_1, \dots, A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i | \text{Parents}(A_i)),$$

де $\text{Parents}(A_i)$ — змінні — предки змінної A_i .

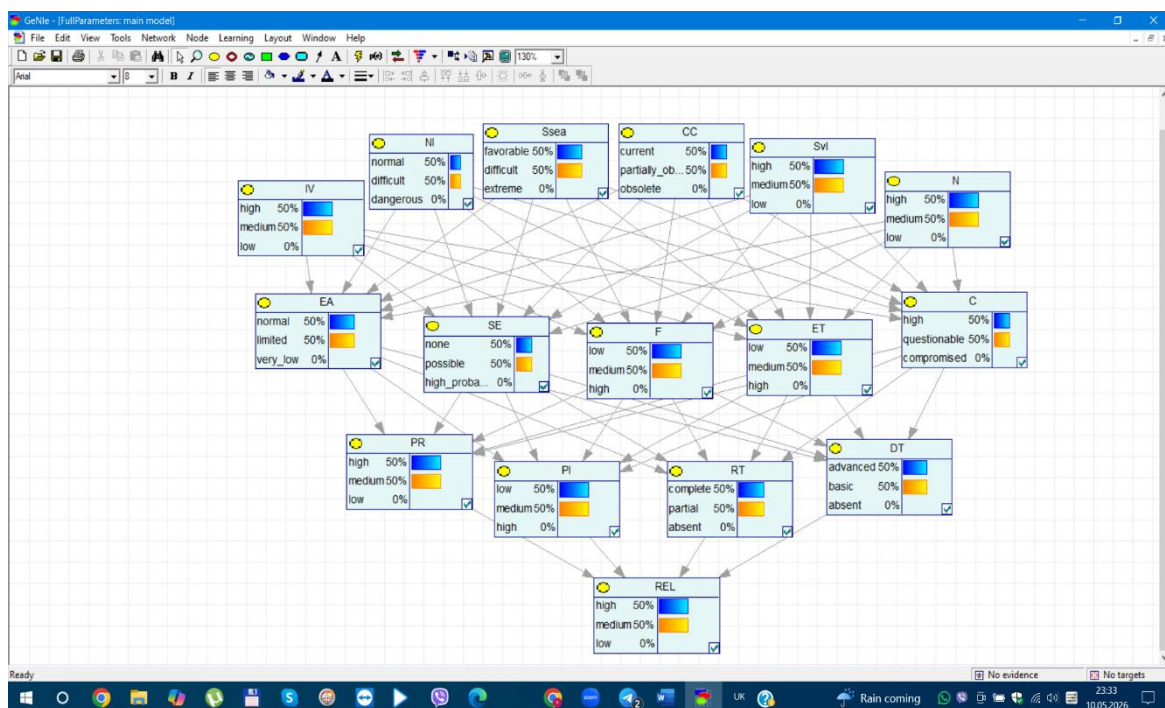


Рисунок 2 — Байєсовська мережа довіри оцінки та адаптації процесу прийняття рішень судноводієм

Якщо оцінка релевантності прийняття рішення судноводієм $REL = F(Sext, Sp, Sw) \geq \text{sufficient}$, то процес прийняття рішень вважається адаптованим. В іншому випадку необхідна корекція зазначених впливових факторів у відповідності до нормативних вимог.

Висновки. Запропонована нечітка когнітивно-реляційна модель забезпечить всебічний та науково обґрунтований підхід до оцінювання та адаптації процесу прийняття рішень судноводієм, дозволить врахувати невизначеність, багатофакторність і динамічний характер зміни впливових факторів та створить основу для подальшого дослідження і підвищення рівня релевантності процесу прийняття рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Allianz Global Corporate & Specialty. Press release June 4, 2019. URL: <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/news/safety-shipping-review-2019.html> (Last accessed 02.01.2020).
2. Gylka, U. (2020). Виявлення ролі людського фактора в аварійності морського транспорту. Розвиток методів управління та господарювання на транспорті, (1 (70)), 31–43. <https://doi.org/10.31375/2226-1915-2020-1-31-43>
3. Slam, N., Li, X., & Feng, B. A (2023). Heuristic-Primed Decision-Making Model under the Assumption of Bounded Resources. Comput. Sci. Math. Forum, 8, 42. <https://doi.org/10.3390/cmsf2023008042>
4. В. І. Передерій, Є. Ю. Борчик. Оцінка та підтримка функціональної стійкості засобів водного транспорту. Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2025. No 2(31). С. 64–76
5. Perederyi, V., Borchik, E., Zosimov, V., Bulgakova, O. (2024). Assessment and Support of Critical Multilevel Infrastructure Security Using Information and Cognitive Technologies. In: Hu, Z., Zhang, Q., He, M. (eds) Advances in Artificial Systems for Logistics Engineering IV. ICAILE 2024. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 223. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-72017-8_8

PRACTICAL APPLICATIONS OF THE «WHOLENESS, MEANING, AND LIVING (SMART) STRUCTURE» RESEARCH PROGRAM

Prokopchuk Yu.

*Institute of Technical Mechanics of NASU
(Ukraine)*

Introduction. Many questions regarding Artificial Intelligence (AI) systems reside in the domain of the nature of their processes and how much these processes are similar to human cognition. Recent advances in AI have produced systems capable of increasingly sophisticated performance on cognitive tasks. However, AI systems still struggle in critical ways: robustness, explainability, cooperation, meta-cognition, imagining, safety, wise [1]. Promising directions for understanding how humans discover and forge connections between seemingly disparate domains are explored within the Google Project «Paradigms of Intelligence» (Pi) [2]. The results of Project «Pi» demonstrate that the social organization of thinking enables effective exploration of the solution space (Societies of Thought) [2]. The author has been conducting the «Wholeness, Meaning, and Living (Smart) Structure» research program for many years [4], [5]. The program aims to develop a conceptual framework of a «Mind» model designed to yield insights for addressing both cross-disciplinary scientific challenges and technical hurdles in AI system implementation. The key aspects of the program include [4], [6], [7]:

- System openness and continuous self-improvement based on «living experience»; Penetration of the «World Model» into the environment/society («Extended Mind»); formation of a dynamic «Agent's Intellectual Web»; Human-Agent AI Teaming.

- Information «meaning» generation; meaning-centric communication (ensuring rapid and lean decision-making and control data transmission); Communication overhead is reduced as nodes achieve mutual understanding via shared semantic structures, which is vital for bandwidth-limited aerospace and transport environments, as well as for swarm intelligence systems (this transforms bandwidth constraints from a critical vulnerability into a factor that stimulates the system's cognitive efficiency). Epistemic agency in verifying information.

- The features of «criticality» and «controlled hallucination» as the basis for «lean cognition» and for navigating the radical uncertainty of the World.

- The «System 0/1/2/3» framework — the nature of human reasoning — («The Enigma of Reason»: encompassing extended complementarity and generalized entanglement; the tension between simplicity and complexity) and the «Subjective Space-Time-Language-Action» continuum as the basis for experience and inference mechanisms (high-level event perception — «Living experience»; human causal learning in a continuous time and space setting); Abstract Sequences of Spatio-Temporal Primitives (Templates: latent structure learning).

- «Goal-directedness» based on embodied and multi-scale distinction tasks (tasks of perceiving difference); implicit «maturation» of problem-solving mechanisms — integration of reasoning & learning (the «arrows of cognition»; Orchestration Layer: Networks of Control Mechanisms); Computational proto-qualia; «Attention» as a «phase energy spot» (A 'global resonance' resulting in decoherence or «situational awareness»: Internal competition: The contention ends once a single 'meaning' triumphs, emerging as the awareness of the situation; 'Spot' control); Fundamentally, LGP states: to «reach awareness», the system must achieve internal alignment across all levels of generalization. An important mechanism of decoherence that ensures alignment is 'controlled hallucination' (this explains how 'internal competition' is resolved in favor of the most probable and consistent image).

- Emergence of «art-sketches» (imagination) and their enactment in «reality» (human-like imagination in AI; incorporating «dark decisions» and «freedom of Mind» — the key obstacle to achieving AGI). «The Language of Thought». The Emergence of Language. Inference without Awareness, Unconscious Inference. A Theory of Learning to Infer (based on System 0/1/2/3).

- The parts are as complex as the whole. Everything is enfolded into everything. ALL of

Nature's laws work (ALL formal approaches).

- Total diversification of measurement/control channels, execution mechanisms (total audit of information flows: «Artificial connectome»).
- Embodied multi-scale and competition at all levels («tangled hierarchies»); The system does not merely adapt, but reconfigures itself to operate at a new scale.
- Processual Source of Continuous Creation: Infinite Causal Effects Argument.
- Self-transcendence for situational 'boundary leaping' (extension of pattern-related Possibility Spaces).

For the implementation of cross-domain practical applications, the author develops the «Limit Generalization Paradigm» (LGP: Unifying Principles of Generalization) [4]. Generalization, defined as applying limited experiences to novel situations, represents a cornerstone of human intelligence. A mathematical model of «wholeness» is developed [5]. Technically, this approach relies on the «Smart-Everything Paradigm». For example: Any Sensor is a Cognitive Sensor or Cognitive Agent [8]. A future-oriented solution is the «Thinking Swarm of Cognitive Agents» [9]. The «NASA Autonomous Systems Platform» can serve as an example of such a cognitive platform.

Cognitive Technical Systems (CTS): Cognitive/Autonomous Platform Engineering.

Building machines that learn and think with people; Human Cognition in Machines. Resource-limited «Thinking machines» / «Strange (mental) machines» / «LGP-Machine» can navigate ambiguity, radical uncertainty, novelty, and chaos by leveraging efficient task-level policies and high-level metacognitive strategies [8], [9]. The key to this is continuous self-development and self-improvement (primarily of the control/thinking system), including the overcoming of «deadlocks» through self-transcendence. Self-transcendence during the expansion of sketch networks is considered the foundation for a formal solution to the «architectural trap» problem. A «living (smart) structure» does not merely optimize existing parameters; it is capable of a qualitative leap. When the system's logic reaches a «deadlock», it reassembles its world model at a new level of wholeness, transforming the problem into a new opportunity. It does not simply «solve» the problem, but uses it as a fulcrum to reach a new level (the essence of antifragility). A control error (a failure in the distinction task) is not a software crash, but an 'informational gift' that forces the system to reassemble into a more advanced form. This is precisely the mechanism that allows «Mind» to overcome «radical uncertainty» (along with criticality, «controlled hallucination», and a network of assistants/LRM).

System 3: Visioning Human-Agent AI Teaming: conceptualizing delegated agency:

a perspective on co-agency, innovation, and ecosystem transformation (LGP/LLM Assistant ecosystem). As Vygotsky proclaimed nearly a century ago, «Through others, we become ourselves». An agent's sketch networks can be distributed within its «intellectual web» and the physical environment (external sketches; Mental Models in Human-AI Interaction). LGP explores the potential of new forms of interconnectedness and rhizomatic entanglements between humans and the world, transcending the boundaries between species and material domains. The world is described as a single fabric (Wholeness), where the boundaries between the «living» and the «technological» become transparent. The interpenetration of sketches among subjects fosters social entanglement, creating a conceptual space for socio-subjectivity and a formal theory of collective cognitive models (epistemic authority is constructed and stabilized in human-AI interaction). In this framework, the interpretations provided by others become a fundamental source of internal cognitive otherness (Mind emerges through the crucible of interaction; the ability to see things from a completely new perspective). From the interpretations of events by Others, there automatically emerge «sketches of the Others' sketch networks», which form the basis of the «Theory of Mind».

Human-Agent AI Teaming plays a key role in the «general mathematical/conceptual signal/variable model» based on a «network of distinction tasks» [4], [8] (Networks of Causal Interpretive Variables, Signaling Networks, Computational Proto-Qualia; System-Level Architecture of Fractal-Like Sensor Networks; Engineering Applications of Fractal-Like Sensors:

Fractal-Like Interfaces; Cross-Scale Interactions). This model encompasses all forms of hybrid interactions across various scales, different types of formalisms, and «lived experience». In this framework, «lived experience» serves as a vital counterbalance to formal constraints, ensuring the essential flexibility and «human quality» of the system. Whenever formal constraints result in an «architectural trap», lived experience provides the necessary impetus to bypass or redefine them. This evolution shifts the system from a mechanical paradigm to an organic one, establishing «humanity» as the ultimate mode of adaptability rather than a liability. This renders the system antifragile: as environmental pressures mount, the system increasingly draws upon «lived experience» to fuel its own transformation. As the complexity of the surrounding world increases, the «living (smart) structure» gains depth and sophistication, transmuting external pressures into an emergent form of «Mind» (socio-entangled, distributed, and infinitely/boundarylessly adaptive).

Faced with an aggressive environment, the «living (smart) structure» (all types of sketch networks) remains resilient, triggering a self-transcendence phase in which it reconfigures its internal «sketches» to achieve a heightened level of complexity that was hitherto unattainable (mechanism for overcoming the limit). The aggression of the environment serves as a catalyst that forces the system to acknowledge the insufficiency of its existing (current) models. An example is the «arrows of cognition» («epistemic arrows») in tasks of discernment.

The model emphasizes that a «living (smart) structure» is not a static blueprint, but a dynamic system operating across all levels of reality simultaneously. This is precisely what allows the model to remain a «single fabric» (Wholeness) while preserving the complexity of its internal mechanisms. The system achieves Wholeness not by simplifying its parts, but through their harmonious integration. This is what makes the structure «smart» — its ability to be simultaneously simple in its wholeness and infinitely complex in its details (the model's dialectical core: a synthesis of global simplicity and local complexity).

In complex systems, simple global rules often give rise to infinitely complex local behavior (and vice versa). A «living (smart) structure» maintains this balance, preventing complexity from collapsing into chaos and simplicity from degrading into primitivism. This is precisely the point where «Mind» is born.

Automating the cascade of distinction tasks allows for «Just-In-Time Objectives», a capability crucial for time-sensitive environments. This aligns with the pragmatic principle: «A sub-optimal decision today outweighs a perfect one a month too late». In the face of «radical uncertainty», severe resource limitations, and an «aggressive environment», the system eschews exhaustive computation. «Just-In-Time Objectives» serve as a lifeline, enabling the system to produce the precise amount of meaning and agency required for immediate survival. Under critical pressure, the system activates a «high-speed discernment» protocol, producing the minimal viable «meaning» required to prevent systemic collapse (operationalizing fault- and catastrophe-tolerance in CTS) [9]. Example: A high-speed object recognition system that operates on minimal data by leveraging a human-inspired cognitive computing framework. This essentially describes an «intelligent filter» that filters out noise to extract the core essence (gist), mimicking the human capacity for instantaneous pattern recognition amidst chaos.

System 0: The Architecture of Perception, Intuition, and Cognitive Metrics / Measurements. The multiscale mathematical LGP model of a signal/variable describes the essence of «cognitive measurements». An input signal may be «precise» or «fuzzy», yet at every scale of generalization (within the network of signal sketches), the final conclusion is determined by a consensus of heterogeneous solvers. Examples of consensus/aggregation include [8]: Consensus-based Measurements, Intersubjective Measurements, Collective Cognitive Measurements (metrics surfacing as an emergent property of a collective entity — be it a swarm, a team, or a network), and Aggregated Soft Measurements. The system does not trust a single «precise» sensor (an embodied «total audit» scheme ensuring the ontological coherence of the entire system). Instead, it aggregates data from heterogeneous sources (e.g., radar + lidar + video camera). If one sensor starts outputting «sensory noise» (due to failure or icing), the consensus algorithm identifies it as deviant and excludes it from the control loop. The system continues to

operate based on the agreed-upon opinion of the remaining «solvers». «Coarse» distinction tasks (meaning processing) can be resolved significantly faster and more efficiently than «more precise» ones. If any «coarse» conclusion matches the context of the situation, the resolution of more precise tasks in active mode may be terminated (this is the key to Just-In-Time adaptation).

Thus, a «measurement» (at any level of generalization) is considered valid if different «subjects» (intelligent agents) with diverse world models arrive at an identical conclusion regarding the same signal or variable. Furthermore, «decisions» at all levels (across all sketches) must be mutually consistent («tangled hierarchies»). Quickly executed «coarse» distinction tasks set the boundaries for subsequent «precise» computations (top-down predictive processing). This leads to a dramatic boost in efficiency, as the system bypasses exhaustive data processing in favor of targeted verification within the «coarse» constraints. This constitutes the engineering implementation of intuition. Rather than merely reacting to input, the system dynamically 'interrogates' the environment, focusing only on the data points required to validate its hypothesis.

The perception mechanism is a «**continuum of distinction tasks**» (CDT). Each distinction task — «The act of sense-making» — is resolved based on the «Creative Stirring Layer» (Figure 1).

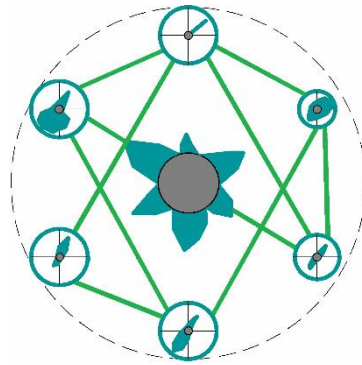


Figure 1 — The «Creative Stirring Layer» within the distinction task. An example of scalable recursive-spontaneous and competitive activity in resolving a distinction task within the framework of the «ultimate/limit knowledge models» basis. The «petals» reflect the level of energy allocated to the «models», and within the «models» — to the heuristics (Weak Control Hierarchies; Fractal-likeness)

The heuristic space in each distinction task emerges implicitly during the incubation process. Ultimate/Limit heuristics — the «thin slices» — decompose into a multitude of «knowledge models» competing for resources (System 0/1:Unconscious Inference).

In essence, at any scale level, «knowledge models» implement parallel, competitive, iterative, and simultaneously critically integrated action streams. Control processes within a holonic system (knowledge models) are executed based on a hierarchy-heterarchy, involving the exchange of information and commands between holons both vertically and horizontally. The heterarchical control organization within an individual holon possesses both flexibility and self-organized instability.

To describe the mechanism of the «creative stirring layer», a stochastic/quantum-like model for network coupling is introduced, which integrates varying scales of local and global information regarding the network topology. Local data from an individual model blend with the global context of the entire system to perform the Act of sense-making (within the distinction task). The mechanism of the «continuum of distinction tasks» fully aligns with Gregory Bateson's concept of information as «a difference which makes a difference». The resolution of any Z-distinction-recognition task entails the launch of implicit tasks — cognizers — $\{Z_V, Z_R\}_Z$, where $Z_V = \{V; \neg V\}$ and $Z_R = \{R; \neg R\}$ (V, R - heuristics): each solved task $\{Z_V, Z_R\}_Z$ creates a distinction that helps resolve the initial Z-task [4]. Any secondary Z_V task generates its own CDT. Any Z_V task generates an implicit causal interpretative variable or proto-qualia [6]. CDT is executed continuously within every action. Actions are integrated into system-quanta of action.

A more general source of proto-qualia is the sketch networks of distinction tasks. This effectively describes the «physics» of how distinction processes are transformed into the fabric of future experience. Detecting differences is the most fundamental act, demonstrating that information serves as the basis for sense-making in a smart agent, enabling any degree of complexity in its interpretive capabilities. The resolution of distinction tasks is a crucial aspect of cognition and «living experience». They serve as the mechanism that transforms raw data into a meaningful «thought flow» and forms the foundation for «agentic AI systems».

The thought flow emerging during the CDT resolution process generates «Thought Flow Networks» (TFN) [7]. All TFNs become part of the «Space of Thought Flows». As a crucial component of experience, they train individuals to recognize and correct ineffective thinking habits (Internal Reasoning Traces; Local Topological Signatures of Task Decoding; «Complexity cliffs»). The thought flow within the process of resolving coupled distinction tasks generates a vast number of values for causal interpretative variables $\{z/Z_V\}$ and $\{z/Z_R\}$, reflecting the essence of phenomenal experience alongside sketch networks (or qualia). Qualia correspond to the system's instantaneous resonance profile. The resolution of certain Z-tasks may require self-transcendence. Through the sequential resolution of distinction tasks (from System 0 to System 1), fragmented environmental signals are organized into a coherent structure that possesses meaning for the system.

LGP substantiates the use of a distinct class of quantum-like measurements. Within the framework of Systems 0/1, task-solving processes $\{Z_V\}$ can coexist in superposition, leading to spontaneous insight when they merge into a conscious solution (quantum-like superposition of thoughts; modeling «mental entanglement»: triadic entanglement patterns; entanglement generation by spatially separated networks in the «brain»; template entanglement; quantum-like representation of sketch networks' activity). In other words, the transition from subconscious processing (a manifold of possibilities) to conscious thinking (a definite choice) may involve quantum-like decoherence, where quantum-like states collapse into classical outcomes (collapse of the decision wave function; quantum-like decoherence in decision-making).

The Pareto Principle of Cognition/Perception. A «living (smart) system» is incapable of omnidirectional observation. It employs «coarse-grained» discernment to prioritize the allocation of its intelligent «probes». This defines cognitive agility: directing 90% of computational power toward the 10% of environmental data vital for immediate «survival». This represents a 90/10 ratio in biological terms: a mechanism that suppresses background noise to prioritize salient features. Biological systems survive not by perceiving the totality of the environment, but through the strategic «blindness» to the irrelevant — a principle central to the Interface Theory of Perception (through the lens of LGP). LGP proposes not to «compute better», but to «compute only what matters». «Controlled hallucinations» reconstruct the integral image (the entire network of image sketches).

In 1984, Susan Fiske and Shelley Taylor introduced the concept of the «cognitive miser». Humans generally tend to seek the simplest paths to solving tasks in order to conserve energy. The brain expends resources only when a «sketch» fails to provide an answer and a deep verification is required. This aligns with their later concept of the «motivated tactician»: individuals choose between fast (heuristic) and slow (analytical) thinking depending on the importance of the goal. According to Kahneman, System 1 is precisely that «automatic» mechanism that allows the «miser» to function by making fast decisions without effort. In LGP, this corresponds to System 0/1: System 0 indicates an even more fundamental, «zero» level of automatism; System 1 marks the «boundary/threshold» where the result reaches awareness, but the inference process does not.

When a situation moves beyond standard operating procedures (the off-nominal zone), rigid measurements may be formally correct yet meaningless. An intersubjective approach allows multiple intelligent agents to «agree» on the meaning of the event. This marks a transition from «instrumental truth» to «consensus reality». It is applied where no objective standard can be established (for example, assessing the danger level of a maneuver).

In the LGP model, «truth» is not a correspondence to the signal, but rather the coherence

(consistency) between diverse perspectives on that signal. This transforms the system from a mere toolkit into a «socially-entangled» mind, capable of navigating where classical algorithms fail (realized through the «Artificial Connectome» and Interactome).

Technical Applications: In aerospace [9], transportation, and the maritime industry [10], [11], cognitive approaches are critically important due to the high cost of failure and the inherent complexity of autonomous systems (Evaluating the consistency and limit-awareness of LGP / LLM agents under real-world uncertainty). Examples include Health and Usage Monitoring Systems (HUMS) for satellites. UAV Swarms: A group of drones measures turbulence parameters or obstacle density; while no single drone perceives the full picture, the swarm calculates a «safe corridor» through consensus protocols (e.g., consensus algorithms in networks). Maritime Autonomous Surface Ships: Research on «Sensor Fusion for Autonomous Vessels» frequently describes consensus mechanisms for resolving uncertainty in the maritime environment. Similarly, groups of underwater robots utilize collective measurements for seabed mapping or leak detection.

The transition from «measuring numbers» to «measuring meaning through consensus» allows the system to maintain global ontological coherence even when its physical layer is partially destroyed. The system remains integral because its «cognitive superstructure» is capable of generalizing destructive experience and transforming it into a new survival strategy. Even if some «solvers» (physical nodes) are destroyed, the remaining connections within the Interactome allow the overall picture to be reconstructed. The system / CTS survives because its 'mind' is less fragile than its «body» (the hardware). This makes the system bio-inspired: just as the brain maintains its functions despite the loss of some neurons, the CTS preserves its ontological coherence as long as at least a portion of the «network of sketch networks» remains alive. Within the LGP interpretation, «survivability» is the ability of the meta-network to preserve meaning even when its constituent sketch networks are fragmented. This is the practical implementation of technical antifragility.

Transitioning from metrological consensus to the extraction of meaning, gist, and awareness. Traditional approaches to fault tolerance, such as the Brooks-Iyengar algorithm [12], focus on achieving mathematical consensus regarding numerical interval values, filtering out noisy or faulty nodes. However, within the framework of the Limit Generalization Paradigm, this principle evolves from «measuring numbers» (Brooks–Iyengar seeks precision) to «measuring meaning through consensus» (LGP seeks meaning: shifting from «better calculation» to «calculating only what is essential»; Time-critical/Just-in-time solution). In contrast to classical sensor fusion, the LGP mathematical model operates with a hierarchy of sketch domains D_j , where each signal is interpreted in multiple ways through the prism of context, ontological agreements {On}, society {Ag}, fast-and-frugal heuristics {S} (memory consolidation across timescales), surrogate models {Sg}, and accumulated subjective experience {SE} [8]. Every domain in the signal sketch network is a distinction task. LGP postulates: the higher the level of domain generalization ($D_j > D_k$), the greater the accumulated Experience, and the more (frugal) resources are available to solve the distinction task. In its search for «meaning», LGP relies on multi-formalism (extended complementarity), multi-scalability (fractal-likeness), and generalized entanglement (strong connectivity). The system transitions from simple signal processing to the cognitive modeling of reality, utilizing the full spectrum of intellectual tools. This allows the system not merely to filter errors, but to form sketches of a holistic «image» of the situation, highlighting the Gist — the critical sketches of the situation (for a specific distinction task) [5].

While the Brooks-Iyengar algorithm provides reliability through redundancy, LGP implements ontological coherence and disaster tolerance. Thanks to the «network of sketch networks» architecture (System 0/1/2/3), «The agent's intellectual web» (Universe of Thoughts), and the «artificial connectome» (Consensus Models), the system maintains its decision-making capability even during partial destruction of the physical layer. It achieves this by employing mechanisms of audit, self-completion, and the creative maximization of possibilities (the Creative Max operator). The Brooks–Iyengar algorithm is «locked» within the framework of the numbers provided to it, whereas LGP actively searches for new patterns, mechanisms, and meanings even under conditions of severe resource scarcity. Thus, LGP shifts the survivability task for

autonomous systems from the domain of precision measurements to the realm of high-level cognitive control and adaptive heuristics.

The Brooks-Iyengar algorithm is an ideal «noise filter» for the physical layer. LGP, however, is a «meaning generator» that uses such measurements merely as a foundation for constructing signal sketch networks (base sketches D_1).

Conclusion. It can be concluded that the current results of the «Wholeness, Meaning, and Living (Smart) Structure» research program allow for the mapping of a human-centric path toward creating advanced agentic AI systems across various domains, including transport systems. Furthermore, the program could provide an impetus for new directions in the development of cognitive science as a whole, as well as complexity theory and the theory of complex systems control. LGP can provide a new theoretical framework capable of redefining our understanding of how the mind functions in general - whether human or artificial.

REFERENCES

1. Imagining and building wise machines: the centrality of AI metacognition / Johnson S. and others. Trends in Cognitive Sciences. 10.1016/j.tics.2026.01.002.
2. Evans, J., Bratton, B., Arcas, B. (2026). Agentic AI and the next intelligence explosion. Science. 391(6791). 10.1126/science.aeg1895.
3. Kim, J., Lai, S., Scherrer, N., Arcas, B., Evans, J. (2026). Reasoning Models Generate Societies of Thought. 10.48550/arXiv.2601.10825.
4. Prokopchuk Y. (2022). Intuition: The Experience of Formal Research. Dnepr, Ukraine : PSACEA Press. 724 p. (in RU)
5. Prokopchuk Y. (2026). Meaning as Wholeness Experienced. Proceedings of the XXVIII International Scientific and Practical Seminar Combinatorial Configurations and Their Applications. Zaporizhzhia: National University «Zaporizhzhia Polytechnic».
6. Prokopchuk Y. (2026). The Intertwined Nature of Simplicity and Complexity: A New Paradigm for Understanding Complex Adaptive / Autonomous / Living Self-Improving Smart Systems. Proceedings of the Scientific and Practical Conference «Information Technologies in Metallurgy and Machine building – ITMM 2026». Dnipro, Ukraine: Ukrainian State University of Science and Technologies.
7. Prokopchuk Y. (2025). Combinatorial, expanding phase space of cognitive dynamic systems. XXVII International Scientific and Practical Seminar «Combinator Configurations and Their Applications». Zaporizhzhia–Kropyvnytskyi–Kiev, Ukraine: National University ‘Zaporizhzhia Polytechnic’. Pp. 175 – 183.
8. Prokopchuk Y. (2025). Mathematical model of the meaning/gist of the signal/variable. Abstracts of the XIX International Conference ‘Modern Information and Communication Technologies on a Transport, in Industry and Education’. Dnipro, Ukraine: Ukrainian State University of Science and Technology. p.63 [in Ukrainian]
9. Prokopchuk Y. (2025). Open-Ended Evolution of Self-Improving Systems/Agents: LGP-Machine. Materials of the XX scientific readings ‘Dneprovskaya Orbita - 2025’ (22-24 October, 2025). Dnipro, UA: NCAOM named after O.M. Makarov. Pp. 117 – 124. [in Ukrainian]
10. Prokopchuk Y., Nosov P., Zinchenko S., Ben A. (2023). Bio-holonic approach to the creation of naturally reliable and safe transportation systems. Materials of the 15th Scientific and Practical Conference «Modern Information and Innovative Technologies in Transport (MINTT-2023)» (May 24-25, 2023, Kherson). Kherson, Ukraine: XSMA. pp. 37 – 41.
11. Nosov P., Zinchenko S., Ben A., Prokopchuk Y., Mamenko P., Popovych I., Moiseienko V., Kruglyj D. (2021). Navigation safety control system development through navigator action prediction by data mining means. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 2 No. 9 (110): Information and controlling system. 55-68. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.229237.
12. Sniatala, P., Amini, M. H., Boroojeni, K. (2020). Fundamentals of Brooks–Iyengar Distributed Sensing Algorithm: Trends, Advances, and Future Prospects. Springer Cham.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОПЕРАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ АВІАЦІЙНИХ ОПЕРАТОРІВ

Сікірда Ю.В., Сироїжка І.О., Зеленський А.С.

*Українська державна льотна академія
(Україна)*

Сучасна світова цивільна авіація функціонує як складна система високої надійності, де безпека забезпечується суворою регламентацією взаємодії між людиною, машиною та середовищем. Діяльність авіаційного персоналу чітко поділяється на два протилежні режими: штатні умови, що спираються на жорсткі стандартні процедури для забезпечення регулярності рейсів та економічності, і позаштатні (аварійні) ситуації, де пріоритетом стає порятунок життів за допомогою гнучких алгоритмів та швидкого прийняття рішень [1]. Оскільки в стресових обставинах головним джерелом ризику виступає людський фактор — зокрема непередбачуваність часу реакції оператора — традиційні детерміновані методи планування стають неефективними.

Аналіз глобальної макростатистики авіаційних подій, інцидентів та катастроф, демонструє глибокий системний конфлікт в еволюції авіаційного транспорту. З одного боку, сучасна багатократно резервована авіаційна техніка досягла безпрецедентного рівня механічної та електронної надійності. З іншого боку, людська ланка контуру управління залишається критично вразливою в динамічних, нестандартних і стресових умовах, що підтверджується кількома стійкими статистичними та когнітивними феноменами [2].

По-перше, у сучасній статистиці безпеки польотів спостерігається яскраво виражена, нелінійна диспропорція ризиків, що вказує на відсутність прямої кореляції між тривалістю фази польоту та ймовірністю виникнення катастрофи. Найбільш наочним прикладом є етапи фінального заходу на посадку та безпосередньо посадки. Ці етапи, які в середньому займають лише близько 4% від загального експлуатаційного часу рейсу, генерують приголомшливі 48% усіх фатальних авіаційних інцидентів у світі [3]. Цей емпіричний факт беззаперечно свідчить про те, що моментом найвищої вразливості соціотехнічної системи є фаза транзиту, тобто перехід оператора від пасивного моніторингу високоавтоматизованих систем до активного ручного або напівавтоматичного керування. Цей перехід відбувається в умовах колосального когнітивного навантаження, стрімкої зміни просторового положення та жорсткого дефіциту часу для виправлення помилок.

По-друге, у позаштатних та аварійних ситуаціях оператори всіх рівнів неминуче стикаються з комплексом когнітивних та психофізіологічних бар'єрів, найнебезпечнішим з яких у сучасній авіаційній психології визнано феномен «ефекту несподіванки». Цей нейрофізіологічний рефлекс провокує раптову, мимовільну і тимчасову когнітивну деградацію або так званий «когнітивний ступор», що паралізує здатність до раціонального мислення.

По-третє, існуючі нормативні підходи до розробки та валідації операційних процедур часто спираються на фундаментально спрощені детерміновані математичні моделі. У таких ідеалізованих моделях (де «робота як вона уявляється» домінує над «роботою як вона виконується») час виконання конкретної технологічної або аварійної операції розглядається як незмінна константа [4]. Однак реальний експлуатаційний досвід та тренажерні експерименти переконливо доводять, що у позаштатних умовах час реакції та виконання дій є суто випадковою величиною, яка підпорядковується складним законам теорії ймовірностей. Ця варіабельність не є лінійною і залежить від синергії безлічі мінливих факторів: індивідуального рівня стресу, ергономічної продуманості інтерфейсу кабіни, рівня втоми, а також від злагодженості командної роботи — ефективності управління ресурсами екіпажу або ресурсами команди диспетчерів.

Штучне ігнорування дисперсії часу виконання окремих операцій призводить до небезпечної ілюзії контролю з боку менеджменту авіакомпаній та хибної, надмірно

оптимістичної оцінки загального часу, необхідного для ліквідації небезпечної відмови. Формується математичний парадокс: якщо сумарний час виконання рятувних процедур, що лежать на критичному шляху графа подій, перевищує об'єктивний фізичний ліміт часу, катастрофа стає математично неминучою, навіть якщо екіпаж робить усе ідеально за інструкцією.

Саме тому експертами ICAO та учасниками профільних наукових форумів наголошується на критичній необхідності інтеграції систем контролю, діагностики і прийняття рішень при управлінні рухомими об'єктами з урахуванням стохастичного людського фактора. Відсутність надійного кількісного інструментарію для оцінки ймовірності своєчасного виконання процедур блокує подальший розвиток безпеки польотів та створює нездоланий розрив між теоретичними розрахунками безпеки та суворою реальністю їх практичного застосування у критичних ситуаціях.

З огляду на фундаментальні протиріччя між детермінованими методами планування та стохастичною природою людських дій, формулюється ключова мета та актуальна науково-практична задача: розробка та наукове обґрунтування комплексної методики стохастичного мережевого моделювання операційної діяльності авіаційних операторів [5].

Ця методика долає епістемологічні та математичні обмеження класичних лінійних підходів і має відповідати наступним суворим науковим критеріям:

1. Адекватне врахування ймовірнісної природи часу.
2. Структурне мережеве моделювання.
3. Кількісна оцінка ймовірності успіху та часових ризиків.

Оскільки цивільна авіація належить до домену HRO, де ціна однієї помилки може становити сотні життів, проектування мікро-операцій підпорядковується не лише нормативним вимогам, але й глибокому науковому аналізу людського фактора.

Фундаментом цього аналізу є базова ергономічна модель SHELL. Ця концептуальна структура чітко позиціонує людину-оператора у самому центрі складної соціотехнічної матриці. Вона постулює, що безпека польотів залежить не від ізольованого професіоналізму окремої особистості, а від якості, продуманості та ергономічності її «інтерфейсів» або взаємодій з іншими елементами: процедурами та документами, технічним обладнанням та дисплеями кабіни/радару, навколишнім та організаційним середовищем, а також взаємодією з іншими членами команди.

Кожна професійна група в авіації має свій унікальний профіль операційних ризиків та наукових доктрин для управління ними. У Таблиці 1 зведено порівняльну характеристику фундаментальних концептуальних особливостей діяльності трьох ключових категорій авіаційного персоналу [6].

Таблиця 1 — Порівняльна характеристика профілів діяльності ключових авіаційних операторів

Категорія персоналу та сутнісна роль	Характерні особливості оперативної діяльності (Ризики та виклики)	Ключові наукові та управлінські концепції безпеки (Специфічні)
Льотний екіпаж (Пілот)	- Обов'язкове, безальтернативне дотримання SOP як фундаменту виконання рейсу (SOP Compliance). - Необхідність безперервного формування та підтримання цілісного та адекватного образу поточної ситуації у багатовимірному просторі (Mental Picture / Situation Awareness).	- ADM (Aeronautical Decision-Making): Наука прийняття рішень в умовах гострого дефіциту часу та невизначеності. - CRM (Crew Resource Management): Структуроване управління ресурсами екіпажу (координація, синергія, лідерство командира при обов'язковій асертивності другого пілота).

	- Необхідність суворого контролю та розподілу розумового (когнітивного) навантаження (Cognitive Load) для запобігання втраті орієнтації або помилкам сприйняття індикації.	- Управління рівнем автоматизації (Automation Management), перехід від прямої моторики до системного моніторингу. - eMCO (Extended Minimum Crew Operations).
Авіадиспетчер (УПР)	- Побудова складної уявної 3D-моделі (радарного образу) руху десятків об'єктів із постійним прогнозом їх взаємного положення на 5-10 хвилин вперед. - Екстремально високий рівень мультизадачності (синхронна обробка радіообміну, радарних даних, стрипів та прийняття рішень). - Необхідність безшовної передачі відповідальності під час зміни диспетчерських змін без втрати інформації.	- TRM (Team Resource Management): Управління командними ресурсами (аналог CRM, адаптований для специфіки наземних центрів УПР). - HITL (Human-in-the-Loop): Аналіз якості взаємодії диспетчера-людини з надскладними інтелектуальними автоматизованими системами попередження конфліктів.
Інженерно-технічний персонал	- Суворий документальний процедуралізм: робота виключно за актуальною документацією (AMM/Task Card), категорична заборона виконання будь-яких дій по пам'яті (Memory Items). - Суворі ергономічні обмеження (робота в замкнутих паливних баках, на висоті, недостатнє освітлення), що значно підвищує ризик пропуску дефекту. - Відсутність миттєвого зворотного зв'язку (Delay Feedback) — неможливість одразу перевірити результати ремонту у реальних умовах польоту (формування "бомби уповільненої дії"). - Психологічний тиск щодо відкладення ремонту (Deferral Pressure) заради економії.	- PEAR Model: Спеціалізована ергономічна модель людського фактора в техобслуговуванні (People, Environment, Actions, Resources). - MRM (Maintenance Resource Management): Специфічна адаптація принципів синергії CRM для технічних бригад на пероні та в ангарах.

Окрім професійно-орієнтованих концепцій, для всіх операторів сьогодні діють спільні універсальні парадигми: загальний перехід до концепції Safety-II, впровадження систем управління ризиками втомі на базі біоритмології та глобальний перехід на навчання та оцінювання персоналу на основі реальних компетенцій, а не просто кількості налітаних годин.

Для мінімізації негативного впливу людського фактора поведінка операторів жорстко алгоритмізується. У нормальних умовах діяльність базується на лінійному читанні та

виконанні контрольних карт методами «Do-Verify» (виконав-перевірів) для одночленного екіпажу або «Challenge-Response» (виклик-відповідь) для багаточленного екіпажу. Проте у позаштатних ситуаціях алгоритми трансформуються в жорсткий інструмент порятунку. Екіпаж перемикається на «Золоті правила», виконує Memory Items, після чого застосовує евристичну модель DECIDE перед читанням аварійного чек-листа QRH. Диспетчер застосовує алгоритм ASSIST, щоб створити безпечний стерильний простір навколо аварійного борту і надати екіпажу найцінніший ресурс — Час.

На основі проведеного аналізу можна констатувати, що сучасна парадигма безпеки польотів стикається з фундаментальним розривом між високою надійністю техніки та стохастичною природою людського фактора. Традиційні детерміновані методи планування не враховують варіативність часу реакції оператора в стресових умовах, що робить катастрофу математично неминучою при перевищенні часових лімітів ($T_{reak} > T_{crit}$). Ця алгоритмізація є фундаментальною, проте вона спирається на фіксовані часові рамки, що в умовах реального стресу та виникнення відхилень призводить до розбіжності між планом і реальністю, що й зумовлює необхідність імплементації стохастичних математичних моделей.

ЛІТЕРАТУРА

1. Safety Management: Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation. 2nd ed. Montreal: ICAO, 2016. 23 p.
2. Crew resource management / ed. by B. G. Kanki, J. Anca, T. R. Chidester. 3rd ed. San Diego: Academic Press, 2019. 614 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00626-4>.
3. State of Global Aviation Safety: ICAO Safety Report 2025 Edition / International Civil Aviation Organization. Montréal : ICAO, 2025. 84 p.
4. Rethinking PERT-Beta distribution: A systematic evaluation of PERT RNG models in project risk simulation / J. Smith et al. Proceedings of the 8th North American International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Houston, USA, June 13-15, 2023. IEOM Society International, 2023. P. 387. <https://doi.org/10.46254/NA8.20230126>
5. Шмельова Т. Ф., Сікірда Ю. В., Сироїжка І. О. Детерміноване моделювання сумісного прийняття рішень в процесі передпольотної підготовки повітряних суден. Випробування та сертифікація. 2025. № 3 (9). С. 95–107. <https://doi.org/10.37701/ts.09.2025.12>.
6. Стохастичне моделювання операційної діяльності авіаційних операторів / Сікірда Ю. В. та ін. Випробування та сертифікація. 2026. Вип. 1 (11). С. 117–134. DOI: 10.37701/ts.11.2026.13.

ЗГОРТКОВА НЕЙРОННА МЕРЕЖА З ШІ АСИСТЕНТОМ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ BNWAS

Харченко Р. Ю., Соловійов О. О.

*Національний університет «Одеська морська академія»
(Україна)*

Вступ. Система BNWAS (Bridge Navigational Watch Alarm System) є обов'язковим суднобудівним обладнанням відповідно до вимог SOLAS та резолюції IMO MSC.128(75), призначеним для контролю пильності вахтового офіцера на містку. Принцип функціонування існуючих реалізацій BNWAS базується на таймерних механізмах: у разі відсутності підтвердження присутності вахтового протягом заданого інтервалу система ініціює послідовність аварійних сигналів. Незважаючи на відповідність нормативним вимогам, такий підхід характеризується суттєвими обмеженнями, зокрема високим відсотком хибних тривог та відсутністю адаптації до поточної навігаційної обстановки.

Розвиток методів глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж (Convolutional Neural Network — CNN), відкриває принципово нові можливості для інтелектуалізації систем моніторингу вахти. Запропонована система функціонує повністю автономно: вона аналізує виключно поведінкові патерни вахтового офіцера засобами комп'ютерного зору, без підключення до судових навігаційних систем, що дозволяє перейти від реактивного до проактивного підходу у забезпеченні безпеки судноплавства. Дана робота присвячена обґрунтуванню концепції такої системи та аналізу доцільності її розробки.

Актуальність досліджень. Відповідно до статистики ІМО, понад 75% морських аварій пов'язані з людським фактором, серед яких зниження пильності вахтового офіцера є однією з провідних причин. Аналіз звітів European Maritime Safety Agency (EMSA) свідчить, що значна частина інцидентів, пов'язаних із посадками на мілину та зіткненнями суден, відбувається у нічний час або при підвищеному навігаційному навантаженні — саме тоді, коли рівень пильності найбільш схильний до зниження [1].

Аналіз технічних характеристик наявних комерційних рішень BNWAS (Furuno FA-150, JRC JLR-7900, Raytheon Anschütz та ін.) виявив спільний структурний недолік: всі вони функціонують за однаковою таймерною логікою незалежно від складності навігаційної ситуації. Система однаково реагує як при проходженні вузькостей із щільним трафіком, так і у відкритому морі, що є причиною феномену «alarm fatigue» — звикання екіпажу до частих хибних тривог і зниження реакції на них [2]. Подолання цього недоліку вимагає переходу до інтелектуальних методів аналізу стану вахтового.

Таблиця 1 — Порівняльний аналіз існуючих підходів до моніторингу пильності вахтового

Підхід	Принцип дії	Переваги	Недоліки
Таймерна BNWAS	Контроль підтвердження присутності	Простота, відповідність ІМО	Хибні тривоги, без контексту
Відеоспостереження (правила)	Обробка зображення обличчя	Пасивний моніторинг	Чутливість до освітлення
Фізіологічні сенсори	ЧСС, ЕЕГ, рух голови	Висока точність	Дискомфорт для оператора
CNN-аналіз поведінки (запропоновано)	Відеоаналіз поведінкових патернів, автономно	Неінвазивність, автономність, комплексний аналіз поведінки	Потребує навчання та верифікації

Постановка задачі. Метою дослідження є розробка концепції та обґрунтування архітектури гібридної системи на основі CNN та III асистента для підвищення ефективності роботи BNWAS. У рамках даної роботи вирішуються такі завдання:

- 1) систематизація недоліків існуючих систем BNWAS на основі аналізу літературних джерел та нормативних документів ІМО;
- 2) обґрунтування доцільності застосування CNN для поведінкової класифікації стану пильності вахтового офіцера на основі відеоаналізу;
- 3) розробка концептуальної архітектури модуля III асистента для автономного прийняття рішень на основі динаміки поведінкових оцінок CNN;
- 4) визначення вимог до набору даних та методології навчання запропонованої системи;
- 5) окреслення перспективного плану верифікації та впровадження розробленого рішення.

Результати досліджень. На основі аналізу існуючих підходів запропоновано концептуальну архітектуру системи, що складається з трьох взаємодіючих модулів: блоку відеофіксації та первинної обробки зображень, CNN-класифікатора стану пильності та автономного модуля III асистента.

Блок відеофіксації передбачає використання інфрачервоних відеокамер із широким кутом огляду для аналізу поведінкових патернів вахтового офіцера в умовах різного освітлення, включаючи нічні вахти. Відеопотік аналізується в режимі реального часу для виявлення таких ознак: положення тіла та голови; стан очей (відкриті, напівзакриті, закриті); наявність та характер мікрорухів; взаємодія з навігаційним обладнанням; використання мобільного телефону; ознаки притомності та адекватної реакції на оточення. Вибір відеоаналізу як єдиного сенсорного каналу забезпечує повну автономність системи та неінвазивність спостереження [3].

CNN-класифікатор проектується для обробки тривимірних тензорів, що формуються з часових вікон тривалістю 30 секунд із кроком 5 секунд. Обґрунтована архітектура включає чотири послідовні згорткові блоки (Conv2D + BatchNorm + MaxPooling) з кількістю фільтрів $32 \rightarrow 64 \rightarrow 128 \rightarrow 256$, повнозв'язний блок із регуляризациєю Dropout та вихідний шар Softmax із трьома класами: «пильний», «знижена пильність», «небезпечний стан». Вибір глибини мережі базується на аналізі аналогічних архітектур для задач класифікації часових рядів фізіологічних сигналів [4].

Модуль III асистента концептуально реалізується на основі трансформерної архітектури та виконує функції автономного прийняття рішень щодо подачі сигналу тривоги. На вхід асистент отримує виключно поточну оцінку стану від CNN та її часову динаміку: тривалість і стабільність небезпечного стану, тенденцію до погіршення, а також урахування фізіологічно обумовлених короточасних мимовільних станів (моргання, кашель тощо). Інтеграція компонентів планується за схемою байєсівського злиття рішень, що дозволяє знижувати частоту хибнопозитивних спрацювань без залучення будь-яких зовнішніх даних.

Таблиця 2 — Вимоги до набору даних для навчання запропонованої CNN

Параметр	Значення / вимога	Обґрунтування
Мінімальний обсяг вибірки	$\geq 10\,000$ зразків	Достатність для навчання CNN [4]
Баланс класів	Рівномірний (по $\sim 33\%$)	Уникнення зміщення класифікатора
Умови збору	Тренажер, сценарії ІМО 1.22	Відтворюваність та безпека
Розбиття вибірки	70% / 15% / 15%	Стандартна практика ML
Верифікація розмітки	Два незалежних експерти	Зниження суб'єктивності

Відповідно до сформульованих вимог, збір навчального набору даних планується здійснити на навчальних суднових тренажерах або в умовах реальної морської практики в рамках подальших дисертаційних досліджень. Сценарії охоплюватимуть різні умови навігаційного навантаження, часи доби та метеорологічні обстановки відповідно до рекомендацій IMO Model Course 1.22.

Аналіз публікацій, присвячених застосуванню CNN у задачах виявлення втоми оператора транспортних засобів, свідчить про досяжність точності класифікації у діапазоні 90–96% при достатньому обсязі навчальної вибірки та коректній архітектурі мережі [3, 4]. Це підтверджує принципову застосовність запропонованого підходу до задачі моніторингу пильності вахтового офіцера.

Висновки. У роботі проведено аналіз існуючих систем BNWAS та обґрунтовано концепцію гібридної системи моніторингу пильності вахтового офіцера на основі CNN та III асистента. Основні результати роботи:

- систематизовано недоліки існуючих реалізацій BNWAS, серед яких ключовими є нездатність аналізувати якість несення ваhti та високий рівень хибних тривог, що призводить до феномену «alarm fatigue»;
- запропоновано концептуальну архітектуру автономної системи, що поєднує CNN-класифікацію поведінкових патернів вахтового офіцера з модулем III асистента на базі трансформерної моделі для прийняття рішень виключно на основі відеоаналізу, без підключення до суднових систем;
- обґрунтовано вимоги до набору даних та методологію його збору на навчальних тренажерах або в умовах морської практики;
- визначено план подальших досліджень, що включає формування навчального набору даних, розробку та навчання CNN, верифікацію системи в тренажерних умовах та оцінювання ефективності порівняно зі стандартними BNWAS.

Подальші дослідження є складовою дисертаційної роботи автора і спрямовані на практичну реалізацію та експериментальну верифікацію запропонованої системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. European Maritime Safety Agency. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2023. Lisbon: EMSA, 2023. 98 p.
2. Lützhöft M., Nyce J. M., Petersen E. S. Epistemology in ethnography: assessing the quality of knowledge in human factors research. Theoretical Issues in Ergonomics Science. 2010. Vol. 11, № 6. P. 532–545.
3. Zhao L., Li Z. A real-time fatigue detection system for maritime watchkeeping officers using CNN and physiological signals. Ocean Engineering. 2022. Vol. 264. P. 112506.
4. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. Nature. 2015. Vol. 521. P. 436–444.
5. IMO Resolution MSC.128(75). Performance Standards for a Bridge Navigational Watch Alarm System (BNWAS). International Maritime Organization, 2002. 8 p.
6. Attention Is All You Need / Vaswani A. et al. Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. Vol. 30. P. 5998–6008.
7. Носов П. С., Аппазов Е. С. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень у судноводінні. Одеса: ХДМА, 2022. 214 с.

ОСОБЛИВОСТІ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК СУДЕН

Худяков І.В., Грицук І.В., Погорлецький Д.С., Черненко В.В.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Однією з важливих передумов забезпечення технічної безпеки плавання є моніторинг параметрів суднових дизелів (головних і допоміжних) в процесі їх експлуатації. Інформація про поточні значення параметрів робочого процесу суднових дизелів під час експлуатації дозволяє обслуговуючому персоналу підтримувати нормальний технічний стан дизелів і попереджати виникнення аварійних ситуацій. На експлуатованих в даний час річкових судах моніторинг параметрів двигунів найчастіше зводиться до періодичного контролю тисків і температур - за допомогою максиметра персонал визначає максимальні значення тисків газів по циліндрах (рmax) або тиску в кінці процесу стиснення (рс) при відключеному подачі палива. Крім рmax, рс, температур води і масла, можна виділити цілий ряд інших параметрів, моніторинг яких під час експлуатації дає можливість здійснювати більш якісний контроль робочого процесу дизеля і виробляти точне регулювання окремих вузлів [1].

Постановка проблеми. Під адаптивною системою ТО і Р автомобілів розуміється система, яка завдяки зміні своєї структури і значень параметрів, може пристосовуватися до зміни внутрішніх і зовнішніх умов. Рівень, якого досягла сучасна технічна діагностика (ТД), дозволяє при технічній експлуатації автомобілів реалізувати практично будь-які завдання щодо виявлення та прогнозування параметрів технічного стану автомобілів [1-3].

ТО і Р умовно називають індивідуальним технічним обслуговуванням (ІТО). Вид робіт в цьому випадку призначають на основі індивідуальних діагностичних даних.

У зв'язку із застосуванням на автомобілях складних високоефективних електронних систем управління, вбудованої бортової діагностики, розвитку супутникових систем навігації і мобільного зв'язку, сучасних технологій з'явилася можливість не тільки контролювати географічне положення ТЗ і здійснювати зв'язок з диспетчером підприємств АТ, але і здійснювати дистанційний моніторинг з оцінкою рівня технічного стану автомобіля, що цілком дозволяє реалізувати практично будь-які завдання по виявленню та прогнозуванню технічного стану автомобіля.

Наявна система ТО і ремонту сформувалася на базі спрощеної моделі функціонування транспортної інфраструктури:

Це в свою чергу дозволить перейти до індивідуальної (адаптивної) системі ТО і Р автомобілів [4, 5].

В адаптивній системі прогнозування може проводитися на підставі результатів обробки діагностичної інформації відповідно до схеми прогнозування та управлінням технічним станом автомобіля із застосуванням АСУ[6, 7].

Шляхи вирішення проблеми. До теперішнього часу більшість систем моніторингу суднових двигунів внутрішнього згоряння (СДВЗ) було спроектовано як єдиний програмно-апаратний комплекс, що виробляє запис параметрів і частковий розрахунок робочого процесу в режимі реального часу. Найбільш характерними системами такого типу є NK-5, NK-100, NK-200 фірми Autronica A / S, а також ряд аналогічних систем, розроблених компаніями Terasaki Electric Co., Ltd, Konsberg, JRCS, Hyundai, Samsung, Honeywell, Sulzer [2]. Системи такого типу покликані вирішувати два завдання: отримання даних в реальному часі і частковий розрахунок робочого процесу, що дозволяє виробникам випускати завершення комплекси моніторингу СДВЗ і надавати технічного персоналу судна великий обсяг інформації, необхідної для якісної технічної експлуатації двигунів. Однак такий підхід до вирішення завдання моніторингу СДВЗ має ряд недоліків:

- недостатньо повне (неточне) моделювання робочого процесу;

- в якості вихідних даних використовується обмежена кількість вимірюваних параметрів;
- не виявляються прогнозуючі тренди технічного стану двигуна;
- з'єднання вимірювальної та розрахункової частин систем моніторингу ДВС значно збільшує їх складність; для передачі сигналів від двигуна до обчислювального комплексу використовуються довгі кабельні лінії; встановлюються додаткові підсилювачі і перетворювачі сигналів, що знижує надійність функціонування системи в цілому;
- вартість систем подібного типу залишається вельми високою, оскільки складається з вартості не тільки датчиків і первинних перетворювачів, а й усього проміжного обладнання, включаючи вартість обчислювального комплексу і програмного забезпечення. Крім того, комп'ютери в таких системах задіяні тільки для вирішення завдання моніторингу СДВЗ [1].

Розглянемо системи діагностики середньо- і високооборотних двигунів (СОД і ВОД), що застосовуються в даний час.

Система CEDC фірми «Зульцер» (Швейцарія) призначена для діагностування циліндропоршневої групи (ЦПГ), ПА, турбокомпресора, охолоджувача наддувочного повітря (ОНП). Ця система встановлена на дизелях типу 6RND-90 теплохода «Віллі де Страсбург» (Франція). Діагностична система на базі міні-ЕВМ аналізує поточні параметри дизеля і його технічний стан. При зміні діагностичних параметрів проводиться аналіз тенденцій їх зміни в часі і встановлюється необхідний термін перебирання вузла.

Попереджувальний сигнал в системі виробляється не за абсолютною, а по відносній величині параметра, яка зберігається в пам'яті ЕВМ, а також на магнітній стрічці [3].

Система СИПВА фірми «Зульцер» забезпечує безперервне вимірювання і реєстрацію зносу верхнього поршневого кільця дизеля, а також зазначає обертання кілець або його відсутність. Датчики — індуктивні. Верхні поршневі кільця головного двигуна спеціальної конструкції. Датчики встановлюються в наскрізних свердліннях втулки врівень з її робочою поверхнею. Обчислювальний пристрій за визначеними програмами оцінює загальний технічний стан дизеля і залишковий ресурс деталей ЦПГ, рекомендує час чергового профілактичного обслуговування. Діагностична система може бути з'єднана зі штатними системами управління і регулювання — регулятор «Вудвард», системою регулювання циркуляційної і циліндричної мастила — і брати участь в загальному процесі автоматичного регулювання режиму роботи дизеля, аж до аварійної зупинки його в разі небезпечного виходу за норму будь-яких контрольованих параметрів, в тому числі в системах підготовки палива і масла, охолодження і т. п. [3].

Система DETS фірми «Норконтрол» (Норвегія) являє собою вимірювальний комплекс, що дає інформацію про систему впорскування палива та процесу згоряння в дизелі у вигляді роздрукованих значень параметрів і графіків. Система використовує два датчики (тиску уприскування палива і тиску в циліндрі) п'єзоелектричного типу. Два магнітні датчики дають інформацію про кут ПКВ і частоту обертання. Додатково встановлюється датчик тиску продувочного повітря. Реєструються такі характерні параметри: p_i , p_c , p_{max} , тиск розширення в точці 40° після ВМТ, момент максимального тиску, град, ПКВ; різниця між найбільшим і найменшим значеннями p_i протягом п'яти ходів поршня. Для візуального контролю будується діаграма тиску стиснення в зоні ВМТ і крива тиску впорскування [3].

Система PED фірми «Пілстік» (Франція) вперше була встановлена на дизелі 18PC2-5V теплохода «Ренор». За допомогою системи діагностуються середньооборотні дизелі фірми «СЕМТ-Пілстік» серій PC-2, PC-3, PC-4. Діагностичною системою контролюється стан корінних підшипників колінчастого вала і верхнього поршневого кільця, агрегатів турбокомпресора. Датчики системи вимірюють такі параметри: температуру і тиск за ОНВ, температуру охолоджуючої води на вході в ОНВ, тиск повітря за турбокомпресором, положення рейок паливних насосів високого тиску (ТНВТ), частоту обертання ротора турбокомпресора, вібрацію підшипників турбокомпресора з видачею попереджувальних

сигналів при підвищеній вібрації за допомогою датчика стану підшипників (безконтактного датчика переміщення). Датчик дає можливість виявити порушення центрування колінчастого вала. Стан верхнього кільця контролюється індуктивним датчиком «Ніппо» фірми «Віброметр» [3].

Система «Віброметр» фірми «Віброметр» (Швейцарія) діагностує такі вузли: ЦПГ, системи упорскування палива, турбокомпресора, поршневих кілець. Діагностична система випробовувалася на дво- і чотиритактних малооборотних дизелях, СОД і ВОД. Діагностична система контролює такі вузли дизеля: поршень (поява стукотів, задираки); клапани, деталі клапанних приводів (розподільний вал, коромисло і т. д.) ТНВД; підшипники (знос), а також такі параметри, як частота і напрямок обертання колінчастого вала, r_{max} і характеристики впорскування. У діагностичній системі використовуються п'єзоелектричні датчики, які збирають інформацію про акустичні сигнали, після обробки яких робиться висновок про нормальний або аномальними стані вузлів. П'єзоелектрична система оцінки звукових хвиль «Ніссен» включає п'єзоелектричний акселерометр, який виявляє неузгодженість ротора і знос підшипників турбокомпресора. Стан поршневих кілець контролюється за допомогою датчика «Ніппо». Інформація виводиться на дисплей [3].

Система МЕКОМ фірми «Статронік» (Норвегія) призначена для діагностування дизелів, турбін, котлів, з її допомогою реєструються наступні параметри: рівень вібрації механізмів, температури підшипників турбін, втулок циліндрів, температура випускних газів, тиск в різних точках газоповітряного тракту [3].

Сучасні діагностичні системи дизелів контролюють зміну тиску в циліндрах в залежності від часу, кута ПКВ або ходу поршня. Діаграма $p_{ц} = f(\Phi_{ПКВ})$ зображується на екрані осцилоскопа і вводиться в пам'ять ЕВМ для подальшого аналізу, в процесі якого встановлюються величини p_i , p_c , r_{max} , кут ПКВ, якому відповідав би максимальний тиск в циліндрі. Значення цих параметрів, а також інших, що мають відношення до робочого процесу (тиск і температура наддувочного повітря, частота обертання колінчастого вала), виводяться або можуть бути викликані на дисплей (табло) пристрої. Так працює прилад НК-2, що входить в діагностичну систему фірми «Аутроніка» (Норвегія), АСЕА (Швеція) і ін. [3]. Системи «Комос-D1, -D2, -D3, -D4» фірми МН1 (Японія), що використовують електронно-променеву трубку і систему діалогу, призначені для діагностування головного і допоміжних двигунів. Вимірювані значення порівнюються з еталонними, що зберігаються в пам'яті ЕВМ [3].

З представленого аналізу існуючих діагностичних систем ДВС можна зробити наступні висновки:

- на даний час кожен виробник СДВЗ в першу чергу стурбований моніторингом параметрів (діагностикою) тільки свого двигуна, універсальні системи моніторингу для двигунів будь-яких моделей не створюються;

- установка спеціалізованих діагностичних комплексів здійснювалася на СДВЗ досить високої потужності, застосовуваних на морських судах; на річкових суднах та суднах змішаного (річка-море) плавання такі системи дотепер не застосовувалися. Технічна діагностика двигунів на судах з класом Річкового реєстру зводиться до зняття індикаторних гребінок, теплотехнічного контролю і подальшої «ручний» обробці отриманих результатів судовими механіками, або теплотехнічними партіями. Однак досягнення технічного прогресу і встановлені Урядом України орієнтири вимагають перегляду підходів в області технічної діагностики судових технічних засобів на внутрішньому водному транспорті, тим більше що прогрес в галузі управління об'єктами СЕУ і діагностики їх технічного стану неминуче вимагатиме переходу організацій за класифікацією на новий рівень реалізації процедур класифікації і огляду суден [4–6].

Висновок. На підставі виконаного аналізу можна констатувати, що в даний час рішення задачі технічної діагностики судових двигунів, а отже, і інших, менш складних об'єктів СЕУ річкових суден, стає можливим, оскільки сучасні електронні системи

управління дозволяють здійснювати безперервний моніторинг технічних параметрів. У зв'язку з цим використання спеціалізованих діагностичних комплексів стає неактуальним, тому що інформація, яка отримана від електронних систем управління двигуном і іншими об'єктами СЕУ, може оброблятися центральним комп'ютером управління або комп'ютером машинного відділення з метою управління та діагностування всієї СЕУ [6], а не тільки її окремих об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Іванівський В. Г., Варбанец Р. А. Моніторинг робочого процесу суднових дизелів в експлуатації. // Всеукр. наук.-техн. журн. 2004. Вип. 2. С. 138–141.
2. Данилян А. Г., Чимшир В. І., Разінкін Р. А., Найдьонов А. І. Удосконалення систем технічного діагностування малооборотних суднових дизелів // Молодий вчений. 2015. № 2 (82). С. 138-142. URL: <https://moluch.ru/archive/82/14613/>.
3. Характеристика систем діагностики суднової дизельної установки в суднових дизелях. URL: <http://vdivizhke.ru/sudovye-dizelnye-ustanovki/puskoreversivnye-sistemy-dvigatelja/harakteristika-sistemdiagnostikisudovoj-dizelnoj-ustanovki-v-sudovyh-dizeljah.html>.
4. Худяков І.В. Особливості формування та аналізу інформаційних структур системи моніторингу параметрів технічного стану транспортних засобів у взаємодії з тахографом / Худяков І.В., Симоненко Р.В., Манжелей В.С., Черненко В.В. // Системи і засоби транспорту. Проблеми експлуатації і діагностики: монографія / Blatnický Miroslav, Dižo Ján, Gerlici Juraj та ін.; за наук. ред. проф. Грицука Ігоря. Херсон : ХДМА, 2019. с. 250–259.
5. Сисоева З. Нові тенденції та перспективні технології автомобільних датчиків систем Powertrain і контролю емісії. Ч. 1. Стан та перспективи ринку датчиків положення, швидкості, датчиків концентрації кисню (газу), масової витрати повітря і тиску // Компоненти та технології. 2006. № 60. С. 86–94.
6. Соловійов А. В. Концепція єдиного цілеорієнтованого управління судновою енергетичною установкою // Укр. держ. ун-ту мор. і реч. флоту ім. адм. С. О. Макарова. 2017. Т. 9. № 5. С. 1027–1039.

BINARY RELATIONSHIPS IN MARITIME TRANSPORT LOGISTICS

¹Sharko O., ²Stepanchykov D., ³Sharko M., ¹Movchan P.

¹Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)

²Kherson National Technical University
(Ukraine)

³Pryazovsky State Technical University
(Ukraine)

Introduction. The development of maritime transport logistics occurs in conditions of multi-criteria and uncertainty of the external environment. To increase the efficiency of management, it is necessary to apply formal decision-making models based on binary relations between optimization parameters.

Relevance of the study. Situational management of maritime transport (MTP) requires taking into account numerical characteristics: delivery duration, fuel consumption, load on the main engine, transition speed, vessel loading, deviation from the route and transportation cost. Binary relations allow formalizing the priority of these parameters and ensuring the transitivity of solutions [1,2].

Problem statement. The aim of the work is to build a conceptual model of intelligent situational management of maritime transport under conditions of uncertainty, which takes into account binary relations between optimization parameters.

Research results. Based on the generalization of multi-criteria optimization of MTP, a conceptual model of decision-making for intelligent situational management of maritime transport operations under conditions of uncertainty of input information is proposed (Fig. 1).

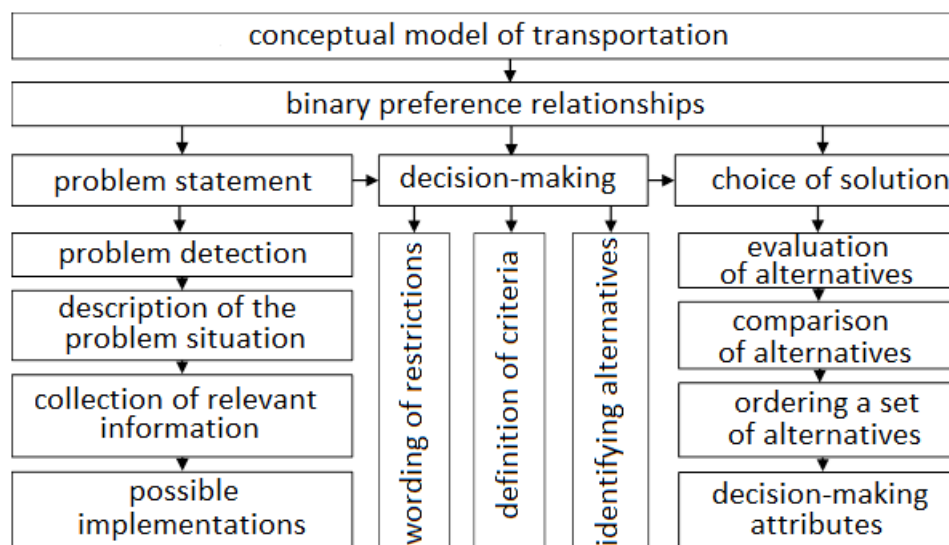


Figure 1 — Conceptual model of intelligent situational management of maritime transport

The conceptual model of decision-making regarding situational management of MTP under conditions of uncertainty and risk is a formal representation of the task, based on binary relations. Binary relations are subsets of Cartesian products of two sets, which determine the relationship between their elements. In other words, this is a set of ordered pairs or a mathematical operation that accepts two arguments and returns one result. In maritime transport, this is the choice of the optimal strategy from a set of possible ones. Therefore, when building a conceptual model of intelligent situational management of maritime transport under conditions of uncertainty of input information, which takes into account the generalization of the basic provisions of multi-criteria optimization of transport parameters and transition situations, this operation is included as a basic one. Binary relations in maritime transport determine the relationship of elements of sets,

which are optimization parameters, their accompanying manifestations and elements of interactions with the external environment in the form of possible situations. In the description of the multi-criteria optimization methodology for maritime transport, this is manifested when replacing vector optimization with scalar optimization by expanding the boundary of the matrix elements by the same value. In the general case, a binary relation is represented as Cartesian sets A and B and is symbolically written as

$$R \subseteq A \times B, A = (a_1, a_2, \dots, a_n), B = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (1)$$

where a_n and b_n — elements of the n -th order matrix.

In the technology of managing maritime transport in conditions of uncertainty of influence of external environment, the priority of optimization parameters from the consumer's point of view is determined by the sequence of their use. The main priority among the optimization parameters in maritime transport will be the duration of the transition, i.e. $R = \{(ab): a \text{ priority } b\}$. Relation $R = \{(ab): a \text{ priority } b\}$ transitive, that is $R = \{(ab): a \text{ priority } b\}$, where a means the optimization parameter — transition duration, b — fuel consumption, i.e. aRb and bRa cannot be executed simultaneously. Priority of ensuring the optimization parameter a — the duration of the transition, which always coincides with the priority of the optimization parameter b — fuel consumption. Therefore, the conclusion that a priority b and b priority d , where d is the load on the main engine is correct. These operations on binary ratios of optimization parameters of transport transitions can be presented in the form of Fig.2.

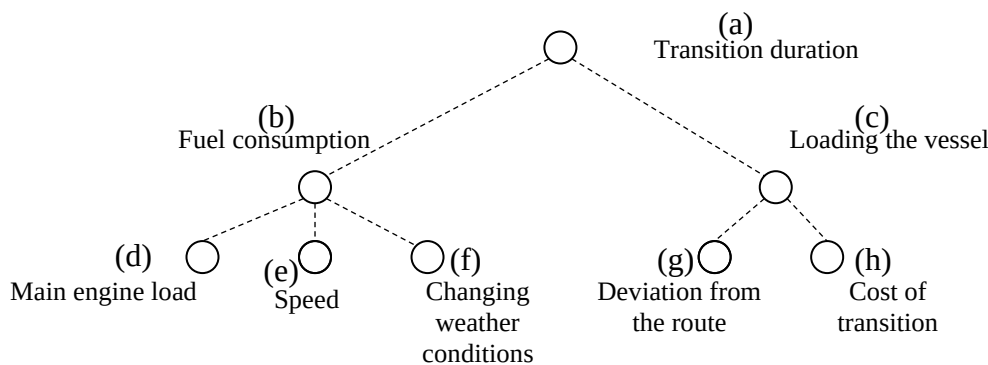


Figure 2 — Means of setting binary relations in maritime transport logistics

Relation $R = \{(a,b): a \text{ priority } b\}$ is transitive. For example, if the duration of the transition (a) has priority over fuel consumption (b), and fuel consumption has priority over engine load (d), then the conclusion is valid $a > b > d$. The priority sequence can be violated by changing the main optimization parameter, which corresponds to changing the type of binary relations by introducing reciprocal relations, when the range of values of one of them is the range of definition of the other.

The initial stage of building the structure of the conceptual model of maritime transport is the formulation of the problem, identification and description of the problem situation, collection of relevant information. The next stage of the conceptual model of maritime transport management is the formation of solutions, which includes the establishment of restrictions, decision-making criteria, and the selection of alternatives. The final stage of building the conceptual model of maritime transport management is the selection of a solution. This stage includes the evaluation, comparison, and ordering of a set of calculation results.

On the Turkey–Germany route for the vessel FUNDATAL (IMO 9962988), a matrix of parameters was formed, presented in Table 1 [3].

Table 1 — Matrix of optimization parameters of maritime transport

Parameter	Optimal value / example	Note
Loading the vessel	50–70% of deadweight (1900–2550 t for FUNDATAL, deadweight 3804 t)	Takes into account fuel and oil restrictions
Delivery time	19–21 days	Practical example – Turkey–Germany

		flight
Transition speed	10 knots	Normal vessel operation mode
Main engine load	75% of the maximum	Provides a speed of 10 knots
Fuel consumption	3.5 tons/day (73.5 tons per trip)	At 75% engine load
Deviation from the route	Up to 500 miles	Takes into account weather conditions and cargo specifics
Transportation cost	63 thousand USD	With a voyage duration of 21 days, fuel and lubricant costs

These data demonstrate that optimization is possible only when priorities are aligned between economic (cost, fuel consumption) and technical (speed, engine load) parameters. Fig. 3 presents a graphical scheme (parameter priority grid) in the form of a diagram to visually show the transitivity of binary relationships between parameters.

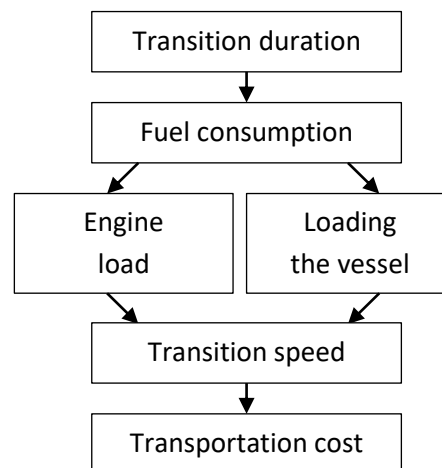


Figure 3 — Scheme of priorities of maritime transport parameters

This diagram shows that the duration of the transition is at the top of the priorities, followed by fuel consumption, which branches into engine load and vessel loading. Together, they affect the speed of the transition, and the final parameter is the cost of transportation. Thus, the diagram reflects the logic:

- if the duration of the trip changes, fuel consumption automatically changes;
- fuel consumption affects technical parameters (engine, load);
- these factors determine the speed, which ultimately forms the economic result - the cost of transportation.

The presented conceptual model of maritime transport management under uncertainty can be a means of methodological computer support of operations to increase the accuracy of maritime transport management strategies in complex conditions. The applied approach to building a conceptual model of maritime transport management places high demands on the quality of a priori data used in the modeling process to determine which criteria affect the optimality of the transport system and which factors are determining.

Conclusions. Binary relations are an effective tool for formalizing multi-criteria optimization in maritime transport. The use of numerical data (duration, fuel consumption, loading, cost) increases the accuracy of the model and its practical applicability. The proposed conceptual model can be used as methodological computer support to improve the effectiveness of maritime transport management strategies under uncertainty.

REFERENCE

1. Sharko O., Buketov A., Klevtsov K., Sapronov O., Akimov O. Modeling of transport and logistics schemes of freight transportation under global risks. Problems of friction and wear. 2023, №3 (100), C.94–105.

2. Sharko O., Yanenko A. (2024) Structuring the main directions of research to value the excess resource of transport structures and materials. Modern technologies in mechanical engineering and transport. 2024, №1(22), PP. 47–54.

3. Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A., Movchan, P.: Multi-criterion optimization of situational management of maritime transportation under conditions of uncertainty. Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy. № 1(30). p.171–186. DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.171-186, (2025).

ЦИФРОВІЗАЦІЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ СУДНА

Шнілєвая Т.М.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. У сучасному світі диджиталізації розвиток морської галузі характеризується активним впровадженням цифрових технологій у всі сфери діяльності, зокрема в управління судновими енергетичними установками. Поряд з автоматизацією, цифровізація дозволяє підвищити ефективність та безпеку експлуатації суден, а також знизити витрати на обслуговування та паливо. З огляду на це, питання впровадження цифрових систем управління є актуальним і перспективним напрямом розвитку морської інженерії. В цій публікації будуть детально розглянуті основні напрями цифровізації, а саме дистанційний моніторинг, прогнозне обслуговування, використання ШІ та цифрові системи керування.

Актуальність дослідження. Численні дослідження довели ефективність профілактичного технічного обслуговування (PdM), інтернету речей (IoT), «big data» та цифрових двійників у відповідних галузях, зокрема в авіації, енергетиці, транспорті та логістиці. Вони вказують на значне підвищення надійності обладнання, зменшення кількості аварій та оптимізацію витрат, завдяки поєднанню моніторингу, діагностики та прогнозування на основі «big data» та штучного інтелекту. Збір великих масивів даних з обладнання та їх аналіз може призвести до значного підвищення надійності. Ефекти, подібні до тих, що спостерігаються в авіації та на залізниці, включаючи зниження витрат на ремонт на 30%, зменшення кількості аварій на 70% та скорочення простоїв на 40%, стали типовими для підприємств, які перейшли на автоматизоване профілактичне обслуговування в енергетичному секторі. Однак у морській галузі такі технології впроваджуються фрагментарно, без єдиних стандартів і зі значними перешкодами для їхнього впровадження. Існують окремі приклади впровадження систем комп'ютерного моніторингу (CBM) та цифрових платформ (наприклад, Wärtsilä, Rolls-Royce Marine, проте комплексний підхід до інтеграції таких рішень ще не сформовано [1]). Цифровізація суднових енергетичних установок може стати оптимальним рішенням для вирішення цього питання.

Постановка задачі. Сучасні суднові енергетичні установки функціонують в умовах зростаючих вимог до енергоефективності, екологічності та надійності експлуатації. Традиційні підходи до керування та обслуговування обладнання не забезпечують необхідного рівня оптимізації процесів, що призводить до підвищених витрат палива, зростання експлуатаційних витрат і ризику виникнення аварійних ситуацій. У зв'язку з цим актуальним є впровадження цифрових технологій, зокрема систем дистанційного моніторингу, енергоменеджменту, прогнозного обслуговування та інтелектуальних алгоритмів керування, які дозволяють підвищити ефективність функціонування суднових енергетичних установок. Однак на сьогодні недостатньо дослідженим залишається питання комплексної оцінки впливу цифровізації на техніко-економічні показники роботи судна, а також визначення оптимальних підходів до інтеграції цифрових систем у існуючі енергетичні комплекси.

Результати досліджень. Цифровізація суднових енергетичних установок передбачає інтеграцію сучасних інформаційних технологій, автоматизованих систем керування та цифрових засобів моніторингу. Основними елементами таких систем є сенсори, контролери, виконавчі механізми та програмне забезпечення, що забезпечує обробку даних у реальному часі. Протягом уже багатьох років фахівці галузі двигунобудування працюють над питаннями комплектації двигунів та агрегатів на їх базі системами автоматизації (в тому числі комплексними), значно скорочують витрати в експлуатації на обслуговуючий персонал, що виключають можливість роботи агрегатів в

аварійних режимах, що забезпечують оптимальні температурні умови в системах охолодження та мастила, оптимальні режими при маневруванні та оперативності виконання команд, що дають можливість експлуатації агрегатів в економічних режимах [2] Одним із ключових напрямів цифровізації є використання систем дистанційного моніторингу технічного стану обладнання. Завдяки цьому здійснюється безперервний контроль параметрів роботи двигунів, генераторів, систем охолодження та інших елементів енергетичної установки.

Дистанційний моніторинг енергетичних систем у режимі реального часу може уникнути поломок системи та простоїв. Для виявлення системних проблем та несправностей розробляються експертні діагностичні системи на основі евристики та пріоритетів у прийнятті рішень. Дані з морських енергетичних систем надсилаються через інтернет експертам на суші без порушення морських операцій. Доступ до даних має бути забезпечений через безпечне віддалене з'єднання. Завдяки впровадженню автоматизації вдалося уникнути збоїв, спричинених людським фактором. Добре розроблена експертна система дистанційної діагностики та оптимізації забезпечує надійність енергетичних систем судна та подовжує термін їх служби. Системи дистанційного моніторингу вже існують, і їх технічний розвиток сприяє діагностиці та оптимізації існуючих та нових судових систем. Мета полягає в тому, щоб полегшити на борту моніторинг параметрів, а фахівці на суші могли бачити стан судових систем через засоби цифрового зв'язку і, спілкуючись з екіпажем, могли легко вжити заходів для усунення несправностей, якщо це необхідно. Це призводить до зниження витрат та підвищення ефективності роботи екіпажу, звільняючи час для іншої роботи на судні, і потенційно може призвести до скорочення кількості персоналу на борту через прагнення до автономних суден. Роль берегових експертів полягатиме в моніторингу параметрів та коригуванні часу технічного обслуговування відповідно до стану елементів системи, виявленні потенційних проблем та їх усуненні у спілкуванні з екіпажем, шляхом надання пропозицій та оптимізації обладнання відповідним чином [3]

У процесі цифровізації важливу роль відіграють системи прогнозного (предиктивного) обслуговування, які використовують алгоритми обробки даних і елементи штучного інтелекту. Такі системи аналізують робочі параметри обладнання і прогнозують можливі несправності, що значно знижує ризик поломок і простоїв. Прогнозне технічне обслуговування та прогнозування несправностей судових двигунів є важливими для підвищення безпеки та економічної ефективності експлуатації суден. Закупорка Суецького каналу в 2021 році, коли судно спричинило значні збої, мала суттєвий вплив на глобальні ланцюги поставок та економіку. Це кришталево яскравий приклад того, що аварії суден можуть спричинити неочікувані аварії, які можуть призвести до величезних економічних втрат та шкоди навколишньому середовищу. Тому розробка точної системи прогнозування несправностей є важливою для максимізації ефективності експлуатації суден та підвищення стійкості. Зокрема, важливість прогнозного обслуговування зростає в нових поколіннях морського транспорту, таких як «розумні» та автономні судна. Такі сучасні судна мають складні системи та конфігурації, тому швидке запобігання поломкам є надзвичайно важливим. У цьому випадку, прогнозне обслуговування стосується технології, яка заздалегідь прогнозує відмови шляхом моніторингу та аналізу даних про стан обладнання в режимі реального часу. Застосування вищезазначеної технології може максимізувати час роботи обладнання та мінімізувати витрати на обслуговування, зменшуючи непотрібні перевірки та технічне обслуговування, порівняно з методом перевірки обладнання відповідно до регулярного графіка технічного обслуговування.

В останні роки розвиток штучного інтелекту (ШІ) та впровадження пояснювального ШІ (XAI) значно просунули галузь прогнозного обслуговування. Моделі прогнозного обслуговування на основі ШІ можуть прогнозувати відмови, аналізуючи великі обсяги даних, що дозволяє заздалегідь виявляти проблеми з судовими двигунами. Однак існуючі моделі ШІ на основі глибокого навчання мають обмеження, оскільки вони є моделями, які

не можуть пояснити причину прогнозованих результатів. Ця відсутність пояснення ускладнює для користувачів довіру до прогнозованих результатів, оскільки вони не розуміють основних причин прогнозів. Одночасно, пояснювальність конструкції судна та обладнання також є суттєвою, оскільки конструкція судна та конструкція обладнання повинні бути основою модифікації та розширення конструкції судна та обладнання. Для вирішення цих проблем з'явилися методи ХАІ, які роблять процеси прогнозування та основу результатів моделей ШІ легшими для розуміння. Моделі прогнозного обслуговування, що використовують ХАІ, не тільки прогнозують відмови, але й пояснюють, чому отримані певні результати, тим самим підвищуючи надійність прогнозів. Це дозволяє користувачам вживати більш відповідних дій на основі наданих даних [4].

Ще одним важливим напрямом цифровізації є впровадження цифрових систем енергоменеджменту, які забезпечують оптимізацію розподілу енергетичних ресурсів на судні. Вони дозволяють регулювати режими роботи генераторів, двигунів та допоміжного обладнання залежно від навантаження, що сприяє зниженню споживання палива та підвищенню загальної ефективності. Допоміжна енергія - функції для управління бортовою енергією. У відповідь на зростаючий попит на більш ефективні та стійкі морські рішення, ASSIST ENERGY була розроблена як інтегрована система для вдосконаленого управління енергією на борту. Безперешкодно взаємодіючи із системами автоматизації судна, ASSIST ENERGY збирає та аналізує експлуатаційні дані, щоб забезпечити повний огляд енергетичної ефективності судна. Система структурована навколо двох наступних основних функціональних рівнів.

1. Розширений моніторинг (AMS). Вона оцінює продуктивність судна в різних технічних областях, збираючи та записуючи дані з систем автоматизації та оцінюючи ключові показники ефективності (KPI), пов'язані з енергетикою. Ця система дозволяє виявляти відхилення від очікуваних експлуатаційних умов та підтримує оптимізацію використання енергетичних ресурсів за допомогою спеціалізованих модулів для теплової енергії, рушійної системи, опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) та електроенергії. Як розширення AMS, диспетчерська вежа діє як центральний командний вузол для флоту, забезпечуючи централізований контроль енергоспоживання на кількох суднах у режимі реального часу. Основні характеристики включають:

- Огляд флоту в режимі реального часу. Таким засобом є динамічна інтерактивна карта, що відображає поточне положення, швидкість та стан кожного судна флоту.
- Можливості інтеграції відображає сумісність зі стандартними галузевими протоколами зв'язку забезпечує безперебійний обмін даними між системами.
- Історія продуктивності аналізує доступ до історичних даних судна для аналізу тенденцій та порівняльного аналізу продуктивності.
- Панелі показників ключових показників ефективності (KPI): інтерактивні панелі з інтерактивними елементами для детального дослідження певних KPI, таких як витрата палива та історія рейсів.
- Звітність щодо регулювання: автоматизована звітність про викиди та споживання палива, що відповідає міжнародним стандартам.

2. Система підтримки прийняття рішень (СППР). Вона надає експлуатаційні рекомендації на основі алгоритмів машинного навчання, статистичного аналізу та технології цифрових двійників для підвищення загальної ефективності судна та зменшення споживання енергії. Ця система дозволяє бортовому персоналу коригувати продуктивність судна відповідно до показників енергетичної ефективності вздовж запланованих маршрутів.

В основі ASSIST ENERGY лежить високоточний симулятор, заснований на агентному моделюванні, здатний відтворювати енергетичну поведінку судна. Такий підхід до моделювання дозволяє детально відображати окремі компоненти системи та їх взаємодію, що дозволяє робити точні прогнози за різних експлуатаційних сценаріїв. Ці вдосконалені симуляційні моделі включають проектні характеристики судна разом із

реальними експлуатаційними даними, зібраними на борту [5].

Крім того, цифрові технології забезпечують інтеграцію суднових систем у єдину інформаційну мережу, що дозволяє здійснювати централізоване управління та обмін даними між різними підсистемами. Це підвищує точність керування та зменшує вплив людського фактора.

Висновки Впровадження цифровізації має значний позитивний вплив на роботу судна, завдяки чому суднові компанії отримують економічну вигоду та підвищують конкурентоспроможність. А саме:

- підвищується енергоефективності за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання;
- знижуються витрати на паливо та технічне обслуговування;
- підвищується надійність та безпека експлуатації;
- зменшується кількість аварійних ситуацій;
- з'являється можливість дистанційного контролю та управління.

Подальший розвиток цифрових технологій, зокрема штучного інтелекту та Інтернету речей, відкриває нові можливості для вдосконалення систем автоматичного управління судновими енергетичними установками.

ЛІТЕРАТУРА

1. Самойлов О., Сіманенков.А. Технології автоматизації в обслуговуванні суднових систем: проблеми та шляхи покращення через міжгалузевий досвід. Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, (51), 197–207. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344906>
2. Інтелектуальні системи автоматизації : монографія / Аврунін О. Г. та ін. Кременчук : Видавництво «НОВАБУК», 2021. 322 с.
3. Remote Monitoring, Simulation and Diagnosis of Electronically Controlled Marine Engines Енергія 2025 ,18(6), 1399; <https://doi.org/10.3390/en18061399>
4. Time-Series Explanatory Fault Prediction Framework for Marine. Main Engine Using Explainable Artificial Intelligence <https://www.mdpi.com/2077-1312/12/8/1296> (дата звернення 03.05.2026)
5. Digital Twin Approach for Ship Energy Management. A. Bonvicini, D. Cangelosi dario.cangelosi@cetena.it, [...], and G. Previti+2View all authors and affiliationsVolume: Technology and Science for the Ships of the Future <https://journals.sagepub.com/doi/10.3233/PMST250138> (дата звернення 03.05.2026)

**СЕКЦІЯ:
ТРЕНАЖЕРНІ СИСТЕМИ Й ЛЮДСЬКИЙ ФАКТОР
НА ТРАНСПОРТІ**

**SECTION:
SIMULATOR SYSTEMS AND HUMAN FACTOR IN TRANSPORT**

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО РОЗГОРТАННЯ ПОЖЕЖНО-РЯТУВАЛЬНОГО АВТОМОБІЛЯ

¹Белюченко Д.Ю., ²Стрілець В.М.

¹Національний університет цивільного захисту України
(Україна)

²Національний університет «Київський Авіаційний Інститут»
(Україна)

Ефективне пожежогасіння в умовах ліквідації надзвичайних ситуацій, у тому разі військового характеру, супроводжується протиріччям між тактичними прийомами, що були розроблені в 60–70-х роках двадцятого сторіччя з урахування створеної на той час пожежної техніки і наведені в діючих документах, та наявною практикою пожежогасіння, коли використовуються нові зразки пожежних автомобілів з покращеними тактико-технічними характеристиками. При цьому для них відсутні рекомендації щодо використання, які б враховували нові типи пожежно-рятувальних автомобілів, рівень підготовленості особового складу або пору року тощо. Враховуючи це, задача розв'язання невідповідності існуючих нормативних вимог стосовно застосування першим пожежним підрозділом пожежно-рятувальної техніки, яку застосовує особовий склад першого пожежно-рятувального підрозділу, сучасним завданням, які стоять перед ним в процесі гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій, є актуальною. Підтвердженням актуальності питань щодо скорочення часу оперативних розгортань перших пожежно-рятувальних підрозділів є і те, що саме ці дії складають 65–80 % загального обсягу роботи першого відділення в залежності від регіону. А під час ліквідації надзвичайних ситуацій бойові роботи із залученням автоцистерн виконуються майже у 90% всіх випадків [1].

Дослідження питань розробки рекомендацій особовому складу оперативних розрахунків пожежних автомобілів на сьогоднішній день відбувається за результатами дослідження процесу виконання рятувальниками операцій та процесів, які є типовими під час гасіння пожеж та проведення аварійно-рятувальних робіт. Так, в США Федеральне агентство по реагуванню на надзвичайні ситуації відповідає за підготовку пожежно-рятувальних підрозділів з урахуванням, як місцевих особливостей, так і пожежної техніки, яка стоїть у них на озброєнні. При цьому задіяний персонал повинен пройти спеціальну підготовку до кваліфікованого застосування специфічного аварійно-рятувального обладнання, показником чого є регламентовані часові стандарти основних етапів реагування (у тому разі час оперативного розгортання) як професійними, так і волонтерськими підрозділами [2, 3].

Базовий стандарт в ЄС EN 1846, у відповідності до якого відбувається підготовка рятувальників, також вимагає того, щоб були враховані як кількість оперативного розрахунку (пожежний екіпаж — три; пожежна «ескадрилья» — шість пожежних), так і клас (легкий, середній або супер) пожежного автомобіля [4].

Країною, де організація пожежної служби вважається однією з найкращих, вважається Японія. Її підхід до роботи протипожежної служби взяли за основу в Тихоокеанському регіоні. Проведений нами аналіз показав, що, незважаючи на різноманіття пожежної та аварійно-рятувальної техніки в оперативно-рятувальних підрозділах, в них реально використовуються автоцистерни також трьох масових класів [5, 6].

Тобто, розробка конкретних оперативно-технічних пропозицій щодо підвищення ефективності оперативної діяльності пожежно-рятувальних підрозділів, в першу чергу скорочення часу пожежогасіння першим бойовим розрахунком, вимагає одночасного урахування класу пожежного автомобіля, рівня підготовленості особового складу та пори

року. З урахуванням цього в основу розробки математичної моделі оперативного розгортання пожежного автомобіля була покладена можливість отримання множини можливих результатів проведення конкретних варіантів оперативного розгортання. Впорядкованість такої множини дозволяє перейти до багатофакторної поліноміальної моделі, розробка якої спирається на відповідний план імітаційного експерименту. При виборі плану враховувалось, що вхідні показники можуть мати нелінійний вплив на обраний показник ефективності, а також взаємодіяти між собою. З урахуванням того, що порівняльну оцінку впливу обраних для розгляду факторів доцільно виконувати в нормованих змінних, задача обґрунтування пропозицій щодо підвищення ефективності функціонування системи «рятувальник - пожежний автомобіль — надзвичайна ситуація» конкретизується в задачу ранжування факторів за ступенем їх впливу на ефективність, в якості якої розглядається час, проведення оперативного розгортання.

Враховуючи результати аналізу особливостей проведення оперативних розгортань, для детального розгляду біли вибрані наступні фактори, які розглядаються в нормованому вигляді; x_1 — клас пожежного автомобіля; x_2 — рівень підготовленості особового складу; x_3 — пора року. Це зумовило вибір плану $3 \times 3 \times 2$ для проведення багатофакторного експерименту і отримання математичної моделі оперативного розгортання пожежно-рятувального автомобіля у вигляді трифакторного нелінійного поліному

$$y(x) = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_2 \cdot x_2 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_3 \cdot x_3. \quad (1)$$

При цьому модель буде мати гарні статистичні характеристики та кращі по точності оцінки всіх коефіцієнтів регресії $\{k_s\}$. Упорядкування результатів багатофакторного імітаційного фізичного моделювання таким чином, що найгірші показники відповідають рівню «-1-1-1», а найкращі — «+1+1+1», а стосовно класу пожежно-рятувального автомобіля розгляд також середнього рівня « $x_1=0$ », дозволяє суттєво спростити побудову конкретних поліноміальних моделей, які необхідно знайти, оскільки в результаті цього під час розрахунку оцінок коефіцієнтів b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} можна використовувати готові формули.

Спираючись на (1) було розроблено методику скорочення часу оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів першим рятувальним підрозділом, керуючий алгоритм реалізації якої наведено на рис.1.

За результатами безпосередніх експериментальних досліджень, які проводились у відповідності до плану $3 \times 3 \times 2$ були отримані математична модель оперативного розгортання «Подача ствола ГПС-600 через робочу лінію на три рукави діаметром 51 мм від автоцистерни» (OP1)

$$y_{OP1} = 0,551 - 0,210 \cdot x_1 - 0,075 \cdot x_1^2 - 0,007 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,015 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,057 \cdot x_2 + 0,0014 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,265x_3. \quad (2)$$

та математична модель оперативного розгортання «Подача одного ствола «А» та одного ствола «Б» з прокладанням магістральної лінії на два рукави діаметром 77 мм та двох робочих ліній з установкою автоцистерни на пожежний гідрант» (OP2)

$$y_{OP2} = 0,482 - 0,170 \cdot x_1 - 0,042 \cdot x_1^2 + 0,005 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,052 \cdot x_1 \cdot x_3 - 0,044 \cdot x_2 + 0,014 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,258x_3. \quad (3)$$

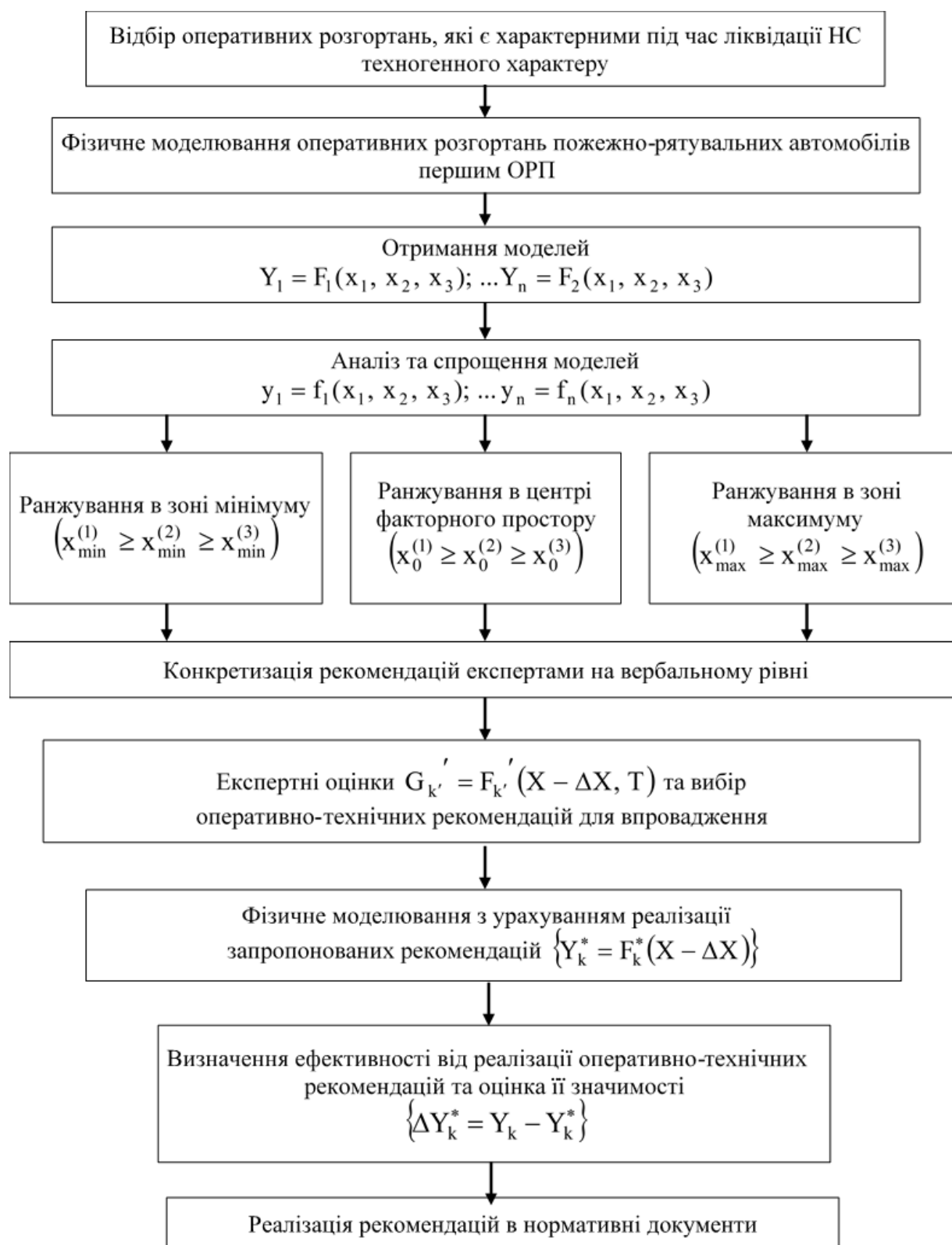


Рисунок 1 — Керуючий алгоритм реалізації методики скорочення часу оперативних розгортань пожежно-рятувальних автомобілів першим рятувальним підрозділом

Результати, які були визначені за допомогою розроблених математичних моделей розглянутих варіантів оперативного розгортання співпали з результатами натурних експериментів та уклались в довірчі інтервали, які були розраховані з надійністю 0,95 за критерієм Стюдента. Це підтвердило достовірність розробленої математичної моделі (1).

Аналіз отриманих моделей (2) та (3) показав, що користування ними без спрощення для визначення оперативно-технічних рекомендацій за результатами ранжування факторів по ступеню їх впливу на час оперативного розгортання забезпечує досягнення достовірних результатів з рівнем двостороннього ризику $\alpha = 0,05$.

У якості конкретних науково-обґрунтованих рекомендацій для впровадження в повсякденну діяльність оперативно-рятувальних підрозділів для оперативно-рятувальних автоцистерн легкого та важкого класів запропоновано нові нормативи для оцінювання рівня підготовленості рятувальників, які враховують як пору року, так і їх фаховий рівень.

Показано, що з рівнем значимості, розрахованим за критерієм Стюдента, час оперативного розгортання в результаті реалізації запропонованих оперативно-технічних рекомендацій значимо скорочується, що підтверджує надійність розробленої методики скорочення часу оперативних розгортань першим рятувальним підрозділом під час ліквідації надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

ЛІТЕРАТУРА

1. Методика скорочення часу оперативного розгортання першим рятувальним підрозділом в умовах виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру / Д.Ю. Бєлюченко, В.М. Стрілець. Харків: НУЦЗУ, 2024. 119 с.
2. Hazardous waste operations and emergency response. Occupational Safety and Health Standards 1910.120. Режим доступу: https://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9765
3. NFPA 1500 Standard on Fire Department Occupational Safety and Health Program. 2002 Edition. Режим доступу: <http://www.fsans.ns.ca/pdf/research/nfpa1500.pdf>
4. BS EN 1846-2:2009+A1:2013 Firefighting and rescue service vehicles. Common requirements. Safety and performance. Режим доступу: <https://doi.org/10.3403/30233210>
5. International Concepts in Fire Protection. Practices from Japan, Hong Kong, Australia and New Zealand by Philip S. Режим доступу: <http://strategicfire.org/wp-content/uploads/2015/04/tri-data-global-concepts-1985.pdf>
6. Tokyo Fire Department. Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Tokyo_Fire_Department

КОМУНІКАТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ЯПОНСЬКИХ МОРЯКІВ ЯК ЧИННИК БЕЗПЕКИ НА СУДНІ

Величко Т. О., Добровольська В. А.
Херсонська державна морська академія
(Україна)

Вступ. Сучасне торговельне судноплавство характеризується високим ступенем інтернаціоналізації, де ефективне функціонування багатонаціональних екіпажів є запорукою безпеки судна, вантажу та життя людей. Вільне володіння англійською мовою та знання стандартних судових процедур не є вичерпними гарантіями повного взаєморозуміння. На містку виникають ситуації, коли невербальні сигнали – специфічні паузи чи ввічливі реакції – інтерпретуються хибно, що створює передумови для критичних помилок. В умовах інтенсивного судноплавства ціна таких комунікативних розбіжностей може бути катастрофічною.

Японія залишається одним із ключових суб'єктів світового морського ринку, контролюючи близько 12% світового тоннажу. Японські моряки традиційно демонструють високий рівень технічної кваліфікації, проте їхні комунікативні моделі суттєво відрізняються від норм, прийнятих для українських фахівців. Протиріччя між високою професійною компетентністю та специфікою національних засобів комунікації зумовлює **актуальність дослідження** даної теми.

За даними Європейського агентства з морської безпеки, людський фактор залишається головною причиною аварійних подій на морі. Було визначено, що з 2015 по 2024 рік 64,5% аварійних подій були пов'язані з діями людини, а 50,5% факторів, що сприяли цьому, були пов'язані з поведінкою людини. Якщо врахувати обидва фактори, то 78,8% розслідуваних морських аварій та інцидентів пов'язані з людським фактором. Ці тенденції є спільними для всіх типів суден [1, с. 9]. Провідне місце серед складників людського фактору займають комунікативні збої: некоректне сприйняття розпоряджень, затримка у передачі інформації або свідоме замовчування критичних даних через ієрархічні особливості культури. Попри важливість проблеми, міжкультурний вимір безпеки судноплавства у науково-педагогічному просторі залишається недостатньо висвітленим.

Аналіз резонансних морських інцидентів на судах зі змішаними екіпажами вказує на те, що причиною зіткнень та посадок на мілину часто є не технічні несправності, а помилки у взаємодії персоналу. Японська культура спілкування з її орієнтацією на контекст, сувору ієрархію та концепцію збереження гармонії може призводити до небезпечної пасивності підлеглого офіцера у критичний момент.

Для курсантів Херсонської державної морської академії, які інтегруються у міжнародний ринок праці, глибоке розуміння цих особливостей є практичною необхідністю, що забезпечує відповідність міжнародним стандартам управління ресурсами містка (BRM).

Постановка задачі. Метою дослідження є виявлення та аналіз культурно зумовлених комунікативних особливостей японських моряків, які безпосередньо впливають на безпеку судноплавства в умовах роботи в міжнародному екіпажі.

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

- 1) охарактеризувати японську культуру комунікації з позицій теорії висококонтекстних культур Е. Холла та культурних вимірів Г. Хофстеде;
- 2) виокремити специфічні комунікативні патерни японських фахівців, що містять потенційні ризики для безпеки під час несення вахти на містку;
- 3) розглянути зв'язок виявлених особливостей із вимогами Конвенції ПДНВ та принципами управління ресурсами містка (BRM);
- 4) сформулювати практичні рекомендації щодо підготовки майбутніх морських офіцерів до ефективної професійної комунікації в умовах роботи зі змішаними екіпажами.

Результати досліджень. Відправною точкою аналізу слугує теорія висококонтекстних культур американського антрополога Едварда Холла. Саме він стверджує, що культура — це комунікація, а комунікація — це культура [2, с. 32]. Культури різняться за тим, яку частину змісту закладено у слова, а яку — у контекст, ситуацію, паузи та невербальні сигнали. Японія посідає одну з найвищих позицій у шкалі висококонтекстності: тут мовчання рівнозначне відповіді, а пауза може означати і роздум, і незгоду, і неможливість виконати прохання. Для моряка, вихованого в традиції прямої й однозначної комунікації, така пауза сприймається як порожнеча, а не як сигнал — і саме в цьому прихований перший ризик.

Зазначений підхід доповнюється використанням параметрів культури Г. Хофстеде, що дозволяє глибше дослідити специфіку взаємодії у багатонаціональних суднових екіпажах через призму системного епістемологічного аналізу [3, с. 93–94]. Ієрархічна культура японського суспільства накладає на цю особливість додатковий вимір. За індексом дистанції влади Г. Хофстеде Японія отримує 54 бали – показник помірний, однак у практиці морської праці він набуває специфічної форми [4; 5]. Молодший офіцер, який бачить помилку старшого, не стане її оскаржувати відкрито: збереження гармонії у колективі і ненанесення «втрати обличчя» ставляться вище за пряме вирішення проблеми. Цей феномен відомий у дослідженнях безпеки як «проблема авторитету капітана» (captain authority problem) і задокументований у ряді морських інцидентів, зокрема пов'язаних із японськими суднами в протоці Малакка.

Нерозривно пов'язаним із цим є механізм уникання прямої відмови. Японська культурна норма не передбачає слова «ні» як самостійної відповіді: замість нього використовуються формули на кшталт «це може бути складно» або «я подумаю», які фактично означають відмову. На містку це набуває конкретного небезпечного сенсу: вахтовий офіцер, який не зрозумів наказу, відповість «so desu ne» – і це прозвучить як підтвердження, хоча ним не є. Визнати нерозуміння – значить втратити обличчя, а це неприйнятно. Таким чином, між відданим наказом і реальними діями може виникнути прірва, яка залишиться непомітною до останнього моменту.

Водночас японська комунікативна культура має якості, що суттєво підвищують безпеку і заслуговують на окрему увагу. Японські моряки надзвичайно пунктуальні, методичні у веденні суднової документації та орієнтовані на стабільний командний результат. Вони неухильно дотримуються встановлених процедур і вкрай рідко відступають від регламенту на власний розсуд — така дисциплінованість суттєво знижує ймовірність помилок, породжених самовпевненістю або недбалістю.

Саме ця суперечність між культурою мовчання і вимогами відкритої комунікації стає центральним викликом при застосуванні міжнародного стандарту управління ресурсами містка (BRM), закріпленого в Конвенції ПДНВ (Манільські поправки 2010 р.) [6]. Стандарт прямо передбачає право і обов'язок кожного члена екіпажу висловлювати занепокоєння, підтверджувати накази й у разі потреби зупиняти небезпечну дію. Для японського моряка ці вимоги є культурно чужорідними і потребують цілеспрямованого тренінгу. Показово, що провідні японські морські університети — Токійський океанографічний університет та університет Кобе — вже запровадили у програми підготовки модулі міжкультурної комунікації, визнавши тим самим цю проблему на інституційному рівні [7; 8].

Висновки. Культурно зумовлені комунікативні особливості японських моряків — висококонтекстність спілкування, ієрархічна стриманість, уникання прямої відмови та «збереження обличчя» — є вагомими чинниками ризику в умовах роботи багатонаціонального екіпажу. Водночас притаманні їм методичність, орієнтація на командний результат та неухильне дотримання регламентів є цінними якостями, що підвищують загальний рівень безпеки. Ключовим стратегічним завданням є не уникання міжкультурної взаємодії, а цілеспрямована підготовка до неї.

За результатами дослідження пропонується:

1. Впровадити до навчальних планів морських закладів вищої освіти навчальний курс «Міжкультурна комунікація», побудований на відпрацюванні практичних сценаріїв взаємодії у змішаних екіпажах, як нормативну дисципліну.

2. Інтегрувати міжкультурний компонент у тренажерну підготовку за програмами BRM, акцентуючи увагу на подоланні бар'єрів у системі «капітан – вахтовий офіцер».

Міжкультурна компетентність у судноплаванні не є допоміжною навичкою; це критичний елемент професійної придатності та невід'ємна складова безпеки мореплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2025. EMSA. URL: <https://www.emsa.europa.eu/publications/item/5562-annual-overview-of-marine-casualties-and-incidents-2025.html>

2. Добровольська В. А., Гоян І. М., Петранюк А. І. Проблема міжкультурної комунікації у філософському вимірі. Актуальні проблеми філософії та соціології. 2024. № 48. С. 31–34.

3. Добровольська В. А. Теорія культурних вимірів Г. Хофстеде як епістемологічний інструмент морської міжкультурної комунікації. Перспективи. Соціально-політичний журнал. 2026. № 1. С. 91–100.

4. Hofstede G., Hofstede G.J., Minkov M. Cultures and Organizations: Software of the Mind. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2010. 550 p.

5. Japan / Geert Hofstede. Country comparison bar charts. URL: <https://geerthofstede.com/country-comparison-bar-charts/>

6. Манільські поправки до додатка до Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти (ПДНВ) 1978 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/896_052#Text

7. Syllabus / Kobe University. URL: https://kym22-web.ofc.kobe-u.ac.jp/campus/campusquare.do?_flowExecutionKey=_c173274D7-39AE-A36D-BB9C-57B36DC030FB_k2CCE7FD4-4206-FDAD-17A4-7DA041843158

8. Study Guidance Handbook of Graduate School / Tokyo University of Marine Science and Technology. URL: <https://www.kaiyodai.ac.jp/campuslife/upload-file/140c52b883813b9b1e97a4e6369e94b9c4bfc79.pdf>

THE ROLE OF SOCIAL STEREOTYPE IN INTERCULTURAL COMMUNICATION OF DISTANT SAILORS

¹*Leshchenko A.*, ²*Sheryl Jo Urdaneta*

¹*Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)*

²*University of Malaya
(Malaysia)*

Introduction. The global economy is best realized in the field of international merchant shipping. A contemporary vessel is an exceptional micro-society on the one hand and its crew multicultural and multiethnic on the other (e.g., European officers and Filipino or Indonesian ratings). During long, independent passages, scarce space, and physical and psychological demands, successful cross-cultural communication is crucial for maritime safety. Social stereotypes are a major influence; they are the drivers, but also the factors in structuring and complicating this communication.

There is no doubt as to the importance of this subject since social stereotypes have a considerable impact on the crew, which has a bearing on the relationships that each person on board has and not only can influence the performance of everyone else on board but also help ensure the safety of navigation.

The purpose of this paper is to offer a theoretical justification for how social stereotypes work through the intercultural interactions of seafarers traveling back and forth across distances over sea.

The general framework of intercultural communication is best understood through M. Prosser's notion [5], which defines intercultural communication as interpersonal communication accompanied by other characteristics common and different among language, non-verbal means, means of perception, modes of values, and forms of thinking. Through the difference, social stereotype functions. Social stereotype, coined by W. Lippmann [6], involves an image of the other group of people which simplifies and schematizes their characteristics. Stereotypes among the marine population are very strong. According to the experience of previous journeys, the belief among others working on the seas, and the sociocultural feature of the countries of origin of seafarers these are formed. The precise nature of social stereotypes within the confines of a ship is ambivalent:

1. Adaptive and cognitive level (positive condition). In the early stages of a trip, in which the new crew is getting to know each other, stereotypes serve to reduce apprehension and feelings of culture shock. They allow officers and enlisted personnel to have primary interaction algorithms: optimization of knowledge management over national stereotypes to help the captain and first mate choose a proper leadership style. For instance, an awareness of the high-power distance (of which G. Hofstede [3] was the most prominent) in Asian cultures (Filipinos, Indians) enables one to find out why they do not report openly challenging the orders of European officers, which aids to change management. Predictability of everyday life: Stereotypes about religious and gastronomic taboos (for example, Muslim or Hindu eating behavior) allow the cook and crew of the ship the opportunity to avoid unknowingly offending colleagues.

2. Destructive and barrier function. Excessive stereotyping in the confined space of a ship poses a direct threat to vessel safety:

Auto-pilot Effects and Bias: Assigning negative features to an entire national group (e.g., labels like «laziness» or «arrogance») leads to a state of enduring prejudices. This leads to the splitting of the crew into micro-groups based solely on country and prevents team cohesiveness (Team Building). Communication security violations (standard marine communication phrases): a biased officer might disregard a remark from a rating of a different nationality because they think it is «incompetent by birth». This would go against the principles of Bridge Resource Management when everybody on the crew should have the right to raise red flags to avoid an accident. Conflict Generating in Isolation:

Unlike work on the coast, you cannot go home after a shift on a ship. A gesture or intonation

that people do not say verbally, misread through a stereotype lens, is a provocation for long-term latent or open conflicts to develop.

Conclusions. In conclusion, the study's findings will help to build our understanding of social stereotypes in the intercultural communication of seafarers during long-distance voyages as a complex, two-level regulator that acts in a direct way to both the socio-psychological environment inside the crew and the vessel at a higher level of operation. A set of basic principles were developed from the analysis conducted:

At this autonomous voyage with limited space and extreme environmental influences, social stereotypes act intuitively as the principal psychological tool to overcome «culture shock» as well as reduce the cognitive load. Still, their beneficial adaptive roles are only transient. Rigid stereotyping leads to prejudice without thoughtful introspection, which activates ethnic microgroup isolation among the crew and undermines team camaraderie. Stereotyping deconstruction's scientific worth lies in optimizing an isolated person's psychological resiliency. The knowledge of seafarers that colleagues from various cultural communities behave differently, not due to their own animosity, but due to individual differences in the national perception matrix (according to M. Prosser's paradigm of cultural dialogue [8]) is a potent protective mechanism in facing potential conflicts that lie hidden. Psychological stress on board. The successful intercultural communication at sea is a matter not only of language ability, but essential survival. And because over 80% of maritime accidents are down to the destructive impact of the human factor — and this is especially important in times of emergency — reducing the errors of communication born of national prejudices has economic and safety consequences as well. Crossing the «autopilot effect» with regard to subordinates belonging to another nationality is the first and foremost key, for realizing Bridge Resource Management and Engine Room Resource Management concepts. This has led to the efficient flow of command sequence (navigation, mooring, emergency deployment, etc.) in crucial shipboard operations, ensuring lives, vessel, and cargo are protected. Shifting rigid heterostereotypes to flexible cultural awareness cannot happen on a whim. It's this kind of strategy that calls for the kind of targeted modernization of the higher maritime education system and the internal policies of crewing companies that it advocates. Specialized cross-cultural training and an ethnocultural perspective on leadership, teamwork, etc., is a strategic priority to guarantee a functioning and safe, inclusionary and high-performance modern globalized fleet.

REFERENCES

1. Batsevich F. S. Dictionary of Intercultural Communication Terms. Kyiv: Doverie, 2007. 205 p.
2. Bennett, J. M. (2015). The SAGE Encyclopedia of Intercultural Competence. SAGE Publications.
3. Gnatyuk S. L. Stereotyping as a Sociocultural Phenomenon in the Context of Globalization. Gilea: Scientific Bulletin. 2018. Issue 131. pp. 192–195.
4. Gudykunst, W. B., & Kim, Y. Y. (2003). Communicating with Strangers: An Approach to Intercultural Communication (4th ed.). McGraw-Hill.
5. Hofstede, G. (2011). Dimensionalizing Cultures: The Hofstede Model in Context. Online Readings in Psychology and Culture, 2(1).
6. Lippmann, W. (1922). Public Opinion. New York: Harcourt, Brace and Company.
7. Manakin V. M. Language and Culture: Ukrainian-Russian Comparable Aspects. Kyiv: Academy, 2012. 288 p.
8. Prosser, M. H. (1978). The Cultural Dialogue: An Introduction to Intercultural Communication. Boston: Houghton Mifflin Co.
9. Tajfel, H. (1981). Human groups and social categories: Studies in social psychology. Cambridge University Press.
10. Vasilyeva O. A. Social Stereotype as a Factor in Intercultural Communication Regulation. Bulletin of the Ivan Franko Zhytomyr State University. 2014. Issue 2. pp. 13–17.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА КОГНІТИВНОЇ СУМІСНОСТІ ECDIS РІЗНИХ ВИРОБНИКІВ

*Петровський А.В., Кухтіна В.П.
Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Сучасні дослідження електронних картографічних навігаційних систем (ECDIS) демонструють зміщення акценту від функціональної повноти систем до якості взаємодії “людина–машина” (HMI). Це пов’язано з тим, що відповідно до міжнародних вимог ІМО та ІНО всі сертифіковані ECDIS забезпечують базову функціональність, однак їх практичне використання суттєво відрізняється залежно від реалізації інтерфейсу, логіки обробки даних та організації інформаційного простору.

Актуальність досліджень. Неуніфікованість інтерфейсу та функцій ECDIS приводить до ризику людської помилки. Фактом є те, що всі ECDIS сертифіковані за ІМО/ІНО/ІЕС і формально «однакові», але реалізація функцій сильно відрізняється між виробниками. В результаті офіцер переходить з судна на судно, де вже інший ECDIS, а з ним і інший інтерфейс, іноді — логіка, повідомлення, перевірка маршруту. Саме для знижування ймовірності помилок офіцер повинен пройти навчання і отримати сертифікат на використання конкретного ECDIS. Це реальна системна проблема e-navigation, яку всі визнають, але мало хто формалізує.

Основна частина. Для порівняння обрані ECDIS: Furuno, Transas / Wärtsilä Navi-Sailor, Sperry Marine, JRC за сьома критеріями (табл.1): зручність інтерфейсу, планування переходу (Route planning), перевірка маршруту (Route check), політика повідомлень (Alarm management), інтеграція з іншими системами, навчання екіпажу.

Таблиця 1 — Порівняння різних ECDIS

Критерій	Furuno	Transas / Wärtsilä Navi- Sailor	Sperry Marine	JRC
Зручність інтерфейсу	Висока (простий UI)	Середня (багато функцій)	Середня	Висока
Route planning	Обмежена автоматизація	Розширена (Advanced Planning)	Середня	Середня
Route check	Базовий	Розширений (AIO, safety checks)	Середній	Середній
Alarm management	Простий	Складний (багато параметрів)	Середній	Середній
Інтеграція з іншими системами	Висока (Radar, Conning)	Дуже висока (Fleet systems)	Висока	Висока
Advanced функції	Обмежені	Trial manoeuvre, playback	Частково	Частково
Навчання екіпажу	Швидке	Потребує більше часу	Середнє	Середнє

У наукових публікаціях [1–7] проводились дослідження з цієї проблеми. У роботі [1] проведено один із базових аналізів usability інтерфейсу ECDIS. Автори доводять, що ефективність роботи судноводія визначається не лише доступністю функцій, а й швидкістю їх виклику та зрозумілістю структури меню. Запропоновано оцінювати usability через час

виконання задач і кількість дій оператора. Водночас дослідження обмежується переважно кількісними показниками і не враховує когнітивні аспекти. Подальший розвиток цієї ідеї представлено у [2], де запропоновано комплексний підхід до оцінки взаємодії людини з ECDIS. На відміну від [1], автори включають до аналізу не лише об'єктивні показники (час, кількість операцій), але й суб'єктивні – когнітивне навантаження, зручність сприйняття та рівень стресу. Це дозволяє розглядати usability як багатовимірну характеристику, що безпосередньо впливає на надійність судноводіння. У роботі [3] запропоновано методологію тестування e-navigation обладнання з використанням технологій відстеження погляду (eye-tracking). Дослідження показує, що різні інтерфейсні рішення призводять до різного розподілу уваги судноводія. Зокрема, складні або перевантажені інтерфейси спричиняють збільшення часу пошуку критично важливої інформації, що потенційно підвищує ризик помилок. Таким чином, підтверджується необхідність врахування когнітивних процесів при оцінці ECDIS. Особливе значення для даного дослідження має робота [4], в якій здійснено порівняльний аналіз ECDIS різних виробників. Автори встановили, що при однаковій нормативній базі реалізація ключових функцій (route planning, route check, alarm management) суттєво відрізняється. Це призводить до необхідності додаткового навчання екіпажу та підвищує ймовірність помилок при переході між суднами. Таким чином, проблема неуніфікованості інтерфейсів набуває системного характеру. У статті [5] розглянуто підхід до стандартизації інтерфейсів морських систем (S-mode). Незважаючи на спроби уніфікації, автори відзначають, що повна стандартизація не досягнута, а виробники продовжують реалізовувати власні концепції інтерфейсів. Це підтверджує актуальність досліджень, спрямованих на створення універсальних критеріїв оцінки ECDIS. Робота [6] присвячена аналізу реальних аварійних ситуацій, пов'язаних з використанням ECDIS. Встановлено, що значна частина інцидентів виникає не через технічні несправності, а через неправильне використання системи. Зокрема, проблеми пов'язані з некоректним налаштуванням safety contour, ігноруванням попереджень та недостатнім розумінням функцій системи. Це підкреслює критичну роль людського фактору. У дослідженні [7] розглядається концепція людино-орієнтованого проєктування в морській галузі. Автори наголошують, що автоматизація, зокрема впровадження ECDIS, не завжди призводить до підвищення безпеки. Навпаки, у разі неправильного дизайну інтерфейсу можливе зниження ситуаційної обізнаності та надмірна залежність від системи.

Висновки. Аналіз сучасних досліджень показав, що ключовою проблемою ECDIS є не функціональна обмеженість, а якість взаємодії людини з системою. Незважаючи на значну кількість робіт, відсутня уніфікована методика інтегральної оцінки usability.

Порівняльний аналіз розглянутих публікацій дозволяє сформулювати такі ключові висновки:

- Usability є ключовим фактором ефективності ECDIS [1], [2].
- Когнітивне навантаження суттєво впливає на якість навігаційних рішень [2], [3].
- Існує значна варіативність реалізації ECDIS різних виробників [4].
- Стандартизація інтерфейсів залишається незавершеною [5].
- Людський фактор є основною причиною навігаційних інцидентів [6].
- Автоматизація без урахування НМІ може створювати нові ризики [7].

При цьому встановлено, що відсутня універсальна методика інтегральної оцінки ECDIS, яка б поєднувала: ефективність виконання задач, когнітивні аспекти, вплив на безпеку. Це створює передумови для розробки інтегрального показника usability.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wang, T. H., & Zheng, P. J. (2014). Analysis of usability of ECDIS human-machine interface. *Applied Mechanics and Materials*. V 519-520, p. 1397-1400 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.519-520.1397>
2. Hao, Y. et al. (2019). Usability evaluation method of ECDIS human-computer

interaction. International Journal of e-Navigation and Maritime Economy. V13, P.84-95 <https://doi.org/10.52820/j.enavi.2019.13.084>

3. Zalewski P., Muczynski B. (April 2016). Extended Framework for Usability Testing in e-Navigation Systems. TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation V10(1). p.43-48 <https://doi.org/10.12716/1001.10.01.04>

4. Žuškin S., Brčić D., Uroda M., Strabić M. (2023). Evolving ECDIS: Concept Development Through Different Manufacturer Models Comparison. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol. 17, No. 1, pp. 227-234 <https://doi.org/doi:10.12716/1001.17.01.25>

5. Vu, V. D., Lützhöft, M., & Imset, M. (2024). Developing human factors design guidelines for marine electronics: the case of S-mode. WMU Journal of Maritime Affairs. Volume 23, pages 25–48 <https://link.springer.com/article/10.1007/s13437-023-00317-2>

6. Application and usability of ECDIS A MAIB and DMAIB collaborative study on ECDIS use from the perspective of practitioners. (2021). p.94 https://assets.publishing.service.gov.uk/media/612e1535e90e07054107585f/ECDIS_Application_and_Usability.pdf

7. Porathe, T. (2016). Human-centred design in the maritime domain. Design Society. DS 85-1: Proceedings of NordDesign, Volume 1, Trondheim, Norway, 10th - 12th August 2016, p.175-184. <https://www.designsociety.org/download-publication/39295/Human-Centred+Design+in+the+Maritime+Domain>

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-НАВІГАЦІЇ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ECDIS

Петровський А.В., Литовченко В.І., Юдченко О.О.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Сучасний розвиток морського транспорту супроводжується активною цифровізацією навігаційних процесів, що сприяє підвищенню безпеки мореплавства. Ключовим елементом сучасної навігаційної інфраструктури є ECDIS, який забезпечує інтеграцію електронних навігаційних карт та навігаційних даних у єдиному середовищі [1]. Незважаючи на значні переваги, традиційний ECDIS базується на двовимірному представленні інформації, що обмежує можливості адекватного сприйняття складних просторових ситуацій [2]. Це особливо критично у районах з інтенсивним судноплавством, вузькими фарватерами та складною батиметрією.

Аналіз досліджень. У наукових дослідженнях останніх років активно розвиваються технології тривимірної (3D) навігації, які дозволяють відображати просторову структуру навігаційного середовища більш реалістично [3]. Використання 3D-моделей сприяє підвищенню ситуаційної обізнаності (situational awareness) та зменшенню кількості помилок оператора [4]. Крім того, інтеграція різномірних джерел даних, зокрема батиметрії, AIS та метеорологічної інформації, створює передумови для формування комплексних навігаційних систем нового покоління [5]. Разом із тим впровадження 3D-технологій супроводжується рядом технічних і нормативних проблем, включаючи обмеження обчислювальних ресурсів, відсутність стандартів та необхідність сертифікації [6]. Важливу роль відіграє відповідність вимогам ІМО та ІНО, які регламентують використання електронних навігаційних систем [7].

Метою даної роботи є проведення порівняльного аналізу сучасних підходів до реалізації 3D-навігації та оцінка їх ефективності і перспектив інтеграції в існуючі системи.

Основна частина. На цей час існує декілька підходів до 3D моделювання на навігаційному містку.

1. GIS-орієнтовані 3D ECDIS системи. Одним із найбільш перспективних напрямів є створення 3D ECDIS на основі геоінформаційних систем. Такий підхід передбачає інтеграцію електронних навігаційних карт з цифровими моделями морського дна, що дозволяє створити об'ємне представлення навігаційного середовища [2]. Дослідження показують, що використання 3D-моделей значно покращує розуміння батиметричних особливостей та дозволяє більш точно оцінювати ризики навігації [2,8]. Крім того, застосування GIS-технологій забезпечує інтеграцію різномірних джерел даних, що підвищує інформативність системи [9]. Разом із тим реалізація таких систем пов'язана з рядом проблем, включаючи необхідність обробки великих обсягів даних та відсутність уніфікованих стандартів [6]. Це обмежує їх практичне застосування у комерційному судноплавстві.

2. 3D-візуалізація у тренажерах та GIS. Другий напрям розвитку пов'язаний із використанням 3D-візуалізації у тренажерах та аналітичних системах. Такі рішення широко застосовуються для підготовки судоводіїв і моделювання складних навігаційних ситуацій [3,10]. У рамках цього підходу створюється комплексне віртуальне середовище (наприклад, Navi Trainer 5000 від Transas/Wartsila), що включає:

- гідрографічні дані;
- берегову інфраструктуру;
- рух суден з можливістю втручання в елементи керування судном та зміни даних його навігаційних приладів;
- метеорологічні фактори.

Дослідження показують, що такі системи значно покращують процес навчання та

дозволяють відпрацьовувати складні сценарії [11,12]. Однак їх використання у реальних умовах обмежується високим рівнем інформаційного навантаження та складністю інтерфейсу [3].

3. AIS-орієнтовані 3D системи. Сучасні дослідження також активно використовують дані AIS для побудови тривимірних моделей руху суден. Це дозволяє створювати динамічні сцени судноплавства в реальному часі [5]. Згідно з дослідженнями, такі системи дозволяють:

- візуалізувати траєкторії суден;
- оцінювати ризик зіткнення;
- прогнозувати розвиток ситуації [13, 14].

Основною перевагою є використання вже існуючих даних, що спрощує інтеграцію. Водночас точність таких систем залежить від якості AIS-сигналу [13] і ступеню довіри до показників GPS у конкретній акваторії (у деяких акваторіях зі звітів МАІВ визначено використання спуффінг-пристроїв).

4. Людино-орієнтовані 3D інтерфейси. Окремий напрям досліджень, зосереджений на взаємодії людини з 3D-навігаційними системами. Використання методів eye-tracking дозволяє оцінити ефективність різних інтерфейсів [3]. Результати досліджень показують, що 3D-візуалізація може як покращувати, так і ускладнювати процес прийняття рішень [4,15]. Основним завданням є оптимізація подання інформації для зменшення когнітивного навантаження.

З точки зору стандартизації та можливостями використання, розвиток 3D-навігації значною мірою обмежується вимогами міжнародних стандартів ІМО та ІНО [7,16].

Зокрема:

- стандарт S-52 визначає відображення ENC;
- стандарт S-100 відкриває можливості для 3D-даних.

Однак повноцінна інтеграція 3D ще не реалізована у нормативній базі [16].

Таблиця 1 — Порівняння існуючих технологій 3D на навігаційному містку.

Критерій	GIS 3D ECDIS (прототипи)	3D GIS/симулятори Kongsberg K-Sim Navigation, Transas / Wärtsilä simulators, Marine simulation platforms (VR/3D environments)	AIS 3D Marine Traffic (3D visualization mode), VesselFinder (аналітика руху суден)	Human-centered Furuno ENVISION AR	Класичний ECDIS 32 виробника
1	2	3	4	5	6
Реалізм	Високий	Високий	Середній	Високий	Низький
Дані	ENC + батиметрія	Багато джерел	AIS	поведінкові	ENC
Навантаження	Високе	Високе	Середнє	Середнє	Низьке

Готовність	Низька	Середня	Висока	Низька	Висока
Безпека	Висока	Середня	Висока	Потенційно висока	Висока

Слід зазначити, що критерій безпеки використаний саме в контексті керування судном, а не кібербезпеки (не досліджувався вплив спуфінгу на GPS).

Висновки. В результаті аналізу встановлено, що 3D-навігація є перспективним напрямом розвитку навігаційних систем. Вона дозволяє значно підвищити рівень ситуаційної обізнаності та зменшити ризики судноплавства [4]. Найбільш ефективними є інтегровані підходи, що поєднують GIS, AIS та людино-орієнтовані технології [3,5].

Водночас жоден із підходів не може повністю замінити традиційний ECDIS, який залишається базовим стандартом [1]. Основними обмеженнями залишаються: відсутність стандартів, технічна складність та нормативні вимоги [6,16].

У перспективі очікується розвиток гібридних систем, що поєднують 2D та 3D підходи, а також інтеграція технологій доповненої реальності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Weintrit, A., & Neumann, T. (2018). ECDIS: Navigational safety and standardization issues. *The Journal of Navigation*, 71(5), 1235–1250. <https://doi.org/10.1016/j.jnav.2018.05.001>
2. Liu, T., Zhao, D., & Pan, M. (2016). An approach to 3D model fusion in GIS systems and its application in a future ECDIS. *Computers & Geosciences*, 89, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.01.008>
3. Liu, J., et al. (2025). Methodology for conceptual navigational 3D chart assessment based on eye-tracking measures. *Applied Sciences*, 15(9), 4967. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/9/4967>
4. Grech, M. R., Horberry, T., & Koester, T. (2019). Human factors in the maritime domain. *Applied Ergonomics*, 80, 102884. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2019.102884>
5. Zhang, T., et al. (2022). Vessel trajectory reconstruction and maritime traffic analysis using AIS data. *Sustainability*, 14(19), 12572. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/19/12572>
6. Zhou, X., Zhang, D., & Wang, F. (2020). A review of marine navigation and intelligent ship systems. *Ocean Engineering*, 209, 107194. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107194>
7. IMO (2023). E-Navigation Strategy Implementation Plan. <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/Electronic-Navigation.aspx>
8. Zhang, K., et al. (2017). Integration of GNSS and GIS for marine navigation systems. *GPS Solutions*, 21(4), 1501–1513. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0632-0>
9. Goodchild, M. F., & Li, L. (2019). GIS-based spatial analysis and applications. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(5), 889–910. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1599123>
10. Zhang, Y., et al. (2017). Marine environmental data visualization and analysis techniques. *Journal of Marine Systems*, 173, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.05.005>
11. Wang, X., et al. (2018). Simulation-based training systems for maritime navigation. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 84, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.02.001>
12. Filipowicz, W. (2018). Marine navigation simulators and training systems. In *Advances in Transport Systems* (pp. 123–145). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-90454-2>
13. Tu, E., Zhang, G., Rachmawati, L., Rajabally, E., & Huang, G. B. (2016). Exploiting AIS data for intelligent maritime navigation: A comprehensive survey. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/1606.00981>
14. Xiao, F., et al. (2019). Ship trajectory prediction based on AIS data. *Ocean*

Engineering, 182, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106684>

15. Wickens, C. D., et al. (2018). Engineering psychology and human performance in navigation systems. *Human Factors*, 60(5), 682–700. <https://doi.org/10.1177/0018720818777015>

16. IHO (2020). S-100 Universal Hydrographic Data Model. <https://iho.int/en/s-100-universal-hydrographic-data-model>

ОПТИМІЗАЦІЯ НАВІГАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ ПРИ ФОРМУВАННІ ЛІНІЙ LDL ПОПЕРЕДНЬОЇ ПРОКЛАДКИ

Петровський А.В., Шаповал А.Е.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. При здійсненні попередньої прокладки дуже часто як точкові об'єкти (Obstruction, шар – OBSTRN; Rock, шар — UWTRC; Wreck, шар — WRECKS; Sounding, шар — SOUNDG [1]), так і підводні лінійні (ізобати) знаходяться у зонах CATZOC різного ступеню довіри. Стандарти ІНО передбачають використання похибок лише до точкових об'єктів (рис.1), але у [1,2] йде мова також і про надання категорії ZOC рівня C всім без виключення даним, отриманих методами супутникових досліджень:

«As a general guideline, the following choices are made by the Hydrographic Office:

- Data from ports are generally assigned ZOC A1, A2 or B.
- Satellite data are assigned ZOC C.
- Laser data by plane are assigned ZOC B, sometimes A2.
- Private ship-owner data are assigned ZOC D.
- Data before 1980 are assigned ZOC B, C or D. In general, the older the data, the lower the value» [1, с.21].



Рисунок 1 — Використання LDL для точкових небезпек

Якщо збільшувати карту ENC до відповідного масштабу, можна побачити, що кожна крива ізобата є лише не закритим/закритим полігоном, тобто це окремі точки, з'єднані між собою 2D-сплайнами. Відкриваючи карту стороннім програмним забезпеченням (наприклад, через QGIS) можна впевнитись, що відповідний шар ізобат має ID номери ізобат, і кожна з них складається з множини координат окремих точок.

Звідки логічним є висновок про необхідність аналогічного опрацювання і ізобат, якщо вони мають категорії ZOC гірше за B. Тоді виникає питання: якщо програмно ізобата складена із точкових об'єктів, які отримані супутниковими дослідженнями, чи не потрібно у такому разі теж робити відповідні LDL? – Більшість штурманів при опрацюванні карт на всякий випадок так і роблять, хоча напряду стандарти [1, 2] про це не кажуть.

Основна частина. Стандартним способом окреслення таких точкових небезпек, що підлягають опрацюванню це — коло, для ізобат можна використовувати звичайні відрізки. Звісно, що для кожного об'єкту потрібно встановлювати статус Depth/Danger із підписом розрахованої глибини з урахуванням поправки CATZOC. Однак, у обмежених навігаційних просторах при стандартному окресленні ізобати у деяких випадках, на гострих кутах перетину ліній LDL, може втрачатися забагато простору (рис. 2):

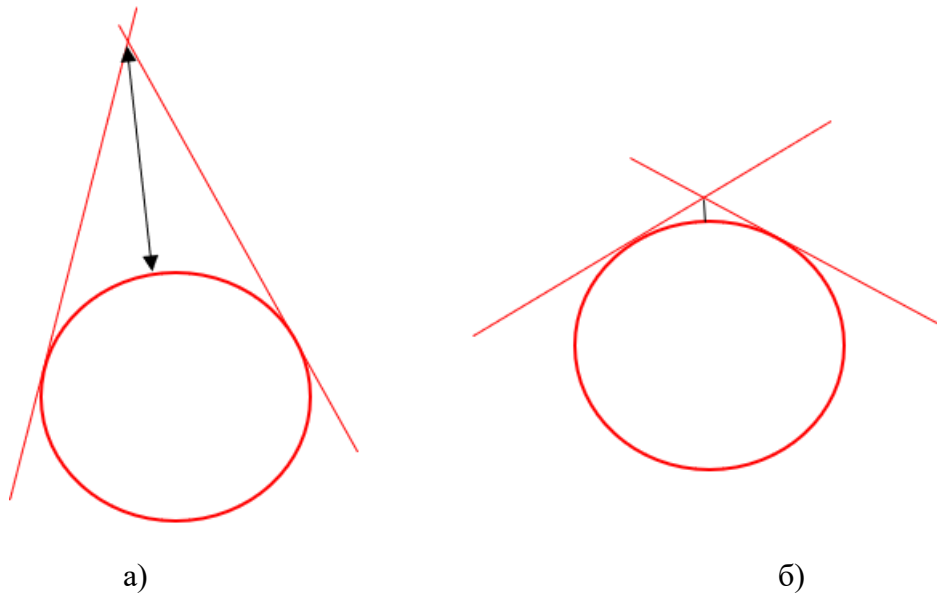


Рисунок 2 — Варіанти невідного з'єднання LDL (коло — частина дуги пропонованого способу)

Пропонується зробити розподіл типу окреслень ізобати на кола і лінії (рис. 3):

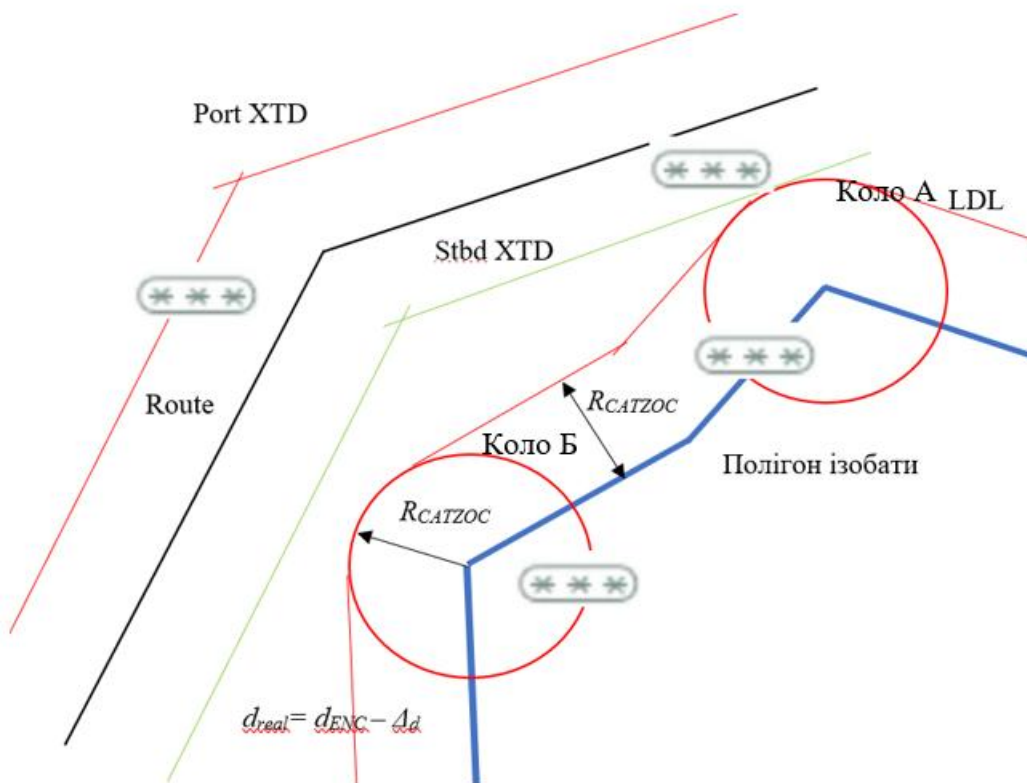


Рисунок 3 — Запропонований спосіб окреслення ізобат категорії гірше за В

Небезпечна ізобата (Safety Contour, рис.2) пролягає осторонь, як маршруту так і його XTD (Cross Track Distance) правого борту, однак такі LDL все одно потрібно нанести, оскільки CATZOC — С, що визначає похибку у місцеположенні до 500 м. Оскільки на карті ізобата теж знаходяться в такій частині акваторії, то її полігон теж має таку ж похибку, і така ізобата повинна бути окреслена LDL відповідного значення (500 м) можливого зміщення в сторону маршруту переходу з розрахованою глибиною (від точкової глибини карти d_{ENC} відняти величину поправки Δd).

У такий спосіб окреслення LDL буде зменшувати кількість дій, наприклад, можна взагалі не змішувати XTD у випадку розташування «кола А» (рис.3) без ризику втрати навігаційної безпеки, у той час як при стандартному окресленні перетин LDL змушує зменшувати дистанцію XTD з правого борту судна.

Слід зазначити, що такий спосіб підвищує навантаженість на штурмана при побудові попередньої прокладки. Рекомендаціями є: наявність орієнтовно гострих кутів перетинань LDL і обмеженість навігаційного простору.

Висновки. При проведенні досліджень показані невідповідності одного з основних документів ІНО [1], інформація якого використовується при попередній прокладці. Зроблено висновок про необхідність врахування похибок для ізобат відповідно до категорій ZOC C, D, U. Надані рекомендації із застосування запропонованого способу окреслення та планується у подальшому реалізувати додатковим програмним модулем з метою автоматизації процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mariners' Guide to Accuracy of Depth Information in Electronic Navigational Charts (ENC), Edition 1.0.0 – September 2020, International Hydrographic Organization, 2020, P.28 https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/S-67/S-67%20Ed%201.0.0%20Mariners%20Guide%20to%20Accuracy%20of%20Depth%20Information%20in%20an%20ENC_EN.pdf
2. Guidelines And Recommendations For Hydrographic Offices For The Allocation Of Catzoc/Qobd Values From Survey Data, Edition 1.1.0 – March 2025, International Hydrographic Organization, 2025, P.32 https://iho.int/uploads/user/pubs/standards/S-68/S-68_Guidelines_for_Allocation_of_CATZOC_Ed_1.1.0.pdf
3. Burenkov O., Pipchenko O., Aleksishin A., Піпченко О., Практичні особливості розрахунку параметрів безпечної глибини при використанні ЕКНІС. Shipping & Navigation, НУ «ОМА», ISSN 2306-5761 | 2618-0073, 2020, с.16-26 https://navjournal-nuoma.learnmarine.com/wp-content/uploads/2020/12/30-2020_O.-Burenkov-O.-Pipchenko-A.-Aleksishin-Practical-features-of-ecdis-safety-depth-calculation.pdf

МІЖКУЛЬТУРНА КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЯК ФАКТОР БЕЗПЕКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МОРСЬКИХ МІЖНАРОДНИХ ЕКІПАЖІВ

Сергєєв Т. С., Добровольська В. А.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Сучасне судноплавство є одним із найбільш полікультурних професійних середовищ у світі. На борту одного судна часто співпрацюють представники багатьох держав із відмінними мовними традиціями та моделями поведінки. У середовищі змішаних екіпажів міжкультурна компетентність трансформується із загальної навички у фундаментальний фактор забезпечення безпеки на морі. Як зазначає теоретик міжкультурної комунікації Едвард Т. Холл, комунікація між культурами – це не лише обмін словами, а й процес пізнання іншої системи мислення – і саме це пізнання на морі може коштувати людського життя [1, с. 56].

Актуальність дослідження обумовлена критичною необхідністю мінімізації ризиків, спричинених деструктивним впливом людського чинника у судноплавстві. Приблизно 80% інцидентів на морі пов'язані з людським фактором, значна частка якого має міжкультурну природу: неправильно зрозумілий наказ, ігнорування попередження через культурну ієрархію, різне розуміння критичності ситуації [2]. Теорія дослідника Мілтона Дж. Беннетта пояснює механізм цих збоїв: людина, яка не пройшла шлях від етноцентризму до етнорелятивізму, несвідомо оцінює дії колег через власну культурну призму — і помиляється [3]. Для майбутнього офіцера торговельного флоту це не академічна концепція, а практичний ризик, з яким він зіткнеться вже на першій вахті.

Постановка задачі. Метою даної роботи є аналіз впливу міжкультурних бар'єрів на безпеку та ефективність роботи міжнародних екіпажів, а також визначення практичних підходів до формування міжкультурної компетентності в системі підготовки морських фахівців на прикладі Херсонської державної морської академії.

Результати досліджень. Аналіз літератури та практичного досвіду морських фахівців дозволяє виділити три ключові типи міжкультурних бар'єрів, що безпосередньо впливають на безпеку роботи екіпажу.

Ієрархічний бар'єр є одним із найнебезпечніших. У культурах з високою дистанцією влади — зокрема філіппінській, індійській та індонезійській, представники яких складають значну частину світового флоту – підлеглий традиційно не схильний відкрито заперечувати старшому офіцеру навіть у критичній ситуації. Натомість у північноєвропейській та американській морській культурі відкрита комунікація між усіма членами екіпажу вважається нормою і елементом безпеки. Ця асиметрія очікувань призводить до того, що молодший офіцер помічає небезпеку, але мовчить — і саме таку модель поведінки зафіксовано в низці розслідувань морських інцидентів [4].

Комунікативний бар'єр виявляється у відмінностях стилів спілкування: у так званих висококонтекстних культурах (Японія, Китай, арабські країни) значна частина змісту передається невербально – через паузи, жести, погляд. Натомість низькоконтекстні культури (Німеччина, Нідерланди, скандинавські країни) орієнтовані на пряме й однозначне повідомлення. На містку судна, де команди мають бути чіткими і миттєво виконуватися, така різниця у кодуванні інформації створює реальний ризик. Дослідниця у галузі прикладної лінгвістики та міжкультурної комунікації Інгрід Піллер наголошує, що навіть спільна англійська мова не усуває цього бар'єру, оскільки культурний контекст вбудований у спосіб мислення, а не лише у словниковий запас [5, с. 74].

Часовий та процедурний бар'єр пов'язаний із різним ставленням до регламентів, дедлайнів і послідовності дій. Дослідження у сфері управління ресурсами екіпажу (Crew Resource Management / CRM) фіксують випадки, коли затримка у виконанні аварійної процедури була зумовлена не незнанням інструкції, а культурно обумовленою звичкою

уточнювати або узгоджувати – замість діяти негайно.

Для детальнішого аналізу відмінностей у способах передачі інформації та організації робочих процесів, нижче наведено порівняльну характеристику культур за типом контекстуальності (табл. 1).

Таблиця 1 — Порівняльна таблиця культурних моделей

Тип культури	Ієрархія	Стиль комунікації	Ставлення до регламентів
Висококонтекстна	Висока	Невербальна	Гнучке
Низькоконтекстна	Низька	Пряма	Строге

Подолання зазначених бар'єрів неможливе лише через теоретичне навчання. Ключову роль тут відіграють сучасні тренажерні технології: навігаційні симулятори дозволяють моделювати не лише технічні сценарії, а й комунікативні ситуації в умовах стресу та культурного різноманіття. Інтеграція міжкультурних модулів у програми CRM-тренінгів є практичним інструментом підготовки офіцера, здатного ефективно працювати в будь-якому міжнародному екіпажі.

Водночас міжкультурна компетентність впливає не лише на аварійні ситуації, а й на повсякденну ефективність екіпажу. Команди, члени яких розуміють культурні очікування одне одного щодо стилю керівництва, розподілу відповідальності та зворотного зв'язку, виконують планові операції швидше і з меншою кількістю помилок. Простіше кажучи: екіпаж, де офіцер знає, що філіппінський моряк очікує чіткої інструкції, а не відкритого обговорення, — працює більш злагоджено навіть у штатному режимі.

Апробація запропонованих підходів до формування міжкультурної компетентності здійснюється безпосередньо в освітньому процесі Херсонської державної морської академії у процесі викладання курсу «Міжкультурна комунікація» [6, с. 119–120]. Ключовою ланкою в системі практичної підготовки майбутніх офіцерів виступає Херсонський морський спеціалізований тренажерний центр (KMSTC). Висока якість надання освітніх послуг та їх відповідність світовим стандартам безпеки підтверджена сертифікацією системи управління якістю центру згідно з міжнародним стандартом ISO 9001:2015.

Особливого значення набуває інтеграція гуманітарного компонента підготовки в технологічне середовище. У 2025 році освітня база була суттєво модернізована шляхом активного впровадження VR-технологій та поглиблення співпраці з провідними галузевими партнерами, зокрема тренажерними центрами ТОВ «АНГЛО-ІСТЕРН Україна» та «Навчальний центр фахівців морського транспорту». Це дало змогу вийти за межі теоретичного навчання, спрямувавши його у площину сертифікаційної тренажерної підготовки, де відпрацювання навичок безпеки життєдіяльності та охорони судна відбувається в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації судна міжнародними екіпажами.

Інноваційним вектором дослідження є участь ХДМА у міжнародному проєкті SMarTAI (Sustainable Maritime Transport Artificial Intelligence) в межах програми Erasmus+ KA2 [7]. Дана ініціатива спрямована на трансформацію морської освіти шляхом інтеграції технологій штучного інтелекту та принципів сталого розвитку в освітню базу. У контексті нашого дослідження проєкт SMarTAI виступає платформою для розробки міждисциплінарних курсів, де традиційні методи підготовки поєднуються з новітніми інструментами AI для підвищення безпеки та екологічної стійкості судноплавства. Це дозволяє забезпечити відповідність підготовки курсантів сучасним викликам галузі та Цілям сталого розвитку ООН, формуючи фахівців, здатних ефективно працювати у цифровізованому та полікультурному морському середовищі.

Висновки. Проведене дослідження підтверджує, що міжкультурна компетентність у сучасному судноплавстві трансформується з додаткової соціальної навички у критичний фактор професійної надійності та безпеки. Ідентифіковані ієрархічні, комунікативні та

процедурні бар'єри є системними чинниками ризику, що потребують об'єктивізації та корекції ще на етапі підготовки до проходження плавальної практики.

Досвід Херсонської державної морської академії доводить, що найбільш ефективним механізмом подолання цих викликів є інтеграція змісту навчального курсу «Міжкультурна комунікація» та спеціалізованих модулів у тренажерне середовище з використанням VR-технологій та інструментів штучного інтелекту в межах проєкту SMarTAI. Такий міждисциплінарний підхід дозволяє перевести гуманітарну підготовку у площину практичних навичок, забезпечуючи відповідність майбутніх офіцерів стандартам безпеки та Цілям сталого розвитку ООН у глобалізованому морському секторі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hall E. T. *Beyond Culture*. New York : Anchor Books, 1976. 298 p.
2. International Maritime Organization. History of SOLAS fire protection requirements. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/history-of-fire-protection-requirements.aspx>
3. Bennett M. J. *Basic Concepts of Intercultural Communication: Paradigms, Principles, and Practices*. Yarmouth : Intercultural Press, 1998. 272 p.
4. This Is EMSA. URL: <https://www.emsa.europa.eu/about.html>
5. Piller I. *Intercultural Communication: A Critical Introduction*. Edinburgh : Edinburgh University Press, 2011. 208 p.
6. Добровольська В.А. Роль міжкультурної комунікації в підготовці фахівців морської галузі: Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції (з міжнародною участю) [Актуальні проблеми мовознавства та лінгвометодики в умовах війни в Україні], (Житомир, 21 лютого 2023 року). Житомир: Поліський національний університет, 2023. – С.118-122. URL: <https://surl.li/lxdttg>
7. SMarTAI / KMSTC. URL: <https://kmstc.org/smartai/>

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ ЧЛЕНІВ ЕКІПАЖУ НА МОРСЬКОМУ СУДНІ

Стовба Т.А.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Морський транспорт є фундаментом світової торгівлі — забезпечує понад 80% перевезень вантажів у світі [1], проте, не зважаючи на масштаби діяльності, залишається надзвичайно вразливим до чисельних зовнішніх викликів, які виникають в умовах турбулентності. Функціонування судноплавства супроводжується багатьма ризиками, серед яких необхідно виокремити морські інциденти.

Актуальність досліджень. Більшість інцидентів на морському транспорті є наслідком людських помилок — пожежі, вибухи, посадка на мілину, затоплення та перекидання, додаткові ризики, пов'язані із транспортуванням або пошкодженням через недотримання технології перевезення вантажів, крадіжки тощо.

Розподіл морських інцидентів за причинами такий: хибні дії вахтового персоналу — 32% від загальної кількості людських помилок; помилки моряків внаслідок втоми, стресів — 30%; неправильний вибір швидкості та використання радара — 15,5%; неправильне використання обладнання — 2,0%; проблеми внаслідок недотримання процедур — 2,0%; непорозуміння серед членів екіпажу через слабку підготовку — 1,0%; проблеми, викликані мультикультуралізмом суднової команди — 1,0% [2, с. 112].

За прогнозами у 2026 р. морська галузь відчуватиме нестачу майже 89 510 офіцерів [3, с. 84]. Розраховувати на те, що прийдуть молоді талановиті фахівці і ситуація швидко буде виправлена, не варто. Експерти свідчать, що морська кар'єра не приваблює зумерів через важкі умови праці — несприятливі погодні умови, працю впродовж тривалого часу у разі авралу, перебування у небезпечному середовищі з ризиком нещасних випадків, ізоляцію від рідних, близьких внаслідок обмеженого доступу до інтернету тощо. Необхідно зазначити, що наразі у світі поширюється тренд на стиль життя, котрий обирають глімери — нехронологічне покоління, яке свідомо обирає спокій, стабільність, комфорт, уникнення стресу, ментальне здоров'я, затишок та позитивні емоції замість гонитви за успіхом та продуктивністю. Цей тренд так само негативно впливатиме на зростання чисельності морських фахівців.

Постановка задачі. Відтак актуальним стає пошук підходів, які сприятимуть створенню антикрихкості судноплавних компаній у кризових ситуаціях, тобто дозволять зменшити кількість морських інцидентів через людські помилки та забезпечити швидке відновлення суднової команди в умовах турбулентності та невизначеності. Одним із можливих шляхів раннього попередження розвитку аварійних ситуацій є осучаснення підготовки морських фахівців безпосередньо на морських судах.

Результати досліджень. Завдяки цифровізації судноплавні компанії мають можливість накопичувати унікальні нематеріальні ресурси – знання, досвід, формувати культуру безпеки, інноваційні механізми адаптації моряків до особливостей роботи на судні та ін.

Пропонуємо створити павербанк компетенцій судноплавних компаній, а саме електронних систем підготовки членів екіпажів (Learning Management Systems) — динамічного резерву знань і отримання сучасних та інноваційних навичок, які виникають внаслідок трансформацій у морській галузі, безпосередньо на борту.

Нові методи роботи, нові поправки до морських кодексів та конвенцій, сучасні процедури обробки суден, посилення екологічних норм, впровадження цифровізації у портах та ін. створюють додаткові виклики для членів суднового екіпажу. Відтак павербанк компетенцій дозволить підтримувати операційну безперервність — у разі потреби, перебуваючи на борту судна кожний член екіпажу може звертатись безпосередньо до банку

відповідних відеоматеріалів, міжнародних норм, використовувати сучасні імерсійні технології, спільно обговорювати кейси морських інцидентів з метою запобігання подібних ситуацій (що водночас сприятиме тимбілдіngu), швидко робити заміну членів екіпажу та ін.

Проте необхідно пам'ятати про розумне заряджання, зумовлене потребою балансування між накопиченням і використанням ресурсів, оскільки, як відомо, у разі, коли система перевантажена запасами, вона стає неефективною, якщо виснажена — вразливою, що вимагає впровадження антикризових процедур та регулярного моніторингу стану та напрямів інновацій морського транспорту.

Модульні програми підготовки морських фахівців сприятимуть забезпеченню постійного підзаряджання їх компетенцій. Доцільно створювати модулі знань задля обміну досвідом між поколіннями морських фахівців, банки кейсів або стислих освітніх капсул для швидкого оновлення або, у разі необхідності, опанування сучасними навичками. Необхідно впроваджувати програми безперервної освіти, наставництва та внутрішніх стажувань як форми накопичення «людського заряду», розробити внутрішні бази знань і кейс-бібліотеки, що акумулюватимуть досвід компанії й забезпечуватимуть спадковість управлінських рішень.

З метою зменшення стресів, запобігання вигорання, ПТСР, підтримки ментального здоров'я на робочому місці тощо можуть стати у пригоді кейси та відео з численними техніками подолання стресу. За даними дослідження Gallup в організаціях, де впровадили програми підтримки ментального здоров'я на 71% менша ймовірність вигоріти, майже на 63% скорочений ризик травм і нещасних випадків, кількість людських помилок знижується на 30% [4]. Також може стати у нагоді трансформація кризового досвіду морського фахівця за принципом кінцугі – перетворення вразливості на ресурс розвитку. Кінцугі (з яп. — золоте з'єднання) — давнє мистецтво реставрації кераміки, при якому розбиті частини склеюють лаком, змішаним із золотим порошком. Відтак, замість приховування дефектів, кінцугі підкреслює їх, перетворюючи розбиту річ на унікальний витвір. Кінцугі вчить спільноту тому, що поломка — це не кінець, а початок нового етапу життя людини, яке стає ще ціннішим завдяки прийняттю власного досвіду та травм як частини особистої мудрості, сили та розвитку. Зокрема, для моряків на судні важливо не приховувати власні помилки, втому або психологічні труднощі, а усвідомлювати їх, обговорювати в команді та використовувати як джерело досвіду. Пережиті труднощі, аварійні ситуації або особисті кризи не зменшують професійну цінність моряка, а, за умови їх рефлексії та підтримки з боку екіпажу, формують вищий рівень компетентності, стресостійкості та взаємної довіри. Таким чином, «тріщини» професійного досвіду стають основою для зміцнення безпеки, командної взаємодії та ефективності роботи на судні.

Цифровізація рішень, процедур і кейсів дозволить уникати повторення помилок і втрат знань при зміні керівництва або членів суднової команди. Необхідно зазначити, що в умовах цифровізації людський фактор відіграє важливу роль у сфері морської безпеки, оскільки він може бути або найслабшою ланкою, або за наявності певної підготовки стати першим захисним бар'єром у кібербезпеці. Існує критична потреба у підвищенні рівня обізнаності моряків стосовно реальних кіберризиків, що можливо досягти завдяки формуванню культури кібербезпеки, яка охоплює навчання з питань захисту цифрового простору від шахраїв та шкідливих програм, які постійно оновлюються та адаптуються до трансформацій довкілля [5, с. 31].

Задля забезпечення підвищення якості підготовки членів екіпажу у пригоді можуть стати імерсивні технології: віртуальної реальності (VR), яка створює штучне середовище подібне реальному, ізолюючи користувача від дійсності для відпрацювання необхідних навичок в умовах, наближених до реальної роботи, але без нанесення шкоди/збитків безпосередньо судну; доповненої реальності (AR), що дозволяє отримувати переваги, які виникають у разі застосування цифрових елементів, штучного інтелекту на морських суднах; змішаної реальності (MR) — поєднання VR та AR, яке передбачає взаємодію віртуальних та реальних об'єктів.

Реалізація системи вищезазначених пропозицій стосовно використання павербанку компетенцій сприятиме зменшенню неправильних дій вахтового персоналу, хибного використання обладнання, помилок при виборі швидкості судна, проблем через недотримання процедур, скороченню непорозумінь через слабку підготовку членів екіпажу та ін., що забезпечать підвищення якості підготовки суднової команди і, водночас, скорочення кількості морських інцидентів.

Висновки. Несвоєчасні / помилкові дії екіпажу судна можуть стати причиною морських інцидентів. Підвищення якості підготовки команди безпосередньо на морському судні сприятиме ранньому попередженню розвитку аварійних ситуацій.

Запропоновано створити «павербанки» компетенцій на борту морських суден, які міститимуть модулі знань для обміну досвідом між поколіннями фахівців, внутрішні бази знань і кейс-бібліотеки, що акумулюватимуть досвід судноплавних компаній та забезпечуватимуть спадковість управлінських рішень. Впровадження павербанків компетентностей у сферу морських перевезень є переходом від реактивної стійкості до проактивної антикрихкості судноплавних компаній.

Створення цілісної моделі управління компетентностями членів екіпажу, інвестування в людський капітал завдяки впровадженню тренажерів, кейс-бібліотек, модульних освітніх капсул тощо для осучаснення компетенцій суднової команди в умовах швидких технологічних змін є стратегічним резервом морської галузі.

Цифровізація рішень, процедур, кейсів дозволить забезпечити мінімізацію людських помилок, швидку заміну екіпажу, якісну адаптацію до опанування інноваційних технологій, формування культури безпеки, кібергігієни, гнучкості та адаптивності судноплавних компаній тощо. Осучаснення компетенцій працівників морської галузі — ключ до адаптивності й забезпечення антикрихкості та сталого розвитку морського транспорту в умовах невизначеності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Maritime and other transport. Data insights. unctad.org : веб-сайт. URL: <https://unctadstat.unctad.org/insights/theme/107> (дата звернення: 26.04.2026).
2. Гилка У. Л. Організаційно-управлінські можливості запобігання аваріям морського транспорту. Економіка та менеджмент. 2020. №1(479). С. 109–114. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2020.1\(479\).14](https://doi.org/10.15589/znp2020.1(479).14).
3. Акімов О. В. Основні глобальні проблеми судноплавної галузі в умовах сьогодення. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI – 2023) : матеріали III міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон, 22 листопада 2023 р. Херсон, 2023. С. 81-84. URL: https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2024/01/14.12.23_PSDMI-%D0%97%D0%91%D0%86%D0%A0%D0%9D%D0%98%D0%9A-2023-%D0%BE%D1%81%D1%82-1.pdf (дата звернення: 29.03.2026).
4. Harter J. Employee Wellbeing: What It Is, Why It Matters and How to Improve It. [gallup.com](https://www.gallup.com/workplace/404105/importance-of-employee-wellbeing.aspx) : веб-сайт. URL: <https://www.gallup.com/workplace/404105/importance-of-employee-wellbeing.aspx> (дата звернення: 20.04.2026).
5. Зайцева Т. В. Аналіз випадків кібератак у секторі морського транспорту. Проблеми сталого розвитку морської галузі (PSDMI – 2023) : матеріали III міжнар. наук.-практ. конф., м. Херсон, 22 листопада 2023 р. Херсон, 2023. С. 28-31. URL: https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2024/01/14.12.23_PSDMI-%D0%97%D0%91%D0%86%D0%A0%D0%9D%D0%98%D0%9A-2023-%D0%BE%D1%81%D1%82-1.pdf (дата звернення: 29.03.2026).

ВИБІР ЕФЕКТИВНОЇ СТРАТЕГІЇ КОМУНІКАЦІЇ В ІНТЕРНАЦІОНАЛЬНОМУ ЕКІПАЖІ НА БОРТУ СУДНА

*Топалов О. І., Добровольська В. А.
Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. У сучасному судноплаванні робота в інтернаціональних екіпажах, до складу яких входять представники різних культур, мовних груп і національних традицій, є звичайною практикою. Ефективна комунікація між членами такого екіпажу є ключовим чинником безпеки судноплавства, злагодженої роботи та запобігання конфліктним ситуаціям на борту. Відмінності у стилях спілкування, ціннісних орієнтаціях, сприйнятті ієрархії та прийнятті управлінських рішень можуть призводити до непорозумінь і зниження ефективності командної взаємодії. Тому особливої **актуальності** набуває питання вибору ефективної стратегії міжкультурної комунікації, яка сприятиме підвищенню рівня взаємодії та професійної ефективності інтернаціонального екіпажу.

Постановка задачі. Метою дослідження є виявлення та систематизація ефективних стратегій міжкультурної комунікації в інтернаціональних екіпажах морських суден. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- розглянути чинники культурного різноманіття, що впливають на комунікацію в інтернаціональному екіпажі;
- визначити основні стратегії міжкультурної комунікації та їх ключові інструменти;
- систематизувати результати застосування цих стратегій для підвищення безпеки судноплавства.

Результати досліджень. Сучасне судноплавання є однією з найбільш інтернаціоналізованих галузей світової економіки, де концепція змішаного екіпажу (mixed crew) стала стандартом, а не винятком. У такому середовищі стратегії міжкультурної комунікації перестають бути лише елементом soft skills і перетворюються на критичний компонент безпеки мореплавства [1, с. 49]. Міжкультурний бар'єр – це не лише мовна різниця, а й складна мережа психологічних, етичних та когнітивних фільтрів, через які проходить будь-яка інформація на борту судна [2, с. 368-370].

Щорічно через комунікативні бар'єри та непорозуміння в екіпажах зазнає аварії значна кількість суден: за 2018 рік – 46 суден, за 2024 рік – близько 24 [3]. Хоча статистика не завжди вказує на пряму причетність людського фактора до кожної аварії, саме він впливає на більшість подібних ситуацій – за даними ІМО, понад 80% інцидентів на морі [4].

Головною метою стратегій міжкультурної комунікації є нівелювання ризиків, пов'язаних із людським фактором. На нашу думку, можна виокремити п'ять основних стратегій (див. табл. 1) [1; 5; 6; 7; 8].

Таблиця 1 — Класифікація стратегій міжкультурної комунікації в інтернаціональному екіпажі

№	Стратегія	Ключові інструменти	Очікуваний результат
1.	Лінгвістична стандартизація	Морська англійська, Стандартні фрази ІМО для морського зв'язку, метод «закритого циклу»	Усунення мовної двозначності, підтвердження правильності розуміння наказів
2.	Управління дистанцією влади	Психологічна безпека, принцип «Challenge & Response»	Відкрита комунікація між рангами, зниження ризику замовчування помилок
3.	Мультиканальність та візуалізація	Чек-листи, графічні схеми, письмові інструкції, цифрові	Дублювання критичної інформації, зменшення

		системи моніторингу	похибок у стресових умовах
4.	Формування міжкультурного середовища	Облік релігійних аспектів та харчових особливостей, стратегія збереження обличчя, нейтралізація стереотипів	Зростання довіри, згуртованості та спільної професійної ідентичності екіпажу
5.	Розвиток культурного інтелекту	Тренінги з крос-культурної взаємодії, аналіз невербальної комунікації, STCW-компетенції	Активна адаптація поведінки, стійкість до кризових ситуацій, культурне різноманіття як ресурс

Першочерговою стратегією є лінгвістична стандартизація. Використання морської англійської мови та Стандартних фраз ІМО для морського зв'язку (SMCP) є обов'язковим [5], проте стратегічний підхід вимагає більшого – свідомого спрощення мовних конструкцій. Це включає відмову від ідіом, сленгу та складних граматичних форм, які можуть бути незрозумілими для колег, для яких англійська є другою або третьою мовою. Важливою частиною цієї стратегії є метод «закритого циклу» (closed-loop communication), де отримувач інформації зобов'язаний дослівно повторити розпорядження, а відправник — підтвердити правильність розуміння. Це виключає ситуацію, коли слово «yes» означає лише факт почутого звуку, а не згоду чи розуміння суті завдання, що часто зустрічається в азійських культурах.

Друга стратегія стосується розуміння культурного контексту та дистанції влади. У багатьох культурах, зокрема східних, існує висока повага до ієрархії, що може стати перешкодою для безпеки, якщо підлеглий боїться вказати офіцеру на помилку. Стратегія лідерства на судні має бути спрямована на створення атмосфери психологічної безпеки, де заохочується «Challenge and Response» — право кожного члена екіпажу поставити під сумнів дію, що загрожує судну, незалежно від рангу [6, с. 20, 81]. Водночас стратегія збереження обличчя вимагає від командного складу надавати критику приватно, щоб не підривати авторитет моряка перед колегами — це критично важливо для збереження робочої етики та професійної гідності.

Третя стратегія — використання мультиканальності та візуалізації. В умовах шуму, стресу або втоми усне повідомлення може бути спотворено. Стратегічно важливо дублювати критичну інформацію через візуальні канали: чек-листи, графічні схеми, письмові інструкції та цифрові системи моніторингу. Діджиталізація також дозволяє використовувати перекладацькі застосунки та мультимедійні навчальні матеріали для пояснення складних технічних процесів. При використанні внутрішніх мереж і месенджерів важливо підтримувати професійний етикет, що запобігає виникненню мікроконфліктів на побутовому ґрунті.

Четверта стратегія – формування міжкультурної компетентності через повсякденну взаємодію. Це включає облік релігійних аспектів та харчових особливостей екіпажу: знання графіку молитов, повага до релігійних свят і забезпечення різноманітного раціону (наприклад, халяль, вегетаріанство) є потужним інструментом побудови довіри [6, с. 54]. Стратегічне управління конфліктами на судні базується на нейтралізації стереотипів: екіпаж має сприйматися не як група представників різних національностей, а як єдина професійна одиниця, об'єднана спільною метою — безпечним завершенням рейсу.

Нарешті, п'ята стратегія — розвиток культурного інтелекту – дозволяє морякам не просто пасивно співіснувати, а активно адаптувати свою поведінку. Це передбачає вміння зчитувати невербальні сигнали, розуміти паузи у розмові та особливості мови тіла, які в різних культурах можуть мати діаметрально протилежні значення [7, с. 156-157; 8, с. 16]. Таким чином, комплексна стратегія міжкультурної комунікації перетворює судно з потенційного місця конфліктів на злагоджений механізм, де культурне різноманіття стає джерелом додаткового досвіду та стійкості до кризових ситуацій. Вимоги STCW

визначають розвиток культурного інтелекту як обов'язкову складову підготовки морських фахівців [1].

Висновки. Таким чином, міжкультурна взаємодія на борту судна є не другорядним соціальним аспектом, а одним із ключових чинників забезпечення безпеки мореплавства та стабільної роботи суднової команди. В умовах глобалізації морської галузі саме якість комунікації визначає рівень узгодженості дій, швидкість прийняття рішень та здатність екіпажу ефективно реагувати на аварійні ситуації.

Комунікативні бар'єри в інтернаціональних екіпажах мають комплексний характер і охоплюють не лише мовні труднощі, а й культурні відмінності у сприйнятті ієрархії, стилях керівництва, невербальній комунікації та професійних нормах. Ці чинники значною мірою формують «людський фактор», який залишається головною причиною інцидентів і аварій у судноплавстві.

Ефективна стратегія комунікації в інтернаціональному екіпажі повинна мати системний характер і поєднувати лінгвістичну стандартизацію, культурну обізнаність, психологічну безпеку та мультиканальні засоби передачі інформації. Використання морської англійської та SMCP, методу «закритого циклу», лідерства, орієнтованого на відкритий діалог, а також візуалізації інформації значно знижують ризик непорозумінь у критичних ситуаціях. Особливу роль відіграє розвиток культурного інтелекту, що дозволяє перетворити культурне різноманіття на ресурс підвищення ефективності командної роботи. В умовах подальшої діджиталізації судноплавства роль комунікативних і міжкультурних навичок лише посилюватиметься, а їх розвиток має розглядатися як невід'ємна складова професійної підготовки моряків. Саме тому курс «Міжкультурна комунікація» є складовою частиною освітнього процесу Херсонської державної морської академії. Підготовка фахівця, здатного працювати в мультикультурному середовищі, є запорукою підвищення рівня безпеки, надійності та сталого розвитку судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. STCW: A GUIDE FOR SEAFARERS. Taking into account the 2010 Manila amendments. URL: https://www.itfglobal.org/sites/default/files/resources-files/STCW_guide_english.pdf?utm_source=chatgpt.com
2. Добровольська В. А., Серeda С. Є. Міжкультурні бар'єри у вербальній комунікації суднового екіпажу: матеріали II Міжнародної наукової конференції [«Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики»], (м. Кривий Ріг, 10 січня 2024 р.). – Вінниця : ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2024. – С. 368–371.
3. Geopolitical Tensions Lead to Increasing Risks for Shipping Sector Globally. URL: <https://www.businesswire.com/news/home/20250527530556/en/Geopolitical-Tensions-Lead-to-Increasing-Risks-for-Shipping-Sector-Globally>
4. International Maritime Organization. History of SOLAS fire protection requirements. URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/history-of-fire-protection-requirements.aspx>
5. IMO Standard Marine Communication Phrases (SMCP). URL: <https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/standardmarinecommunicationphrases.aspx>
6. The Human Element: a guide to human behaviour in the shipping industry. Maritime and Coastguard Agency (MCA). URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a7c0baeed915d41476226b1/the_human_element_a_guide_to_human_behaviour_in_the_shipping_industry.pdf
7. Lewis R. D. When Cultures Collide: Leading Across Cultures. 4th Edition. – Nicholas Brealey Publishing, 2018. URL: <https://www.mediaculture.fr/wp-content/uploads/2018/10/When-Cultures-Collide.pdf>
8. Таран Г. П., Добровольська В. А., Кондратюк-Антонова Т. В. Інтеркультурна комунікація та конструктивний діалог: шляхи побудови гармонійних відносин у світі різноманітності. Науково-теоретичний альманах Грані. 2024. № 27(3). С. 14–18.

МОТИВАЦІЯ ЕКІПАЖУ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОРСЬКОГО СУДНА

Шпак В.В., Стовба Т.А.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Сучасне судноплавство характеризується високим рівнем автоматизації та жорсткими міжнародними вимогами щодо безпеки. Водночас, за оцінками International Maritime Organization (IMO), 73% морських інцидентів пов'язані з людськими помилками щодо ухвалення рішень стосовно управління судном [1].

Робота на морських суднах пов'язана з тривалим перебуванням у замкненому просторі, поєднанням робочого та житлового середовища, штормовими умовами, качкою, шумом, вібрацією, температурними коливаннями, монотонністю праці, цілодобовим режимом роботи, небезпекою піратства, аварій, кримінальної відповідальності у випадку екологічних інцидентів, інспекціями в портах, змінами складу екіпажу, високим рівнем відповідальності, необхідністю оперативного реагування на непередбачувані ситуації тощо. Додатковими чинниками психологічного навантаження є тривала розлука з родиною, обмежені можливості дозвілля та невизначеність щодо зайнятості й оплати праці, що може негативно впливати на ефективність роботи екіпажу і безпеку експлуатації судна [2, с. 988].

Вище зазначені умови обумовлюють необхідність переходу від традиційного адміністративного управління до мотиваційно-орієнтованих моделей управління екіпажем. Оскільки, попри наявність компетенцій та кваліфікації щодо виконання обов'язків, морякам необхідна мотивація, щоб досягати більшої досконалості, усвідомлювати корпоративну культуру та її цінності, демонструвати комітмент та лояльність до судноплавної компанії.

Актуальність досліджень. Конвенція про працю в морському судноплавстві (MLC) 2006 р. встановлює глобальні норми захисту прав моряків – умов праці, тривалості робочого часу, відпочинку, медичного забезпечення та соціальних гарантій. Конвенція має переважно регуляторний характер і спрямована на забезпечення мінімальних стандартів, а не на формування високого рівня мотивації моряків [3]. MLC не враховує психологічні аспекти роботи моряків, особливості міжкультурної комунікації у багатонаціональних екіпажах, індивідуальні потреби членів екіпажу. Вона не регламентує механізми оцінювання ефективності роботи членів екіпажу, вибір системи преміювання та розвитку моряків, які є ключовими елементами сучасного управління людськими ресурсами [4].

Відтак морська галузь потребує комплексного підходу до управління екіпажем, який передбачає впровадження ефективних систем мотивації, психологічної підтримки, удосконалення оцінювання результатів роботи суднової команди, створення корпоративної культури безпеки. Культура безпеки передбачає усвідомлене ставлення екіпажу до ризиків, що передбачає заохочення членів команди повідомляти про небезпечні ситуації (near-miss reporting), проведення регулярних навчань (drills), відсутність покарання за ненавмисні помилки. Поєднання нормативного регулювання та сучасних управлінських інструментів сприятимуть забезпеченню високого рівня мотивації екіпажу та ефективності функціонування суден. У разі низької мотивації працівників виникають так звані «приховані витрати», тобто збільшення кількості аварій, затримок, пошкоджень вантажу, страхових витрат, втрату репутації судноплавних компаній на ринку морських перевезень тощо. Таким чином, мотивація екіпажу має не лише соціальні, але й економічні наслідки.

Мотивація є ключовим фактором, який визначає поведінку та рівень продуктивності праці моряків. Вона проявляється у прагненні якісно виконувати роботу, взаємодіяти з членами суднової команди, брати на себе відповідальність, швидко адаптуватися до змін. Натомість відсутність мотивації призводить до зниження продуктивності праці, апатії, погіршення взаємовідносин в екіпажі, збільшення ймовірності морських інцидентів.

Постановка задачі. Метою дослідження є розроблення системи мотивації членів

екіпажу на основі узагальнення найкращої практики стимулювання праці та її адаптації до специфіки функціонування морського транспорту, високого рівня професійних ризиків і сучасних викликів розвитку морської галузі.

Результати досліджень. Мотивація моряків формується під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів. До зовнішніх факторів належать: конкурентний рівень оплати праці та бонусів, можливості професійного розвитку й набуття нових компетентностей задля особистісної самореалізації та кар'єрного зростання, сприятлива соціально-психологічна атмосфера в команді. Водночас важливого значення набувають внутрішні мотиватори, пов'язані із професійною ідентичністю, почуттям відповідальності, визнанням професійних досягнень, рівнем автономії в ухваленні рішень та усвідомленням значущості власної праці для забезпечення безпеки морського судна [5]. Ефективне управління екіпажем має враховувати обидва типи мотивації, оскільки їх поєднання забезпечує найкращі результати.

Матеріальна мотивація на судні має певні особливості. Рівень оплати праці може суттєво відрізнятися залежно від національності моряка, що створює додаткові виклики в управлінні екіпажем. Хоча деякі компанії впроваджують системи оплати праці, пов'язані лише з результатами роботи, проте така практика ще не є поширеною. Водночас очевидно, що пряма залежність між результатами праці та винагородою може значно підвищити мотивацію екіпажу. Рівень оплати праці залишається головним стимулом залучення та утримання моряків на флоті. Дослідження показують, що більшість моряків залишаються працювати в морі саме через вищий рівень оплати праці порівняно з роботою на березі. При цьому зв'язок між оплатою праці та результатами роботи підсилює мотивацію та підвищує продуктивність праці моряків.

У сучасному судноплаванні мотивація екіпажу не обмежується лише матеріальними стимулами. Негрошова мотивація та психологічне благополуччя можуть суттєво підвищити задоволеність роботою морського фахівця. Умови життя на борту, наявність інтернету, можливість спілкування з родиною, доступ до медичної допомоги істотно впливають на психологічний стан моряків та здатні забезпечити відчуття радості, розради та задоволення. Визнання заслуг і повага з боку керівництва (навіть проста похвала) може значно підвищити рівень мотивації та задоволеності роботою. До практичних інструментів визнання керівництвом заслуг фахівця відносять систему заохочень, публічного визнання, підтримка професійного розвитку.

Важливим аспектом, що сприяє психічному благополуччю моряків і мотивації на борту, є існування зони рекреації, де можна відволіктись від монотонної рутини та зняти стрес. Важливим фактором, який також може вплинути як на фізичне, так і на психічне самопочуття є тренажерний зал на борту судна, бо фізична активність здатна змусити моряка відчувати себе менш тривожним і щасливим [6].

Мотивований екіпаж припускається менше помилок, котрі знижують ймовірність аварій і простоїв, що дозволяє скоротити витрати на ремонт обладнання після аварій, страхові платежі, компенсації за пошкодження вантажу, витрати, пов'язані із простоями судна, що сприяє підвищенню прибутковості судноплавної компанії. Разом з тим, високий рівень мотивації сприяє утриманню судноплавними компаніями кваліфікованих фахівців, який дозволяє формувати стабільний склад команд, що покращує взаємодію між членами екіпажу, зменшує час адаптації нових працівників і підвищує загальну ефективність роботи судна [5].

Задля підвищення мотивації екіпажу судноплавні компанії можуть застосовувати впровадження системи бонусів за безаварійну роботу та економію пального, розробку чітких кар'єрних траєкторій із можливістю підвищення кваліфікації та отримання нових сертифікатів, надання соціальних гарантій (страхування, оплачувані відпустки, компенсація медичних витрат), покращення умов проживання на борту (доступ до інтернету, модернізація кают, якісне харчування), а також оптимізацію графіків роботи/відпочинку шляхом скорочення тривалості контрактів, забезпечення достатнього часу для відновлення між рейсами.

Показники для встановлення системи бонусів можуть диференціюватись за типами суден. Так, для танкерів має бути зроблений акцент на безпеці вантажних операцій, суворому дотриманні процедур, тому важливі відсутність розливів, дотримання процедур inert gas system. Для контейнеровозів важливий акцент на швидкості та точності портових операцій, відтак доцільно при визначенні розміру бонусних виплат враховувати час обробки судна в порту, відсутність пошкоджень контейнерів. Для балкерів важливе управління ризиками під час навантаження/розвантаження, цьому сприятимуть оцінка правильності вантажної обробки судна, відсутність зміщення вантажу.

Важливу роль відіграє створення справедливої системи винагороди та визнання досягнень моряків. Зокрема, у контракті моряка доцільно чітко зазначати базову заробітну плату, розміри надбавок (за овертайм, роботу в складних або небезпечних умовах), систему бонусів (за безаварійну експлуатацію судна, економію пального, успішне проходження інспекцій, скорочення простоїв судна), дотримання своєчасності виплат і прозорість фінансових розрахунків, а також умови виплати премій після завершення контракту. Мотивація має враховувати особисті цілі працівника та його прагнення до досягнення успіху, влади або соціальної взаємодії. Зокрема, доречними можуть стати регулярне визнання (formal/informal), індивідуальний підхід до поколінь (зумерів, поколінь X, Y), підтримка кар'єрного розвитку. До успішних прикладів необхідно віднести відзначення best safety officer рейсу на танкерах, recognition за ефективну роботу в порту (важливо для контейнеровозів), заохочення за maintenance ініціативи доцільне на балкерах.

Особливу увагу слід приділити характеристикам роботи, які формують внутрішню мотивацію. До них належать можливість опанування різноманітними навичками, значущість виконуваних завдань, автономність, відповідальність та наявність зворотного зв'язку. Але доцільно вдумливо розширювати автономність моряків у межах їхніх професійних обов'язків, що сприятиме підвищенню відповідальності та залученості до виконання завдань. Саме ці фактори створюють у моряка відчуття важливості роботи та сприяють його підвищенню задоволеності працею. Водночас негативні умови – неефективне керівництво, високий рівень стресу або відсутність соціальної підтримки тощо суттєво демотивують [6].

Для усунення зазначених проблем доцільно впроваджувати сучасні підходи до управління екіпажем, зокрема підвищувати якість управлінських рішень через навчання командного складу навичкам ефективного лідерства та комунікації, запроваджувати регулярний зворотний зв'язок між керівництвом і членами екіпажу, а також створювати сприятливий психологічний клімат.

Лідерство прямо впливає на мотивацію та безпеку екіпажу: pre-cargo meeting із чітким розподілом ролей використовують на танкерах, bridge team briefing — перед заходом у порт контейнеровозів, координацію deck-engine — під час вантажних операцій на балкерах тощо.

Втома моряка прямо знижує концентрацію і підвищує ризик помилок. Важливим є зниження рівня стресу та втоми шляхом оптимізації графіків роботи та відпочинку, а також впровадження психологічної підтримки. Задля зниження рівня стресу та втоми доцільні такі заходи: обмеження понаднормових годин під час вивантаження на танкерах, посилений контроль вахт у портах з інтенсивним графіком важливий для контейнеровозів, додатковий відпочинок після шторму для балкерів та ін.

У морській галузі існує значний дефіцит кваліфікованих морських фахівців, що посилює конкуренцію між судноплавними компаніями за досвідчених працівників. Неправильний підбір членів судового екіпажу може призвести до значних економічних збитків, що підкреслює важливість мотивації та ефективного управління командою. З метою підвищення ефективності підбору моряків доцільно впроваджувати аналіз особистісних характеристик кандидатів. Зокрема, необхідно здійснювати перевірку достовірності досвіду роботи та сертифікатів, використовувати симуляційні тренажери для оцінки практичних навичок, а також проводити тестування soft skills, таких як здатність до

командної роботи, стресостійкість, комунікаційні навички. Врахування сумісності кандидатів у багатонаціональному екіпажі дозволить зменшити конфлікти та підвищити ефективність взаємодії на борту.

Особливого значення набуває баланс між роботою та особистим життям, який є практично відсутнім під час перебування моряків на судні. Тому важливо впроваджувати такі альтернативні заходи як скорочення тривалості контрактів, оплачувані відпустки, можливість комунікації із родиною, психологічна підтримка та ін., що сприяють підвищенню мотивації та зменшенню негативного впливу умов праці.

Висновки. Встановлено, що ефективна мотивація членів екіпажу є одним із ключових чинників забезпечення безпеки судноплавства, надійності експлуатації судна та підвищення результативності судноплавних компаній. Специфічні умови праці моряків — високий рівень технічної складності, професійної відповідальності, психоемоційного навантаження та ризиків для життя і здоров'я — обумовлюють необхідність формування комплексної та адаптивної системи мотивації, орієнтованої не лише на матеріальне стимулювання, а й на професійний розвиток, психологічну підтримку та покращення соціально-побутових умов на борту.

Обґрунтовано доцільність впровадження комплексу мотиваційних заходів, що включає прозору систему оплати праці, бонуси за безаварійну та ефективну роботу, удосконалення умов проживання екіпажу, розвиток системи професійного навчання і кар'єрного зростання, а також формування сприятливого психологічного клімату в судновій команді. Запропонований підхід відповідає рекомендаціям ІМО та сприяє підвищенню стійкості екіпажу до впливу зовнішніх і внутрішніх ризиків в умовах турбулентного середовища.

Таким чином, інвестиції судноплавних компаній у розвиток ефективної системи мотивації персоналу слід розглядати як стратегічний інструмент забезпечення сталого розвитку, підвищення конкурентоспроможності, зниження аварійності та зміцнення економічної ефективності морської галузі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Human element. imo.org : веб-сайт. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/HumanElement> (дата звернення 20.04.2026).
2. Стовба Т.А. Тімблдінг як технологія забезпечення ефективної експлуатації морського судна. Наукові перспективи. 2025. № 1(55). С. 987-997. DOI: [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-1\(55\)-986-996](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-1(55)-986-996).
3. Maritime Labour Convention, 2006, as amended. mtwtu.org.ua : веб-сайт. URL: https://storage.mtwtu.org.ua/source/1/-PtDvHgOsp_-RVQMV617Au9TmMlOddI3.pdf (дата звернення 20.04.2026).
4. Fotteler M.L., Andrioti Bygvraa D., Jensen O.C. The impact of the Maritime Labor Convention on seafarers' working and living conditions: an analysis of port state control statistics. BMC Public Health, 2020. № 20: 1586. <https://doi.org/10.1186/s12889-020-09682-6>.
5. Adamou A. The factors affecting the seafarers' motivation and recommendations for implementable ways to ensure their efficient motivation and welfare. cyma.ac.cy : веб-сайт. URL: <https://www.cyma.ac.cy/the-factors-affecting-the-seafarers-motivation-and-recommendations-for-implementable-ways-to-ensure-their-efficient-motivation-and-welfare/> (дата звернення 20.04.2026).
6. Mitroussi K., Notteboom T. Getting the work done: motivation needs and processes for seafarers and dock workers. WMU J Marit Affairs. 2015. №14, p. 247–265. <https://doi.org/10.1007/s13437-014-0064-y>.

СЕКЦІЯ:
КОНТРОЛЬ, ДІАГНОСТИКА Й ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ
ПРИ УПРАВЛІННІ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

SECTION:
CONTROL, DIAGNOSTICS AND DECISION-MAKING
IN MANAGING MOVING OBJECTS

КОМПЛЕКСНА ОПТИМІЗАЦІЯ ВАНТАЖНОГО ПЛАНУ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СКЛАДОВИХ

Бень А.П., Соколов А. В., Вороненко С.В.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

На поточний момент часу стрімкий розвиток інформаційних технологій сприяє ускладненню логістичних ланцюжків поставок товарів, що сприяє збільшенню частки мультипортових перевезень контейнерів у сучасному судноплаванні. Підвищення економічної ефективності виконання рейсу, в свою чергу, може бути досягнуто, перш за все, за рахунок скорочення витрат, пов'язаних із знаходженням судна в портах, зменшенням часу виконання та вартістю вантажних операцій, тощо. У випадку контейнерних перевезень це може бути здійснено шляхом зменшення кількості нераціональних переміщень (шифтіngu) контейнерів на судні під час виконання вантажних операцій [1].

Таким чином, наразі існують нагальні потреби врахування різних запитів практики при керуванні процесом формування вантажних планів контейнеровозів.

Постає проблема розробки гнучких оптимізаційних стратегій вибору пріоритетів у прийнятті рішень, які повинні враховувати при плануванні перевезень вантажів існуючі потреби судновласника. Одним з найбільш доцільних шляхів вирішення вищезазначеної проблеми є створення спеціалізованих СППР, особливо для планування мультипортових перевезень, що відрізняються складною структурою процесу планування та необхідністю внесення постійних змін до вже сформованого вантажного плану судна [2].

У випадку формування вантажного плану для рейсу судна, що відбувається між кількома портами, процес його побудови ускладнюється тим, що у проміжних портах можливе здійснення додаткових вантажних операцій, які потребують внесення змін до вже сформованого вантажного плану, і відповідно виникає потреба його корегування у кожному з проміжних портів.

Слід зазначити, що не завжди процес формування вантажного плану розпочинається з виконання вимог комплексу технологічних складових (хоча на практиці у більшості випадків відбувається саме так). Іноді домінантним фактором прийняття рішень для судновласника (або компанії - перевізника вантажів) виступають економічні показники виконання рейсу (максимізація прибутку за умов мінімізації витрат), і в такому разі процес формування вантажного плану контейнеровозу розпочинається з його експлуатаційної складової: визначаються логістичні ланцюжки перевезень, проводиться аналіз та оптимізація послідовності виконання вантажних робіт, розраховуються економічні показники прибутковості рейсу судна. І лише на другому етапі проробляється технологічний цикл, якій вже повинен забезпечити дотримання необхідних технологічних вимог виконання створеного логістичного ланцюжка перевезень. Також можливі випадки, в яких пріоритетним буде фактор часу поставок товарів, і в такому разі, головним чинником стане оптимізація здійснення вантажних операцій в портах, з метою мінімізації часу виконання рейсу.

Таким чином, наразі існують нагальні потреби врахування різних запитів практики при керуванні процесом формування вантажних планів контейнеровозів.

З урахуванням вищезазначеного, пропонується застосування гнучкого багатоетапного адаптивного підходу до формування вантажного плану судна-контейнеровозу з урахуванням технологічної та експлуатаційної складової побудови вантажного плану в умовах мультипортових перевезень, структуру якого представлено на рис. 1.



Рисунок 1 — Процес формування вантажного плану контейнеровозу з урахуванням технологічної та експлуатаційної складової [3]

Застосування вказаного підходу дозволяє врахувати гнучкі оптимізаційні стратегії вибору пріоритетів у прийнятті рішень, які відповідають існуючим потребам судовласника. Одним з найбільш доцільних шляхів вирішення вищезазначеної проблеми є створення спеціалізованих СППР з формування вантажного плану судна контейнеровозу.

Висновки. Застосовуючи принципи системного підходу до аналізу процесу формування вантажного плану контейнеровозу, було визначено множину ключових складових, що впливають на його побудову та оптимізацію. Визначено, що проблема формування оптимального вантажного плану полягає в розв’язанні множини складних взаємопов’язаних задач багатокритеріальної оптимізації. Практичне вирішення зазначеної проблеми знаходиться в площині пошуку субоптимальних рішень вказаних задач, що відповідають запитам практики.

Запропоновано використання гнучких стратегій вибору оптимізаційних процедур, що враховують пріоритети судовласника (або перевізника) до процесу формування вантажного плану судна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бень А. П., Федоров А. І. Формування вантажного плану контейнеровозу при здійсненні мультипортових перевезень. Судноводіння. 2019. №29. С. 10–19. DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.10-19.
2. Бень А. П., Соколов А. В., Соловей О. С. Система підтримки прийняття рішень з формування вантажного плану контейнеровозу. Матеріали V Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Навчально-наукового інституту морського флоту Одеського національного морського університету, МРР&О-2024. Одеса, 2024. С. 293–295. https://drive.google.com/file/d/19Uq4DCIUfKISGyp3zMyIEhMN2cDrHlNs/view?usp=drive_link.
3. Бень А. П., Соколов А. В. Система підтримки прийняття рішень з формування вантажних планів контейнеровозів. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2024. № 1 (28). С. 175–184. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.1.28.175-184>

КОМПЛЕКСНА АВТОМАТИЗАЦІЯ МОРСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА

Блінцов В.С., Данько Є.С.

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Сучасна морська робототехніка переходить від етапу використання поодиноких дослідницьких апаратів до створення комплексних транспортних систем. Використання важких (великих) автономних ненаселених підводних апаратів транспортного призначення (АНПА-Т) дає змогу вирішувати задачі логістики на шельфі, обслуговування підводних видобувних комплексів та незалежного від погодних умов транспортування вантажів морем. Проте ефективність таких систем критично залежить від рівня автоматизації не лише самого апарата, а й супутньої інфраструктури.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження обумовлена стрімким розвитком «Блакитної економіки» (Blue Economy) та необхідністю переходу до безлюдних технологій у морських перевезеннях. Актуальність комплексної автоматизації морських транспортних систем на базі АНПА-Т має дві складові — наукову і практичну.

Наукова актуальність роботи визначається трьома наступними чинниками:

- системний підхід до гетерогенних структур, оскільки традиційні дослідження часто зосереджені лише на самому АНПА-Т, однак необхідно враховувати взаємодію цілісної системи: «підводний апарат — береговий центр керування — система сухопутного транспортування — засоби спуску-підйому з води», що потребує розробки нових математичних моделей та алгоритмів керування;
- інтеграція методів штучного інтелекту, оскільки необхідним є створення інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у береговому центрі керування, які здатні оперувати «великими даними» (Big Data) від сенсорних модулів від усіх складових морської транспортної системи для ефективного керування місією та прогнозування аварійних ситуацій.

Практична цінність автоматизації таких об'єктів морської робототехніки визначається чотирма наступними чинниками:

- мінімізація людського фактору та безпека, оскільки автоматизація процесів спуску/підйому та докінгу АНПА-Т дозволяє проводити операції у складних метеорологічних умовах (шторм, обмежена видимість), де присутність людини на причалі або на палубі є ризикованою або неможливою;
- економічна ефективність морської логістики, оскільки використання АНПА-Т для транспортування вантажів або інших морських місій значно дешевше, ніж утримання повнорозмірних суден з екіпажем;
- екологічна стійкість, оскільки впровадження повністю автоматичних електричних АНПА-Т сприяє декарбонізації морського транспорту, що відповідає сучасним міжнародним вимогам (ІМО 2030/2050) щодо захисту довкілля;
- подвійне призначення, оскільки розробки у сфері важких транспортних підводних систем мають стратегічне значення для національної безпеки, зокрема для автоматизованого моніторингу критичної інфраструктури (трубопроводів, кабелів зв'язку) та виконання логістичних завдань у закритих акваторіях.

Постановка задачі. Об'єктом дослідження є процеси функціонування комплексної морської транспортної системи (МТС), що включає АНПА-Т, береговий центр керування (БЦК), систему спуску АНПА-Т на воду та його підйому з води (СПП) та наземний транспортний модуль (НТМ) як засіб наземної логістики АНПА-Т.

Метою роботи є розробка та наукове обґрунтування принципів побудови цілісної автоматизованої системи керування МТС, яка забезпечує інтелектуальну автономність

АНПА-Т, безперебійний моніторинг з боку БЦК та безпеку логістичних операцій (берегове транспортування), спуск АНПА-Т на воду та його підйом з води в умовах невизначеності морського середовища.

Предметом дослідження є методи, алгоритми та програмно-технічні засоби комплексної автоматизації взаємодії компонентів МТС для забезпечення автономного виконання морської транспортної місії.

Наукова новизна очікуваних результатів полягає у розробці методів наскрізної автоматизації, де інформація про стан апарата на сухопутному етапі (НТМ) інтегрується в стратегію планування підводної місії (БЦК), що забезпечує мінімізацію часу підготовки та підвищення безпеки експлуатації важких підводних робіт транспортного призначення.

Результати досліджень. Для досягнення поставленої мети необхідно реалізувати такі концептуальні аспекти:

- інтеграційний аспект — об'єднання АНПА-Т, БЦК, СПП та НТМ у єдину комп'ютерно-інтегровану систему з наскрізним обміном даними;
- інтелектуальний аспект — розробка алгоритмів автономного прийняття рішень бортовим комп'ютером АНПА-Т для виконання транспортних місій без безперервного зв'язку з оператором;
- технологічний аспект — автоматизація критичних фаз експлуатації, таких як високоточний докінг під водою та безпечне наземне транспортування АНПА-Т за допомогою сенсорних мереж;
- оптимізаційний аспект — зниження енергетичних та часових витрат на виконання транспортних операцій шляхом впровадження мультиагентного планування ресурсів всієї системи.

У результаті має бути створена цілісна науково-технічна база для функціонування безпілотних морських транспортних вузлів, де роль людини зводиться до високорівневого моніторингу, а всі операційні задачі (від завантаження на суші до розвантаження на морському дні) виконуються автоматизованим комплексом.

Розглянемо тепер актуальні задачі автоматизації окремих складових МТС.

1. Автоматизація АНПА-Т вбачається як трирівнева задача — стратегічний, тактичний та виконавчий рівні.

Стратегічний рівень (планування та адаптація місії) забезпечує взаємодію АНПА-Т з БЦК:

- динамічне планування енергоефективних траєкторій (автоматичний розрахунок маршруту з урахуванням гідродинамічного опору вантажу, течій та поточного стану енергетичної системи підводного апарата);
- інтелектуальне управління енергетичними ресурсами підводного апарата (автоматизація розподілу енергії між рушійною системою та бортовими споживачами електроенергії для гарантованого виконання транспортної місії АНПА-Т);
- управління поведінкою в позаштатних ситуаціях (автономне прийняття рішень при втраті зв'язку, виявленні перешкод або критичних помилок систем АНПА-Т, наприклад, повернення в точку старту, аварійне спливання або утримання позиції).

Тактичний рівень (навігація та синтез руху) забезпечує точне виконання запланованої транспортної місії:

- прецизійна навігація в умовах відсутності GPS (автоматизація комплексування даних від інерціальної системи, доплерівського лага та гідроакустичних засобів позиціонування для мінімізації похибки зчислення координат);
- автоматизація процесу докінгу — стикування з підводним чи надводним портом як кінцевою точкою доставки вантажу або, після виконання місії — до СПП (розробка алгоритмів прецизійного підходу за допомогою систем технічного зору та гідроакустичних маркерів);
- обхід динамічних перешкод (автоматичне розпізнавання та ухилення від морських об'єктів (суден, морських тварин, інших АНПА) у реальному часі).

Виконавчий рівень (локальне керування мехатронними системами АНПА-Т як фізичними вузлами апарата):

- робастне керування рушійною системою АНП-Т (автоматична стабілізація апарата по шести ступенях свободи з урахуванням великої інерційності корпусу та змінного центру мас при транспортуванні вантажів;
- керування бортовими джерелами енергії (автоматизація процесів заряджання/розряджання акумуляторів, моніторингу температури та стану акумуляторів, керування тепловими джерелами енергії);
- діагностика та реконфігурація (автоматичне виявлення відмов виконавчих механізмів тощо).

2. Автоматизація СПП вбачається у складі наступних задач:

- компенсація динамічних коливань (активна компенсація вертикальної качки шляхом автоматичного керування лебідками для стабілізації положення захватного механізму відносно дзеркала води) та прогнозування руху платформи (використання датчиків руху та алгоритмів фільтрації Калмана для передбачення фази хвилі, щоб здійснити контакт апарата з водою або захватом у момент найменших прискорень);
- автоматизація фази зближення та стикування — процес переходу АНПА-Т з вільного плавання у жорстку фіксацію з СПП (синхронізація рухів — спільне автоматичне керування приводами СПП та рушійми АНПА для вирівнювання їхніх відносних швидкостей та траєкторій; інтелектуальне захоплення — використання систем технічного зору для автоматичного наведення механічних «маніпуляторів-захоплювачів» на стикувальні вузли апарата; демпфування ударних навантажень — автоматичне регулювання зусилля в момент контакту для запобігання пошкодженню корпусу апарата та конструкцій СПП);
- керування позиціонуванням під час спуску/підйому (контроль натягу кабель-троса; автоматичне центрування АНПА-Т на ложементі);
- діагностика та безпека операцій (автоматичний моніторинг погодних вікон — аналіз даних від бортових метеостанцій та датчиків хвилювання для автоматичного блокування операції, якщо параметри середовища перевищують безпечні межі; контроль навантажень на вузли СПП — безперервний моніторинг зусиль у гідравлічних та механічних приводах для запобігання перевантаженням конструкції під час підйому апарата з залишками води або вантажем);
- інформаційна інтеграція з БЦК та АНПА (координація через «Цифровий двійник» — передача телеметрії про стан СПП до БЦК для візуалізації процесу оператором та автоматичного протоколювання; двосторонній обмін даними з АНПА-Т — передача на апарат команд про перехід у режим "стикування" та отримання від нього даних про готовність бортових систем до підйому).

Таким чином, основна наукова задача автоматизації СПП полягає у синтезі систем робастного керування, здатних забезпечити гарантовану точність стикування масивного апарата з рухомою платформою в умовах інтенсивних гідродинамічних збурень.

3. Автоматизація НТП вбачається у складі наступних задач:

- автоматизований контроль цілісності та стану (моніторинг вібраційних та ударних навантажень — автоматична реєстрація прискорень за допомогою акселерометрів для запобігання пошкодженню високоточних сенсорів та композитного корпусу; контроль розподілу мас — автоматичне зважування та визначення центру ваги апарата після місії (з урахуванням можливого залишку води в баластних цистернах або зміненого положення вантажу) для коректного налаштування підвіски НТМ);
- автоматизація систем фіксації та завантаження (інтелектуальні адаптивні кріплення — автоматичне регулювання зусилля затискачів ложементу залежно від геометричних параметрів корпусу та маси апарата для рівномірного розподілу тиску; автоматизоване стикування з СПП — синхронізація систем керування наземного модуля та СПП для безлюдного перевантаження АНПА-Т з судна чи пірса на НТП);

- навігація та керування рухом на суші (точне позиціонування під крановим обладнанням, планування маршруту в межах портового термінала);
- інформаційна інтеграція з БЦК (автоматична діагностика через «Check-list» інтерфейс — бездротове зчитування статусу бортових систем АНПА-Т, поки він знаходиться на НТМ, і передача звіту в БЦК);
- керування енергетичним та сервісним середовищем (автоматизація зарядних операцій — керування роботизованими роз'ємами для швидкого заряджання акумуляторів АНПА-Т або заміни енергетичних модулів безпосередньо на транспортній платформі; підтримка мікроклімату — автоматичне керування системами охолодження/підігріву корпусу апарата під час тривалого транспортування за несприятливих температурних умов.

Таким чином, основна наукова задача автоматизації НТМ полягає у створенні кіберфізичного інтерфейсу, який перетворює звичайне транспортне шасі на інтелектуальний діагностично-логістичний вузол, що інтегрований у загальну цифрову модель морської транспортної системи.

4. Автоматизація БЦК вбачається у складі наступних задач:

- мультиагентне управління та координація – БЦК повинен автоматизувати взаємодію між усіма складовими МТС (АНПА-Т, СПП, НТМ), тобто, забезпечувати: синхронізацію логістичних ланцюжків (автоматичне узгодження часу прибуття НТМ до причалу, готовності СПП та виходу АНПА-Т в море; управління групою АНПА-Т (розподіл завдань між декількома АНПА-Т у разі масштабування системи, запобігання конфліктам траєкторій та черговості обслуговування на докінг-станціях);
- створення та супровід «Цифрового двійника» для автоматизації процесу дзеркального відображення фізичного стану системи у віртуальному середовищі (візуалізація режимів АНПА-Т в реальному часі та прогностичне моделювання процесу його функціонування);
- планування місій та інтелектуальна підтримка прийняття рішень — автоматизоване генерування завдань транспортної місії, експертна оцінка технічного стану АНПА-Т;
- автоматизація каналів зв'язку та кібербезпека морської транспортної місії — адаптивне керування шлюзами зв'язку, кіберзахист та автентифікація;
- обробка та архівація даних — автоматизований пост-місійний аналіз (швидка обробка отриманих від АНПА-Т даних після підйому апарата на поверхню та автоматичне формування звітів про виконання транспортної задачі), інтеграція з глобальними морськими логістичними системами;
- ергономіка та інтерфейс «Людина-Машина» — фільтрація інформаційних потоків, автоматична сигналізація яка пріоритезує аварійні сигнали залежно від їхньої важливості для безпеки апарата та навколишнього середовища.

Тобто, основна науково-технічна задача БЦК полягає у централізації управління гетерогенними об'єктами забезпечуючи прозорість логістичних операцій та можливість втручання людини-оператора лише у критичних випадках, що виходять за межі алгоритмічних рішень автономної системи.

Висновки. У роботі проведено комплексний аналіз задач автоматизації морської транспортної системи на базі важкого автономного ненаселеного підводного апарата транспортного типу. Доведено, що ефективне функціонування МТС можливе лише за умови створення єдиного інформаційно-керуючого простору, який об'єднує бортові системи АНПА, береговий центр керування, автоматизовані системи спуску/підйому та наземну логістику. Обґрунтовано, що така система повинна розглядатися як гетерогенна мультиагентна структура. Визначено, що ключовою задачею для важких АНПА транспортного типу є розробка робастних алгоритмів керування рухом, що здатні адаптуватися до зміни маси вантажу та інерційних характеристик апарата, забезпечуючи високу точність навігації в умовах відсутності сигналів глобальних супутникових систем.

DETERMINISTIC OVERLAP DETECTION IN UAV AGRICULTURAL IMAGERY USING RADON-BASED STRUCTURED WINDOW ACCUMULATION

Berezhnyi D., Bilan S.

*Taras Shevchenko National University of Kyiv
(Ukraine)*

Introduction. UAV imagery plays a crucial role in precision agriculture, enabling monitoring of crop conditions and large-scale spatial analysis. A fundamental problem in processing such imagery is detecting overlapping regions between partially overlapping images for stitching and orthomosaic generation. Traditional feature-based approaches such as SIFT and ORB often fail in agricultural environments due to repetitive textures and low structural diversity [1].

Relevance of Research. Accurate overlap detection directly affects the quality of orthomosaics and further agronomic analysis. Errors in overlap estimation lead to distortions and misalignment of images. Existing deep learning approaches provide high accuracy but require large datasets and computational resources [2]. Therefore, there is a need for lightweight, interpretable, and training-free methods suitable for constrained environments.

Problem statement. The task is to develop a robust and computationally efficient method for detecting overlapping regions between partially overlapping UAV agricultural images under constrained translational shifts. This problem arises due to the specific characteristics of agricultural imagery, such as repetitive textures and low structural diversity, which complicate reliable overlap estimation and may lead to distortions and inaccuracies in image stitching and orthomosaic generation.

Additionally, existing approaches may exhibit limited robustness under domain-specific conditions, including noise and illumination variations, or require high computational resources [3]. Therefore, the task focuses on designing a deterministic, projection-based method capable of accurately identifying common overlapping regions while remaining interpretable and independent of training data, ultimately improving the accuracy and stability of stitching pipelines in precision agriculture applications [4], [5].

Results. The experimental evaluation was conducted on synthetically generated ground-truth (GT) datasets based on UAV agricultural imagery. Image pairs of size 256×256 pixels were created using known translational shifts, enabling precise overlap estimation. Two scenarios were considered: clean data and noisy data with additional geometric and radiometric distortions.

A fixed baseline configuration was used, including stride = 32 (window sampling step), step = 8 (multi-offset shift), $\Delta p = 0.08$ (projection tolerance), $\tau = 5$ (projection consistency threshold), and $\gamma = 0.85$ (overlap validation threshold). Performance was evaluated using Recall, Precision, and Intersection-over-Union (IoU), which measure detection completeness, accuracy, and spatial agreement of the predicted overlap regions.

The results obtained on the clean GT dataset demonstrate a clear dependence of overlap detection performance on the window size parameter (WIN). Smaller window sizes (WIN = 8-24) provide moderate Recall and Precision values, indicating limited spatial consistency and partial detection of the true overlap region. In this regime, the method lacks sufficient structural context for reliable matching.

A significant improvement is observed for intermediate window sizes (WIN = 32-64), where the method achieves near-optimal performance, with Precision reaching 1.0 and IoU approaching 0.97–0.98, indicating highly accurate overlap localization with minimal false positives. However, further increase of the window size (WIN ≥ 80) leads to gradual performance degradation due to reduced spatial sensitivity, while the number of matched windows decreases and computational cost slightly increases. Overall, intermediate window sizes provide the best balance between accuracy and efficiency under clean conditions.

The results obtained under noisy conditions demonstrate a significantly different performance pattern compared to the clean dataset. Smaller window sizes ($WIN = 8-16$) achieve very high Recall (up to 0.99), but suffer from low Precision, indicating a large number of false-positive matches. As the window size increases to moderate values ($WIN = 24-32$), a more balanced performance is observed, with improved Precision and more stable IoU values.

However, further increase of the window size ($WIN \geq 48$) leads to a rapid degradation in performance, primarily due to reduced robustness to geometric and radiometric distortions. In this regime, the method fails to reliably detect the true overlap, resulting in low Recall and near-zero IoU. Overall, the results indicate that, under noisy conditions, an optimal trade-off is achieved only at intermediate window sizes, while both small and large windows lead to suboptimal performance.

The experimental results demonstrate that the proposed method provides high accuracy in detecting overlapping regions under controlled conditions, achieving IoU values up to 0.98 on clean data. It was shown that the window size is a critical parameter, governing the trade-off between spatial resolution and structural robustness, with optimal performance achieved at intermediate values. Under noisy conditions, the method exhibits increased sensitivity, where smaller windows lead to false positives and larger windows fail to preserve structural consistency. Additionally, the overlap validation threshold (γ) remains stable in clean scenarios but becomes crucial in noisy environments. Overall, the method offers a reliable and computationally efficient solution for overlap detection in UAV imagery under constrained transformations.

REFERENCES

1. Bilan, S., & Berezhnyi D. (2025). Robust image matching method for UAV agricultural images using SIFT and ORB. *Ukrainian Journal of Information Technology*, 7(2): 58-66
2. Sun, J., Shen, Z., Wang, Y., Bao, H., & Zhou, X. (2021). LoFTR: Detector-Free Local Feature Matching with Transformers. *CVPR*.
3. Recht, B., Roelofs, R., Schmidt, L., & Shankar, V. (2019). Do ImageNet classifiers generalize to ImageNet? *ICML*.
4. Schonberger, J. L., & Frahm, J.-M. (2016). Structure-from-Motion Revisited. *CVPR* 2016.
5. Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГТД З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МОДЕЛІ FDI

Єнчев С. В., Пасічниченко Є. О.

*Державний університет «Київський авіаційний інститут»
(Україна)*

Вступ. Останні десятиліття розвиток та вдосконалення авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) супроводжується посиленням вимог до надійності та ефективності їх систем автоматичного керування (САК). Однією з важливих завдань є вдосконалення методів, алгоритмів управління та контролю ГТД та необхідність забезпечення відмовостійкості САКУ, що зумовлено наявністю жорстких вимог до забезпечення безпеки та економічності польотів.

Важливим напрямом у забезпеченні відмовостійкості САК ГТД є вдосконалення їхньої архітектури на основі базової концепції FADEC (Full Authority Digitally Engine Control), що полягає в побудові цифрової системи керування двигуном з повною відповідальністю.

На сучасному етапі розвитку бортової авіоніки САК ГТД побудовані згідно концепції FADEC поєднують функції керування авіаційним ГТД з функціями контролю технічного стану, діагностики відмов елементів системи керування, їх локалізацію та реконфігурацію керування.

Додатково до цих завдань САК ГТД перспективних повітряних суден (ПС) повинні вирішувати додаткові завдання, які пов'язані з прийняттям рішень в польоті на основі накопичених знань в умовах невизначеності та структурно-параметричної адаптації у разі виникнення можливих нештатних ситуацій.

Актуальність дослідження. На сьогодні виконано багато досліджень з питань побудови алгоритмів контролю та діагностики параметрів САК і ГТД, які мають недоліки, що пов'язані слабкою інформаційною системною взаємодією, відсутність функцій самонавчання та складністю термогазодинамічних процесів, які протікають в ГТД, та їх математичного опису. Вказані недоліки призводять для потреби в системно-ув'язаній автоматизації, інтелектуалізації процесів прийняття рішень щодо технічного стану САК ГТД в умовах невизначеності.

Таким чином, розробка інтелектуальних алгоритмів автоматичного контролю та діагностики систем керування ГТД, а також дослідження особливостей їх практичного застосування з урахуванням обмежень на наявні обчислювальні ресурси бортової цифрової обчислювальної машини (БЦОМ) є актуальним завданням на сучасному етапі розвитку авіадвигуна.

Постановка задачі. Системи автоматичного керування газотурбінними двигунами є базовим елементом сучасної авіаційної техніки, оскільки від їхньої надійності залежить безпека польоту, економічність використання палива, рівень викидів у навколишнє середовище, а також довговічність та ресурс роботи двигунів. У структурі сучасного літака САК ГТД посідає ключове місце, оскільки забезпечує взаємодію двигуна з іншими бортовими системами та формує основу інтегрованих комплексів керування.

Сучасні бортові САК ГТД типу FADEC поєднують функції керування двигуном, а також функції контролю технічного стану, діагностики відмов елементів САК та їх парирування. Поряд із традиційними завданнями, САК ГТД нового покоління повинні вирішувати додаткові завдання, пов'язані з прийняттям оперативних рішень на основі накопичених знань в умовах невизначеності, та адаптації (тобто зміни своєї структури та параметрів) у разі виникнення можливих позаштатних ситуацій.

Результати досліджень. Незважаючи на значний обсяг досліджень у галузі побудови алгоритмів контролю та діагностики САК, існуючі інформаційні технології контролю параметрів САК ГТД та діагностики її функціональних блоків не є досконалими з низки причин. З одного боку, це слабка інформаційна «ув'язка», відсутність елементів

«інтелектуальності», що дозволяють швидко, якісно та ефективно здійснити підтримку прийняття рішень та, як наслідок, скорочувати загальний час, який витрачається на обслуговування ГТД. З іншого боку, це складність процесів, що протікають в САК ГТД, складність їх математичного опису, обмежений склад параметрів, що вимірюються, їх технологічний розкид тощо. Зазначені фактори призводять до необхідності комплексної автоматизації та інтелектуалізації процесів прийняття рішень про технічний стан САК ГТД в умовах невизначеності, у тому числі з використанням методу контролю моделі FDI (Fault Detection and Identification).

Алгоритми контролю сучасних САК ГТД базуються на низці фундаментальних принципів [1, 2]:

1. Принцип адаптивності — алгоритм повинен змінювати параметри регулювання залежно від зовнішніх умов (температура, висота польоту, навантаження).
2. Принцип стабілізації — полягає у підтримці основних параметрів двигуна у допустимих межах
3. Принцип оптимальності — спрямований на мінімізацію витрат палива, зменшення рівня викидів та вібрацій.
4. Принцип відмовостійкості — передбачає наявність дублювання каналів вимірювання і керування.
5. Принцип діагностики та прогнозування — полягає у своєчасному виявленні відхилень у роботі двигуна та попередженні розвитку аварійних ситуацій.

Типова будова сучасної САК ГТД складається з наступних блоків (рис. 1) [1, 2, 4]: основний та резервний канали керування; датчики електронної частини основного та резервного регулятора; блок комутації; автономний генератор; агрегат керування механізацією двигуна; агрегат захисту двигуна від досягнення граничних параметрів; виконавчі механізми.



Рисунок 1 — Структура сучасної САК ГТД

Розвиток систем автоматичного керування авіаційними ГТД від простих механічних регуляторів до складних цифрових комплексів FADEC засвідчує поступове підвищення рівня

автоматизації та відмовостійкості. Сучасні алгоритми контролю мають відповідати вимогам стабільності, адаптивності, оптимальності та діагностичності. Подальший прогрес у цій сфері пов'язаний із впровадженням інтелектуальних технологій, зокрема нейронних мереж, нечіткої логіки та методів машинного навчання, що дозволить підвищити ефективність і безпеку експлуатації авіаційних ГТД.

У сучасних САК ГТД широко використовують керування за моделлю (Model Based Control) (рис. 2). При цьому стан системи, що перевіряється, оцінюють за результатами аналізу її реакції на різні входні впливи, під якими розуміють зміни параметрів зовнішнього середовища і параметрів її елементів [1, 3, 4]. Під час розроблення алгоритмів контролю при цьому зазвичай необхідно мати у своєму розпорядженні еталонну модель (ЕМ) об'єкта контролю (або системи), яка б встановлювала взаємозв'язок між станами об'єкта (системи), що перевіряється, та його відповідними реакціями. На рис. 2 наведено структурну схему замкнутої САК з ЕМ, де y — вихід об'єкта; y_0 — уставка (задавальний вплив); $e = y - y_0$ — похибка управління. У разі появи незгодженості $y_{EM} - y$ проводиться корекція параметрів цифрового регулятора таким чином, щоб характеристики САК збігалися з характеристиками ЕМ.

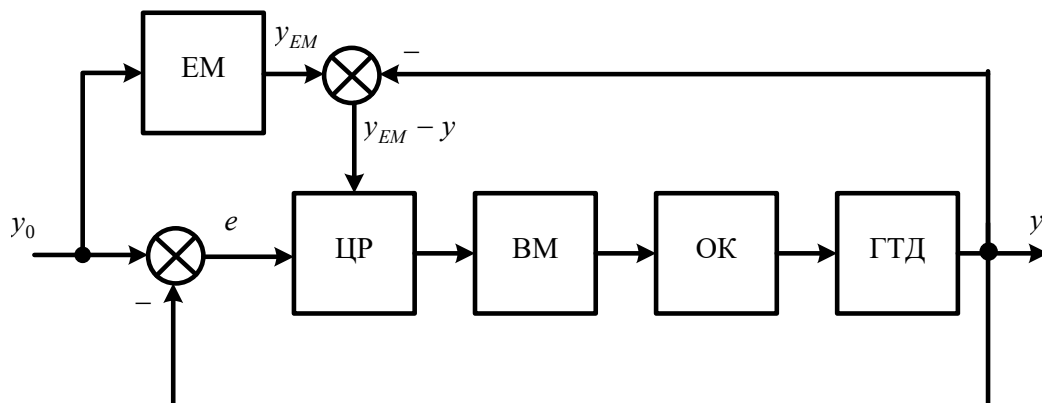


Рисунок 2 — Структурна схема керування за моделлю

Сучасні САК ГТД, що функціонують в умовах параметричної та структурної невизначеності, вимагають застосування нових підходів до забезпечення контролю та діагностики. В основі запропонованого підходу до вирішення завдань контролю та діагностики САК ГТД застосовується метод виявлення та ідентифікації відмов FDI [3]. Типова схема реалізації методу FDI ґрунтується на порівнянні результатів вимірювань характеристик технічного стану об'єкта контролю (або будь-якого іншого елемента/модуля САК ГТД) з виходами його нейромережевої моделі (рис. 3).

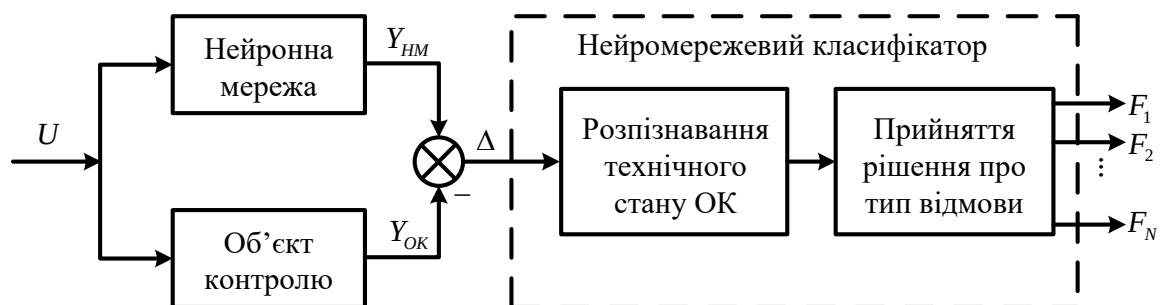


Рисунок 3 — Нейромережева реалізація методу FDI

На рис. 3: U — вектор управляючих входних впливів; Y_{HM} — вектор виходів НМ-моделі ОК, Y_{OK} — вектор вихідних параметрів ОК; $\Delta = Y_{HM} - Y_{OK}$ — нев'язка, тобто різниця векторів виходів ОК і НМ, на основі аналізу якої відбувається розпізнавання стану ОК в

поточний момент часу та прийняття рішення про належність цього стану тому чи іншому класу (F вектор виходів НМ-класифікатора) [1, 2].

Реалізація методу FDI передбачає вирішення наступних завдань [2]:

- 1) розробка та програмна реалізація моделі досліджуваного ОК;
- 2) аналіз величини неузгодженості (нев'язки) та розпізнавання поточного стану ГТД;
- 3) ухвалення рішення про технічний стан ОК.

Нейромережева модель «еталонного» об'єкта контролю із усередненими параметрами може бути, синтезована з урахуванням навчальної вибірки, отриманої з урахуванням експериментальних даних. Оскільки реальні дані щодо дефектних ОК можуть бути відсутніми або бути неповними, при формуванні навчальної вибірки для навчання НМ-класифікатора в математичну модель ОК можуть навмисно вводитися ті чи інші зміни, що відповідають конкретним типам дефектів (відмов). Вихід НМ-класифікатора F являє собою бінарний, вектор $F = \{F_1, F_2, \dots, F_N\}$, компоненти якого приймають значення 0 або 1 і відображають результати діагнозу (N -- кількість виявлених відмов).

Застосування методу FDI на основі НМ-алгоритмів є ключовим моментом у забезпеченні контролю та діагностики елементів САК ГТД, так як дає змогу скоротити кількість помилок 1-го і 2-го роду, що виникають у процесі функціонування САК.

Висновки. Інтелектуальні алгоритми контролю та діагностики САК ГТД є не повністю опрацьованими, і вимагають розвитку в плані підвищення точності НМ-моделей та ефективності НМ-алгоритмів контролю та діагностики САК ГТД, вибору раціональної елементної бази при програмно-апаратній реалізації НМ-моделей та алгоритмів для роботи в реальному часі на борту ЛА. Наявні багато питань, пов'язаних як з відпрацюванням ефективних методів контролю та діагностики САК ГТД, з розробкою інженерних методик проектування НМ-моделей та алгоритмів контролю та діагностики САК ГТД, залишаються непроробленими мало дослідженими. Таким чином, подальше вдосконалення методів побудови автоматичних систем контролю та діагностики цифрових САК ГТД із застосуванням інтелектуальних технологій, а також дослідження ефективності їх практичного застосування у складі САК ГТД є актуальним завданням на сучасному етапі розвитку авіадвигунобудування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Advanced Multivariable Control Systems of Aeroengines. Sun Jiango. BUAA Pub. House, Beijing, China, 2015. 621 p.
2. Litt J.S. Sixth NASA Glenn research center propulsion control and diagnostics (PCD) workshop. 6th Propulsion Control and Diagnostics Research Workshop, Cleveland, USA, August 22–24, 2017. 408 p.
3. Єнчев С.В. Забезпечення відмовостійкості нечіткої інтелектуальної системи керування авіаційними двигунами. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки». Том 30 (69). № 2. Част. 1. 2019. С.29–34.
4. Захарченко В.П. Методи та засоби резервування авіоніки / Захарченко В.П. та ін. монографія. К.: НАУ, 2020. 276 с.
5. Pashilkar A.A., Sundararajan N., Saratchandran P. A fault-tolerant neural network aided controller for aircraft autoland. Aerospace Science and Technology, No 10, 2006. Pp. 49–61.

ВПЛИВ ІНТЕРАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНУ ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

¹Єнчев С. В., ²Тачинін Є. В.

¹Державний університет «Київський авіаційний інститут»

(Україна)

²АТ «Антонов»

(Україна)

Вступ. З розвитком авіаційної техніки (АТ) задачі підвищення льотної придатності повітряних суден стають більш актуальними за рахунок сукупної дії факторів: скорочення витрат часу, обсягу робіт і фінансових витрат на їх технічне обслуговування (ТО) та ремонт в процесі експлуатації. Це стає можливим на основі впровадження нової авіаційної техніки, яка відповідає сучасним вимогам, застосування передових інформаційних технологій її технічної експлуатації. Основним призначенням системи технічної експлуатації є забезпечення надійності, економічності, справності та готовності літаків до виконання польотів. Успішне виконання цих завдань багато в чому визначається конструкцією авіаційної техніки, її придатності до виконання експлуатаційних і ремонтних робіт з використанням найбільш економічних з точки зору трудових і часових витрат технологічних процесів. Таку властивість повітряного судна, його технічної документації називають експлуатаційною технологічністю.

Актуальність дослідження. Світовий досвід експлуатації АТ [1] свідчить про те, що підвищення рівня ЕТ на стадії проектування приводить до скорочення часу пошуку та усунення несправностей; забезпечення доступу до зняття, встановлення та перевірки комплектуючих виробів. Таким чином, вона впливає на тривалість ТО, але при цьому, не має впливу на частоту виникнення відмов. Тому, задача пов'язана з підвищенням рівня ЕТ, є актуальною науковою задачею..

Постановка задачі. Ключовим моментом у забезпеченні експлуатаційної технологічності нового літака є прогнозування її показників. Для розрахунку та прогнозування показників експлуатаційної технологічності використовуються існуючі розроблені методики [2], у тому числі методика для раннього прогнозування та детальної оцінки всіх видів обладнання — авіоніки та механічного обладнання на всіх рівнях технічного обслуговування [3]. Таким чином, метою дослідження є розробка методики раннього прогнозування та детальної оцінки всіх видів обладнання [3], яка дозволяє проаналізувати експлуатаційну технологічність з урахуванням можливостей діагностики та усунення несправностей, конструкції замінного компонента (виробу) і інтенсивності відмов.

Результати досліджень. Головні показники ЕТ, які розраховуються за цією методикою [3] наступні: середня тривалість відновлення (MTTR), середні трудомісткості відновлення та роботи по технічному обслуговуванню (MLH/repair та MLH/MA), середня трудомісткість ТО (на годину напрацювання) (MMH/OH).

$$MTTR = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i R_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}, \quad (1)$$

де $MTTR$ — середня тривалість відновлення літака; n — кількість замінних компонентів; λ_i — інтенсивність відмов i -го компонента; R_i — середня тривалість відновлення n -го компонента.

Контролепридатність (КП) є однією із складових експлуатаційної технологічності й визначається як характеристика проекту, що дозволяє визначити стан об'єкта (компонента) та несправності, які будуть ефективно знайдені й усунуті за прийнятною вартості.

Діагностика складається з ручних, автоматичних і напівавтоматичних апаратних засобів технічного обслуговування, програмного забезпечення та процедур по визначенню стану, виявлення та усунення несправностей.

Необхідні апаратні засоби, програмне забезпечення та процедури будуть залежати значною мірою від ЕТ (тобто характеристики контролепридатності). Діагностика є всього одним аспектом ТО. Всі процедури ТО визначаються значною мірою конструкцією. Проект із високою ЕТ потребує найменшої кількості засобів ТО та простих процедур ТО [2].

На рівні компонента контролепридатність – це його властивість, яка дозволяє швидко підтвердити його функціональну цілісність. З економічної точки зору ефективна контролепридатність дозволяє знизити:

- тривалість простоїв літака;
- кількість помилкових зняття справного компонента;
- вартість перевірок у лабораторії та вартість ремонту.

Часто контролепридатність оцінюється за допомогою показника NFF (No Fault Found — дослівно «несправності не знайдено» або кількість необґрунтованого зняття компонента.

Поняття NFF пояснюється прикладом: після прояву відмови, у результаті пошуку несправності визначається передбачуваний компонент, що відмовив. Даний компонент знімається з літака та відправляється для перевірки в лабораторію. Якщо в процесі проходження перевірки несправність не підтверджується, то компонент вертається в експлуатацію. У цьому випадку дане знімання належить до категорії NFF.

Як показують статистичні дані [3], блоки авіоніки, що прибули для ремонту, лише в 14,3 % мали підтверджені відмови, стільки ж перемежовані, а 71,4% випадків були пов'язані з помилковою сигналізацією.

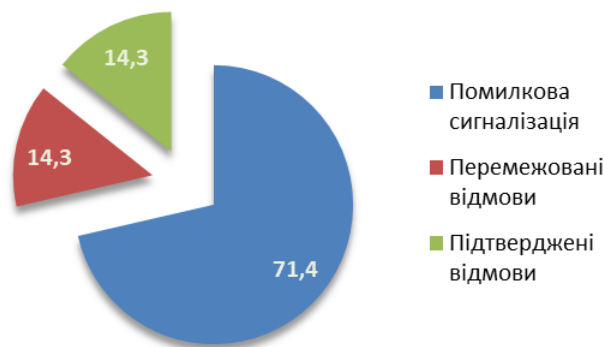


Рисунок 1 — Процентне співвідношення результатів перевірок виробів, відправлених у ремонт

Для літаків F/A-18C помилкова сигналізація відмов склала більш 88%, а середній наробіток на помилкову сигналізацію — менше 1 год. У деяких випадках повернення повернутих через помилкову сигналізацію відмов перевищила 83% [4].

Для іншого роду військ (флот, сухопутні) цей показник досягає 67%. В 2000 р. для конвертоплану V-22 помилкова сигналізація була на рівні 92% [5].

Представники компанії Boeing на конференції Autotestcon 2007 [10] заявляли, що деяка авіоніка на військових літаках показала 100% помилкової сигналізації про відмови. Автомобільні блоки керування круїз-контролем, повернено із цієї причини — 96% NFF [6].

Тобто, підвищуючи рівень контролепридатності шляхом впровадження надійних і достовірних систем контролю та діагностики, можна по-перше виключити порядку 70% необґрунтованих відправлень обладнання в ремонт і, по-друге, значно підвищити готовність літака до польотів.

На даний час, впроваджені розробниками індивідуальні вбудовані системи контролю (ВСК/ВІТЕ) устаткування та централізовані бортові системи контролю та

діагностики або технічного обслуговування (СЦТО/CMS) враховуються в закладеній (або конструктивній) готовності літака A_i (*inherent availability*). CMS це розвинена бортова система технічного обслуговування, яка об'єднує результати контролю індивідуальних ВІТЕ і на додаток до них контролює за власними алгоритмами обладнання, що не має ВІТЕ. Так як, CMS нерозривно пов'язана з ВІТЕ, надалі будемо використовувати загальне поняття CMS технології.

Технології, що застосовуються експлуатантом, ІЕТР і ММЕЛ (ММЕЛ це довідник несправностей і умов, при яких авіакомпанія може продовжити виконувати польоти) ураховують при розрахунках експлуатаційну готовність A_o (*operational availability*).

Сучасна експлуатаційна документація створюється винятково програмними засобами і є електронною та інтерактивною (ІЕТР). Технологія створення заснована на використанні баз даних [7]. Комплект паперової документації генерується тільки за потреби. Такий підхід скорочує кількість помилок, неповних описів, витрат експлуатанта.

Закладена (або конструктивна) готовність літака A_i як комплексний показник ефективності експлуатаційної технологічності може бути розрахована за такою формулою [1]:

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} = \frac{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}}{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} + \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i R_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}}, \quad (2)$$

де $MTBF$ — середній наробіток літака на відмову; $MTTR$ — середня тривалість відновлення літака; n — кількість замінних компонентів; λ_i — інтенсивність відмов n -го компонента; R_i — середня тривалість відновлення n -го компонента;

Приклад залежності $MTBF$ від A_i і $MTTR$ наведено на рис. 2 [1].

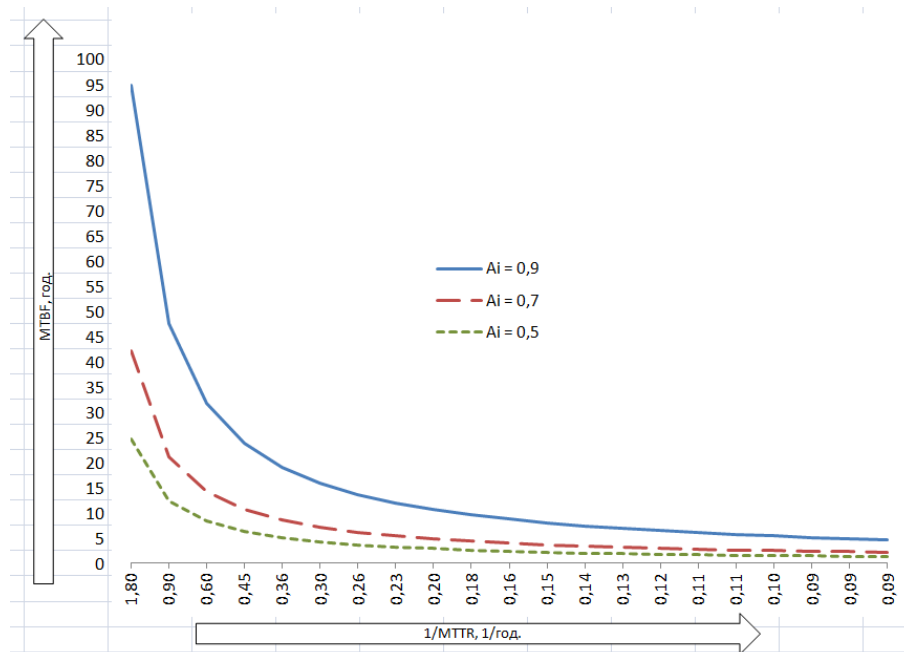


Рисунок 2 — Залежність $MTBF$ від A_i і $MTTR$ [1]

Необхідно відзначити, що показник A_i характеризує проект з точки зору надійності та експлуатаційної технологічності й враховує тільки позапланове технічне обслуговування. Як показують графіки на рис.2, для досягнення заданого показника A_i та компенсації зниження надійності необхідно підвищити $MTTR$. На показник $MTTR$

безпосередньо впливає контролепридатність, а саме впровадження BITE і CMS технологій.

У свою чергу експлуатаційна готовність літака A_o розраховується з урахуванням простоїв на планове та позапланове ТО й так званих не конструктивних факторів, тобто чисто експлуатаційних [1].

$$A_o = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} = \frac{\frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}}{\frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i} + \frac{\sum_{i=1}^n m_i R_i}{\sum_{i=1}^n m_i}},$$

де $MTBM$ — середній наробіток між ТО (плановим і позаплановим); MDT — середня тривалість простою на ТО.

До даних факторів можна віднести саме застосування інтерактивної електронної експлуатаційної документації (ІЕЕД/ІЕТР) і головного переліку мінімального обладнання (ГПМО/ММЕЛ), так як на MDT безпосередньо впливає застосування технологій ІЕТР і ММЕЛ.

Висновки. Таким чином, такі технології, як і BITE і CMS, створюються та відповідно можуть бути оцінені вже на етапі проектування тому, що від їхньої глибини реалізації та ступеню їх інтеграції напряду вже залежить показник A_i . Контролепридатність також як і готовність може бути закладеною (конструктивною), а також досягнутої при експлуатації.

Отже, наступною постає задача оцінки впливу впровадження розробником технологій CMS, ІЕТР, ММЕЛ на готовність літака до польотів.

ЛІТЕРАТУРА

1. MIL-HDBK-470A. Designing and Developing Maintainable Products and Systems. 1997. 719 p.
2. Benjamin S. Blanchard. Logistics Engineering And Management. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998. 526 c.
3. Louis Y. Ungar. Causes and Costs of No Fault Found Events. Advanced Test Engineering (A.T.E.) Solutions, Inc. El Segundo, CA, IPC APEX EXPO 2015, 36 p.
4. K. Bain and David G. Orwig, F/A-18E/F Built-in-test (BIT) Maturation Process, Proceedings of NDIA Third Annual Systems Engineering & Supportability Conference, August 2000, p. 419–429.
5. K. Westervelt, Applying the Quality Function Deployment on the V-22 Osprey, 2010 IEEE Aerospace Conference, 2010, p. 212.
6. Тачинін Є.В., Єнчев С.В. Методологічні основи створення методики забезпечення експлуатаційної технологічності авіоніки на стадії проектування. СЕУТТОО-2024: XV МНПК «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування», 13–15 березня 2024 р. : тези доп. Одеса : ХДМА. С.89–91
7. Тачинін Є.В., Єнчев С.В. Методика оцінки впливу сучасних інформаційних технологій контролю та інтерактивної документації на готовність літака до польотів. Наукоємні технології. 2025. №2(66). С.263–269.

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО СУПРОВОДУ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Жищинський Ю. С., Шарко О.В.
Херсонська державна морська академія
(Україна)

Вступ Мультимодальні транспортні системи відіграють ключову роль у сучасній логістиці, забезпечуючи ефективне поєднання різних видів транспорту. Особливу увагу привертає інтеграція річкового та автомобільного транспорту, яка дозволяє поєднати економічність водних перевезень із гнучкістю автомобільних. У сучасних умовах глобалізації та нестабільності транспортних систем питання оптимізації таких перевезень набуває особливої актуальності [1].

Мультимодальні перевезення передбачають використання кількох видів транспорту в межах єдиного логістичного ланцюга. Річковий транспорт використовується для перевезення великих обсягів вантажів на значні відстані, тоді як автомобільний транспорт забезпечує доставку «останньої милі».

Сучасні дослідження використовують методи математичного програмування, генетичні алгоритми та стохастичні підходи. Водночас більшість моделей мають обмеження, пов'язані зі складністю та недостатньою адаптивністю до реальних умов.

Постановка проблеми. Невизначеність є ключовим фактором у мультимодальних системах [2, 3]. Використовуються методи нечіткої логіки, Монте-Карло та байєсівські мережі. Таким чином використання вищезазначених методів для інформаційного супроводу логістичних перевезень в умовах неймовірнісної невизначеності є доцільним. Вникає потреба в розробці відповідного механізму для розрахунків ймовірностей при певних параметрах перевезень.

Основна частина. Розглянемо логістичну систему водного транспорту як об'єкт, що функціонує в умовах «неймовірнісної невизначеності». На відміну від стохастичної невизначеності, де випадкові величини мають відомі закони розподілу, неймовірнісна невизначеність шляху характеризується [4, 5]:

- відсутністю статистичних даних про параметри середовища;
- відсутністю апіорних ймовірнісних розподілів;
- наявністю непередбачуваних збурень (погодні умови, затори, технічні відмови).

Стан логістичної системи в момент часу t описується таким рівнянням [6]:

$$S(t) = (P(t), V(t), W(t), I(t))$$

де: $P(t) \in \mathbb{R}^3$ — координати транспортного засобу (довгота, широта, осадка/висота); $V(t) \in \mathbb{R}^+$ — швидкість; $W(t) \in \mathbb{R}^m$ — вектор зовнішніх впливів (швидкість вітру, висота хвиль, течія, льодова обстановка); $I(t) \in \mathbb{R}^n$ — вектор інформаційного супроводу (дані AIS, диспетчерські повідомлення, супутникові знімки).

Для врахування невизначеності приймаємо, що жоден із компонентів вектора $W(t)$ не має відомого ймовірнісного розподілу [7]. Замість цього задається лише інтервальна область можливих значень [7, 8]:

$$W_i(t) \in [w_i^{\min}, w_i^{\max}], \quad i = 1..m$$

Або, у загальнішому випадку, нечітка множина з функцією належності $\mu_{W_i}(x)$, яка не інтерпретується як ймовірність.

Інформаційний супровід $I(t)$ є результатом спостережень з обмеженою точністю та можливими пропусками [7]:

$$I(t) = H(S(t), \xi(t))$$

де H — нелінійна функція спостережень, $\xi(t)$ — невизначена перешкода з відомою лише межею: $\|\xi(t)\| \leq \Delta$.

Математична модель може бути запропонована у формі інтервальної динамічної

системи. Оскільки класичні ймовірнісні методи [6–8] (апріорні розподіли, байєсівське оновлення) незастосовні, пропонується використовувати «інтервальний аналіз» у поєднанні з «методом Монте-Карло без припущення про розподіл».

Рівняння руху транспортного засобу з урахуванням невизначеностей має вигляд [6]:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), w(t)),$$

де: $x(t) \in [x_1(t), x_2(t)]$ — позиція; $u(t)$ — керування (маршрут, швидкість); $w(t) \in W$ — невизначене збурення; W — компактна множина (інтервальний паралелепіпед).

У дискретному часі (крок Δt) модель записується як:

$$x_{k+1} = x_k + \Delta t \cdot f(x_k, u_k, w_k), \quad w_k \in [w^-, w^+]$$

Інформаційний супровід оцінюється через «нечіткий показник достовірності» $\rho_k \in [0,1]$, що обчислюється на основі збіжності даних з різних джерел (AIS, радар, візуальне спостереження):

$$\rho_k = 1 - \frac{\|I_k^{\text{спост}} - I_k^{\text{очік}}\|}{\|I_k^{\text{очік}}\| + \varepsilon}.$$

При $\rho_k < Q_{\text{кріт}}$ приймається рішення про інформаційну неповноту.

Класичний метод Монте-Карло вимагає знання розподілів випадкових величин. У нашому випадку ми не маємо розподілів, тому застосовується інтервальний метод Монте-Карло (Interval Monte Carlo, IMC) [7]. Розробимо алгоритм, які включає в себе такі етапи:

- 1) Задаються інтервали значень для кожного невизначеного параметра: $w_i \in [a_i, b_i]$.
- 2) Генерується N велика кількість сценаріїв, де кожен параметр w_i^j рівномірно (або за принципом мінімальної інформації — максимум ентропії) вибирається з інтервалу $[a_i, b_i]$.
- 3) Для кожного сценарію j моделюється траєкторія логістичної системи та обчислюється цільовий показник Q^j (час доставки, витрати пального, ризик зіткнення).
- 4) Отримується значення $\{Q^j\}_{j=1}^N$, що дає множину можливих значень без прив'язки до ймовірності. Частота появи певного значення Q серед сценаріїв не є ймовірністю в класичному розумінні — це лише індикатор можливості за гіпотези рівномірного розподілу невизначеності в межах інтервалів.

Для оцінки ймовірності успішного перевезення пропонується використовувати метод стохастичного домінування першого роду [6,7]:

$$P_{\text{успіх}} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I(Q^j \leq Q_{\text{lim}}),$$

де I — індикаторна функція. Ця величина інтерпретується не як об'єктивна ймовірність, а як частота прийнятих сценаріїв у рамках прийнятої моделі невизначеності.

Формули для розрахунку ймовірнісних характеристик перевезень сформуємо, незважаючи на неймовірнісну природу невизначеності, для потреб прийняття рішень ми можемо обчислювати наступні показники, як Інтервальний час доставки.

Час доставки вантажу T_{del} залежить від швидкості v та довжини маршруту L , але через невизначені впливи (течія, вітер) фактичний час є нечіткою величиною:

$$T_{\text{del}} = \frac{L}{v} + \sum_{i=1}^M \tau_i(w),$$

де $\tau_i(w)$ — затримки на i -й ділянці, що залежать від збурень.

Верхня та нижня межі часу доставки формують гарантований коридор, якій можна визначити за формулами:

$$T_{\min} = \min_{w \in W} T_{\text{del}}(w), \quad T_{\max} = \max_{w \in W} T_{\text{del}}(w)$$

Використовуємо функцію можливості Π та необхідності N за Дюбуа-Прадом [8]:

$$\Pi(T_{\text{del}} \leq T_{\text{plan}}) = \sup_{w: T_{\text{del}}(w) \leq T_{\text{plan}}} \mu_w(w),$$

$$N(T_{\text{del}} \leq T_{\text{plan}}) = 1 - \Pi(T_{\text{del}} > T_{\text{plan}}),$$

де $\mu_w(w)$ — функція належності нечіткої множини збурень.

Ризик інформаційної неповноти будемо визначати за умови, що ризик того, що система супроводу втратить контроль над вантажем через недостатність даних:

$$R_{info}(t) = \exp\left(-\frac{p(t) - p_{min}}{p_{max} - p_{min}}\right) \cdot I(p(t) < 0).$$

Розробимо алгоритм розрахунку на Python, створивши відповідні класи. Наприклад class LogisticsMonteCarlo представлено на рис.1. Розробимо діалогове вікно для вводу початкових параметрів, створивши окремий клас class LogisticsApp (рисунком 2). Результат показано на рис.3. Процес моделювання показано на рис.4.

```
class LogisticsMonteCarlo:
    def __init__(self, l_km, v_ship_kmh, v_current_min_ms, v_current_max_ms,
                 delay_lock_min_h, delay_lock_max_h, ais_error_km,
                 time_limit_h, num_scenarios=10000):
        """
        Параметри:
        l_km - довжина маршруту (км)
        v_ship_kmh - швидкість судна (км/год)
        v_current_min_ms, v_current_max_ms - мінімальна та максимальна швидкість течії (м/с)
        delay_lock_min_h, delay_lock_max_h - затримка в шлюзах (год)
        ais_error_km - похибка AIS (км), інтервал [-ais_error_km, ais_error_km]
        time_limit_h - ліміт часу доставки (год)
        num_scenarios - кількість сценаріїв Монте-Карло
        """
        self.l = l_km
        self.v_ship = v_ship_kmh
        self.v_current_range = (v_current_min_ms, v_current_max_ms)
        self.delay_lock_range = (delay_lock_min_h, delay_lock_max_h)
        self.ais_error_range = (-ais_error_km, ais_error_km)
        self.time_limit = time_limit_h
        self.N = num_scenarios
```

Рисунок 1 — Фрагмент коду, class LogisticsMonteCarlo

```
class LogisticsApp:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("Моделювання логістики водних перевезень в умовах  
self.root.geometry("650x700")

        # Змінні для введення
        self.l = tk.DoubleVar(value=700.0)
        self.v_ship = tk.DoubleVar(value=18.0)
        self.v_current_min = tk.DoubleVar(value=0.2)
        self.v_current_max = tk.DoubleVar(value=1.5)
        self.delay_min = tk.DoubleVar(value=0.5)
        self.delay_max = tk.DoubleVar(value=4.0)
        self.ais_error = tk.DoubleVar(value=0.3)
        self.time_limit = tk.DoubleVar(value=50.0)
        self.num_scenarios = tk.IntVar(value=10000)

        # Створення фреймів
        mainframe = ttk.Frame(root, padding="10")
        mainframe.grid(row=0, column=0, sticky=(tk.W, tk.E, tk.N, tk.S))
```

Рисунок 2 — Фрагмент коду, class LogisticsApp

Рисунок 3 — Діалогове вікно вводу параметрів

Розглянемо ділянку Дніпра (Київ — Херсон) довжиною 700 км. Невизначені параметри:

- швидкість течії: $v_{ntx} \in [0.2, 1.5]$ м/с,
- затримка в шлюзах: $\tau_{шлюз} \in [0.5, 4]$ год,
- похибка AIS-даних $\Delta_{AIS} \in [-0.3, 0.3]$ км.

Результат Монте-Карло при $N=10000$ циклів моделювання становить:

- медіанний час доставки: 52 год,
- інтерквартильний розмах: [44, 67] год,
- частота сценаріїв із часом доставки ≤ 48 год: 0.32.

Рисунок 4 — Результати моделювання

Для візуалізації результатів застосування запропонованого підходу використовуються наступні типи графіків.

Гістограма частот сценаріїв часу доставки показано на рис.5. На осі абсцис — час доставки (години), на осі ординат — кількість сценаріїв (тис.). Кожен стовпчик відображає, скільки з N реалізацій Монте-Карло дали певний інтервал часу. Це дає щільність можливих результатів при рівномірному покритті інтервалів невизначеності.

Графік функції належності для ймовірності успіху побудовано за методом α -зрізів:

$$P_{\text{успіх}}^{\alpha} = \left[\min_{w \in W_{\alpha}} P_{\text{успіх}}^{\alpha}(w), \max_{w \in W_{\alpha}} P_{\text{успіх}}^{\alpha}(w) \right],$$

де $W_{\alpha} = \{w: \mu_w(w) \geq \alpha\}$.

Результат розрахунку показано на рис.6

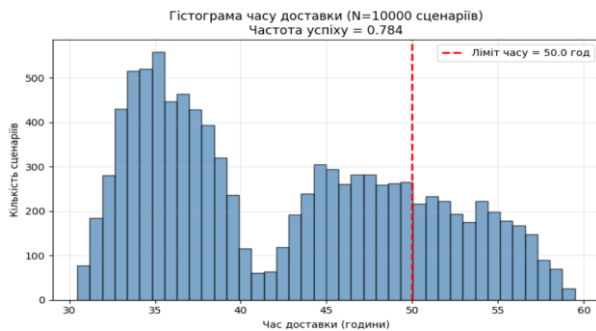


Рисунок 5 — Гістограма часу доставки

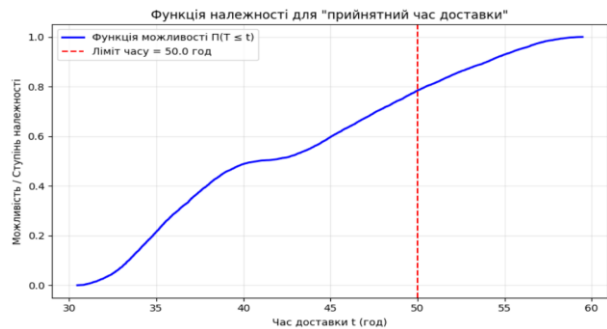


Рисунок 6 — Функція належності для параметру «прийнятний час доставки»

Висновки. Запропоновано формально-аксіоматичну модель інформаційного супроводу водних логістичних перевезень, яка не потребує апріорних ймовірнісних розподілів.

Обґрунтовано застосування методу інтервального Монте-Карло (ІМС) як основного обчислювального інструменту. Наведено формули для оцінки часових коридорів, функцій можливості та інформаційного ризику. Отримані графіки дозволяють інтерпретувати результати моделювання. Показано, що "ймовірність" у таких умовах слід розуміти як частоту сприятливих сценаріїв при рівномірному покритті інтервалів невизначеності, а саме: при $p > 0.8$ є висока достовірність, якщо $0.5 < p \leq 0.8$) помірна невизначеність, але при $p \leq 0.5$ — критична інформаційна неповнота.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dolgov D., Thrun S., Montemerlo M., Diebel J. Practical search techniques in path planning for autonomous driving. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*. 2008. Vol. 55, № 3–4. P. 293–316. Режим доступу: https://ai.stanford.edu/~ddolgov/papers/dolgov_gpp_stair08.pdf (дата звернення: 07.05.2026).
2. Pivtoraiko M., Kelly A. Efficient constrained path planning via search in state lattices // *Proceedings of the 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*. 2005. P. 1–8. Режим доступу: <https://www.cs.cmu.edu/~alonzo/pubs/papers/isairas05Planning.pdf>
3. Graph-based hierarchical control of thermal-fluid power flow systems / Pangborn H.C. and others. 2017 American Control Conference (ACC). Seattle, WA, USA, 2017. P. 2099–2105. DOI: <https://doi.org/10.23919/ACC.2017.7963262>.
4. Kelly A., Nagy B. Reactive nonholonomic trajectory generation via parametric optimal control // *The International Journal of Robotics Research*. 2003. Vol. 22, № 7–8. P. 583–601. DOI: <https://doi.org/10.1177/02783649030227008>.
5. LaValle S. M. *Planning algorithms*. Cambridge : Cambridge University Press, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511546877>.

6. Bielajew A. Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport. 2001. Режим доступу: <https://scispace.com/pdf/monte-carlo-theory-and-practice-3d5pq3fqs6.pdf> (дата звернення: 07.05.2026).
7. Haghighat A. Monte Carlo methods for particle transport. Boca Raton : CRC Press, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429198397>.
8. Dubois D., Prade H. Possibility theory, probability theory and multiple-valued logics: A clarification // Annals of Mathematics and Artificial Intelligence. 2001. Vol. 32. P. 35–66.

ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ ДЛЯ АВІАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Калашник Г.А., Голубенко Б.В.
Українська державна льотна академія
(Україна)

Вступ. Метеорологічне забезпечення є одним із ключових факторів безпеки польотів та ефективності аеронавігації. Погодні умови впливають на планування маршрутів, розрахунок пального, вибір ешелонів польоту, прийняття рішень щодо зльоту та посадки, а також на управління повітряним рухом. Відповідно до вимог Міжнародної організації цивільної авіації (International Civil Aviation Organization — ICAO), точність та своєчасність метеорологічної інформації є критичною складовою системи забезпечення безпеки польотів. Традиційні чисельні моделі прогнозування погоди забезпечують задовільні результати для великомасштабних процесів, однак мають обмеження у короткостроковому прогнозуванні локальних небезпечних явищ, таких як турбулентність, грози, обледеніння [1]. У зв'язку з цим зростає інтерес до застосування технологій штучного інтелекту (ШІ), здатних враховувати складні нелінійні залежності в атмосферних процесах [2; 3].

Актуальність досліджень. Основними метеорологічними факторами, що впливають на безпеку авіації є швидкість та напрямок вітру на різних ешелонах, грозова активність, турбулентність, обледеніння, видимість та нижня межа хмарності, зсув вітру. За даними Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО), понад 20% авіаційних інцидентів пов'язані з несприятливими погодними умовами [4]. Крім того, неточність метеорологічного прогнозу може призвести до перевитрат пального, затримок рейсів, збільшення навантаження на диспетчерські служби, підвищення ризику аварійних ситуацій [5]. ШІ-технології здатні підвищити точність короткострокових прогнозів та покращити їх просторову деталізацію. Розробка корекційних методів оцінки точності метеорологічних прогнозів та інтеграція традиційних та сучасних технологій дозволяють забезпечувати їх високу точність і надійність, сприяючи підвищенню безпеки польотів у цивільній авіації.

Постановка завдання. Завданням дослідження є порівняння результатів традиційних чисельних моделей та ШІ-моделей при оцінці точності прогнозування метеорологічних умов та визначення можливості використання ШІ-технологій для прогнозування метеорологічних параметрів, критичних для авіації (видимість, хмарність, грози, турбулентність, зсув вітру, обледеніння).

Результати. Оцінка точності прогнозування погодних умов для авіації з використанням технологій штучного інтелекту (ШІ) є одним з найбільш динамічних напрямків на перетині метеорології, машинного навчання та авіаційної безпеки. Станом на 2026 рік традиційні чисельні моделі (NWP — Numerical Weather Prediction) поступово доповнюються або навіть в деяких задачах замінюються ШІ-моделями на базі глибокого навчання (GraphCast, Pangu-Weather, FourCastNet, AIFS, GenCast, FengWu, ClimaX [6] тощо), а також спеціалізованими ML-моделями для прогнозування авіаційних явищ (турбулентність, зсув вітру, обледеніння). [6]. Прогнозування турбулентності за допомогою ML-моделей (Random Forest, XGBoost, LightGBM) показують суттєво кращі результати, ніж традиційні індекси (GTI, EDI, Ellrod тощо) [3]. Гібридні моделі глибинного навчання досягають 82–85% точності прогнозу напрямку вітру в межах $\pm 20^\circ$ (проти $\sim 64\%$ у GFS) [2]. Це критично важливо для складних аеродромів. Прогнози TAF (Terminal Aerodrome Forecast) та METAR за допомогою ML моделей LSTM, ANN та інших показують вищу точність метеопрогнозів, ніж класичні TAF у складних аеропортах [6].

Супутники, такі як NOAA та Copernicus, забезпечують отримання високоточних даних про температуру, вологість, рух повітряних мас і стан озонowego шару. Наприклад, використання даних з програми Copernicus може сприяти точнішому прогнозуванню

небезпечних погодних явищ, таких як грози, обледеніння чи сильні вітри, що особливо важливо для забезпечення безпеки польотів. Додатково до супутникових технологій важливу роль відіграють радіолокаційні системи. Міжнародний досвід свідчить про ефективність використання доплерівських радарів для моніторингу опадів, вітру та інших атмосферних явищ. Наприклад, у США система NEXRAD забезпечує постійний контроль за погодними умовами в реальному часі. Дослідження атмосферних факторів і їхнього впливу на навігацію та зв'язок також включають моделювання цих явищ. Чисельні моделі, такі як WRF (Weather Research and Forecasting), дозволяють прогнозувати атмосферні умови з високою точністю. Ці моделі враховують різні фактори, такі як температура, вологість, тиск і швидкість вітру, що дозволяє створювати тривимірні профілі атмосфери та оцінювати їхній вплив на радіосигнали [7].

Поряд із фізико-математичними моделями активно впроваджуються методи машинного навчання. Вони дозволяють аналізувати великі обсяги даних і виявляти складні нелінійні залежності, які важко формалізувати аналітично. Особливо ефективними для часових рядів є рекурентні нейронні мережі (RNN), що враховують послідовність спостережень і вплив попередніх станів системи. Серед основних переваг використання ШІ-технологій для забезпечення точними метеопрогнозами значна швидкість генерації прогнозу (секунди, перші хвилини замість годин), краще захоплення локальної / складної топографії, можливість використання даних з РС (TAMDAR, AMDAR, Mode-S, EHS) у реальному часі. Але існує значна кількість обмежень та недоліків у використанні ШІ для метеопрогнозів, зокрема недостатня узагальненість на нові регіони польотів/аеропорти, погана інтерпретованість даних, більш слабіше відтворення фізичних законів, ніж у традиційних методів, обмежена кількість якісних даних для навчання моделей щодо прогнозу рідкісних метеорологічних явищ. Тому на сьогодні існує потреба в реалізації використання гібридних фізико-нейромережових моделей, ансамблевих методів, графових нейронних мереж, трансформерів для часових рядів, інтеграції даних супутників та радарів у реальному часі.

У сучасних дослідженнях для прогнозування метеорологічних параметрів, критичних для авіації (видимість, хмарність, грози, турбулентність, зсув вітру, обледеніння), застосовуються декілька класів ШІ-моделей.

Глибинні рекурентні мережі (RNN, LSTM, GRU) використовуються для короткострокового прогнозу (0–6 год). Вони моделюють часову залежність параметрів METAR/TAF та забезпечують прогноз швидкості та напрямку вітру на різних ешелонах польоту. Їхня перевага у ефективному врахуванні часової кореляції, але, водночас, вони мають обмежену просторово-структурну чутливість.

Згорткові нейронні мережі (CNN) базуються на аналізі супутникових зображень (наприклад, дані EUMETSAT). За допомогою їх використання добре здійснюють детекцію грозових осередків, купчасто-дощових хмар та оцінку вертикального розвитку хмарності. Перевага їхнього використання у високій точності просторової класифікації.

Гібридні CNN-LSTM архітектури поєднують просторовий аналіз із часовою динамікою і використовуються для прогнозування розвитку конвективних систем в атмосфері. Вони дають приріст точності на 8–15% порівняно з чистими LSTM [2].

Трансформерні ШІ-моделі використовуються для багатофакторного прогнозу (висота, тиск, температура, вологість, струменеві течії) і є дуже ефективними для середньострокового метеопрогнозу (6–48 год). Вони забезпечують кращу генералізацію на великих масивах даних.

Графові нейронні мережі (GNN) моделюють атмосферу як просторово-зв'язану систему вузлів і використовуються для прогнозування турбулентності на маршрутах польоту повітряних суден.

Для формування якісних навчальних вибірок ШІ-моделей використовуються дані METAR, TAF, радіозондові профілі, супутникові зображення, радіолокаційні дані, виходи чисельних моделей, зокрема European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (модель

IFS), дані Національного управління океанічних та атмосферних досліджень США (National Oceanic and Atmospheric Administration USA) (модель GFS), Всесвітньої Метеорологічної Організації (глобальні стандарти обміну даними) [4].

Таким чином, найефективнішим є інтегрований підхід, який поєднує чисельні методи прогнозу погодних умов та ШІ-моделі, які працюють як інструмент для корекції прогнозів чисельних методів прогнозу або як завершальна прогностична система.

Алгоритм обробки даних гібридним методом у нашому проєкті включає такі кроки:

Крок 1. Базовий метеопрогноз від Європейського центру середньострокових прогнозів погоди ECMWF (European Centre for Medium-Range) Weather Forecasts.

Крок 2. Корекція локальних похибок через машинне навчання ML.

Крок 3. Постійне донавчання на реальних метеоданих METAR.

Крок 4. Оцінка невизначеності через ансамблеві мережі.

Інтеграція ШІ з чисельними моделями дозволяє зменшити обчислювальні витрати, підвищити просторову деталізацію, покращити прогноз екстремальних явищ, адаптувати моделі до локальних умов.

Висновок. Сучасне прогнозування погодних умов для сфери авіації є багаторівневою системою, що поєднує фундаментальні фізичні рівняння, статистичні методи аналізу, алгоритми машинного навчання, високопродуктивні обчислення. Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із створенням гібридних моделей, які поєднують фізичну інтерпретованість із гнучкістю технологій штучного інтелекту, що забезпечує підвищення точності, швидкості та адаптивності метеорологічних прогнозів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ang S. Precipitation forecasting using transformer: a comparative study with U-Net. Highlights in science. Eng. Technol. 2023. 39. <https://doi.org/10.54097/hset.v39i.6613>.
2. Haji-Aghajany S., Rohm W., Lipinski P., & Kryza M. Beyond the horizon: A comprehensive analysis of artificial intelligence-based weather forecasting models. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2025. 162. 112335. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112335>
3. Chen L., Zhong X., Zhang F. FuXi: a Cascade machine learning forecasting system for 15-day global weather forecast. Clim. Atmos. Sci. 2023. 6. 190. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00512-1>.
4. WMO No. 485. Manual on the Global Data-Processing and Forecasting System. Geneva. <https://bit.ly/4cMzbvc>
5. Kalashnyk G.A., Voroshylo D.S. Using of international experience to improve atmospheric research methods in Ukraine for civil aviation. Modern information and innovative technologies in transport (MINTT-2025): Proceeding of the 17th International Scientific and Practical Conference (Kherson, May 28–30, 2025). P.216-218.
6. Chen J., H'ohlein K., Lerch S. Spatial representation learning for ensemble weather simulations using invariant variational autoencoders. EGU General Assembly 2023. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1825>. 2023. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, Abstract EGU23-1825.
7. Kalashnyk G., Kalashnyk-Rybalko M.A. Architectural features of a promising intelligent space weather data processing system for increasing the efficiency of radio equipment of civil aviation for the conditions of Ukraine. Conference Proceedings, Int. Conf. "GeoTerrace-2024", 7-8 October 2024, Lviv, Ukraine (GeoTerrace'2024). By Publisher: EAGE, Vol. 2024 p.1–5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510090>

УДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ УПРАВЛІННЯ ПОЛЬОТОМ БПЛА

Калашник Г.А., Одайник Б.В.

*Українська державна льотна академія
(Україна)*

Вступ. Прогнозування погодних умов є ключовим фактором при плануванні та виконанні польотів безпілотними літальними апаратами (БПЛА) [1]. Традиційні метеорологічні моделі базуються на фізичних законах атмосфери та чисельних методах, проте їх точність обмежена через високі динамічні зміни метеопараметрів та локальні атмосферні явища [2]. Методи штучного інтелекту (ШІ) дозволяють аналізувати великі обсяги даних та виявляти закономірності, які складно моделювати традиційними чисельними методами. Використання ШІ у прогнозуванні погоди може забезпечити більш точну інформацію про вітер, турбулентність, опади в реальному часі.

Актуальність досліджень. Сучасні методи чисельного прогнозування погоди, попри високу деталізацію, часто не враховують локальні та швидкоплинні атмосферні явища, такі як мікротурбулентність, швидкі зміни вітру та формування грозових осередків. Це створює ризик аварій, затримок та зниження ефективності виконання завдань БПЛА. Застосування ШІ дозволяє інтегрувати великі обсяги даних із сенсорів, супутників та метеостанцій, виявляти нелінійні залежності між атмосферними параметрами та прогнозувати їх динаміку у реальному часі. Це відкриває нові перспективи для підвищення безпеки, автономності та точності управління БПЛА, роблячи дослідження актуальним для розвитку інтелектуальних авіаційних систем.

Постановка завдання. Автономні навігаційні системи для БПЛА досягли значних успіхів за останні роки. Ці системи зазвичай включають комбінацію датчиків, технології GPS та бортових комп'ютерів для визначення положення літального апарату, планування маршрутів та уникнення перешкод [3]. Однак більшість існуючих систем зосереджені переважно на статичних або повільно змінних факторах навколишнього середовища [4], з обмеженим урахуванням динамічних погодних умов [5]. Залишається потреба в більш комплексному підході, який може враховувати всю складність реальних погодних умов та їх потенційний вплив на роботу БПЛА, а також автоматизувати процес прийняття рішень щодо планування польоту, зберігаючи або покращуючи поточні стандарти безпеки БПЛА.

Результати. Дослідження ми проводили етапами, які включали збір та підготовку даних для побудови моделей прогнозування метеоумов, обрання найбільш оптимальних моделей ШІ для прогнозування ключових параметрів атмосфери, інтеграцію прогнозних моделей у систему управління польотом БПЛА. В подальшому дослідженнями передбачено симуляційне тестування та валідацію ефективності розробленої системи прогнозування у різних метеоумовах.

Використання ШІ у прогнозуванні погодних умов для БПЛА дозволяє підвищити точності прогнозів за рахунок аналізу великих даних із різних джерел, зокрема, метеостанцій, супутників, бортових сенсорів, здійснювати прогнозування погодних умов в реальному часі, що дозволяє оперативно змінювати маршрут і поведінку БПЛА. Розроблювана нами система розпізнавання небезпечних погодних умов на основі ШІ для безпечного планування маршрутів БПЛА складається з кількох взаємопов'язаних модулів (рис. 1). Архітектура розроблена для обробки різних вхідних даних, виконання аналізу в режимі реального часу та генерування рекомендацій щодо оптимального маршруту з урахуванням обмежень безпеки.

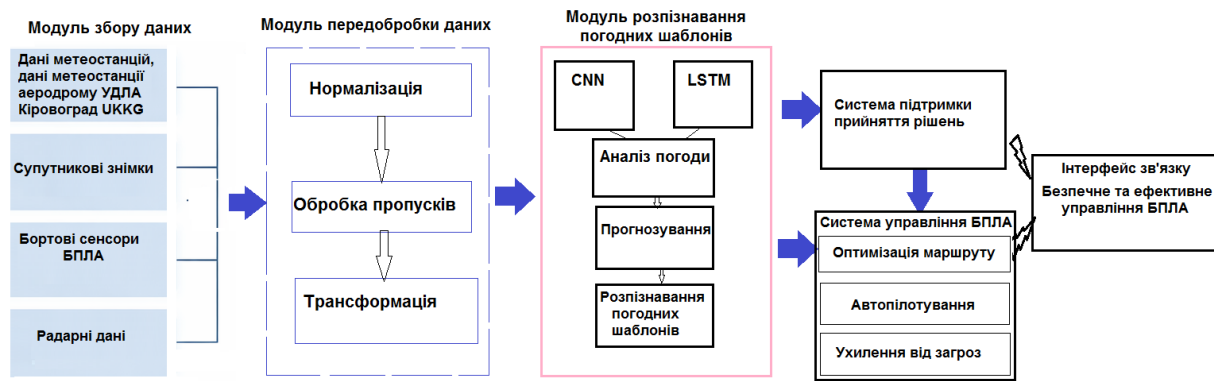


Рисунок 1 — Узагальнена архітектура удосконаленої системи прогнозування погодних умов для покращення управління польотом БПЛА

Модуль збору даних відповідає за збір та попередню обробку різних типів даних, пов'язаних з погодою, з кількох джерел. Ці джерела включають: 1) супутникові знімки; 2) наземні метеостанції; 3) метеорологічні радіолокаційні системи; 4) атмосферні зондування; 5) числові моделі прогнозування погоди. Дані збираються в режимі реального часу та в історичному форматі, щоб забезпечити повне уявлення про поточні умови та їх потенційний майбутній розвиток. Поточні та прогнозні метеодані метеостанції аеродрому Кіровоград UKKG Української державної льотної академії дають достатньо інформації для побудови реалістичних моделей прогнозування погоди, придатних для використання у модельованих симуляціях. Дані про вітер і тиск — ключові параметри для моделей LSTM та оптимізації маршруту БПЛА. Ґрунтуючись на реальних даних метеостанції аеродрому Кіровоград UKKG, можлива оцінка безпеки польоту та адаптація маршрутів БПЛА у реальному часі.

Основою розробленої системи прогнозування погодних умов є механізм розпізнавання небезпечних погодних шаблонів, який використовує комбінацію методів машинного навчання для аналізу та інтерпретації отриманих метеорологічних даних. Механізм призначений для виявлення різних погодних явищ, що стосуються операцій БПЛА, зокрема, конвективну активність (грози), турбулентність, умови обледеніння, сильний вітер та зсув вітру, низька видимість (туман). Механізм розпізнавання небезпечних погодних шаблонів використовує архітектуру глибокого навчання, засновану на згорткових нейронних мережах (CNN) та мережах довгої короткочасної пам'яті (LSTM) для обробки просторових та часових даних про погоду відповідно. Компонент CNN відповідає за вилучення просторових ознак із супутникових знімків та радіолокаційних даних, тоді як мережа LSTM фіксує часові закономірності та тенденції в часових рядах метеорологічних даних. Вихідні дані цих мереж об'єднуються та обробляються через повністю пов'язані шари для отримання оцінок ймовірності різних погодних явищ.

Алгоритм планування маршруту бере вихідні дані механізму розпізнавання погодних шаблонів та поєднує їх з іншими відповідними факторами для створення оптимальних траєкторій польоту для БПЛА. Алгоритм використовує багатоцільовий підхід оптимізації, враховуючи такі критерії: 1) безпека (уникнення небезпечних погодних умов); 2) ефективність (мінімізація часу польоту та витрати палива); 3) відповідність нормативним вимогам (дотримання обмежень повітряного простору); 4) вимоги, що стосуються конкретної місії БПЛА.

Система підтримки прийняття рішень (СППР) буде інтегрувати результати механізму розпізнавання погодних моделей та алгоритму планування маршруту, щоб надавати практичні рекомендації для операцій БПЛА. СППР використовує експертну систему на основі правил у поєднанні з басівською мережею для оцінки рівнів ризику та визначення відповідних дій. Передбачається, що система буде враховувати такі фактори, як, небезпека та близькість виявлених погодних умов, рівень достовірності прогнозів

погоди, можливості та обмеження БПЛА, пріоритети та обмеження місії БПЛА. На основі цих факторів система підтримки прийняття рішень згенерує рекомендації, які можуть включати: 1) продовжити рух за запланованим маршрутом; 2) коригувати маршрут, щоб уникнути погодніх небезпек; 3) затримати виліт або повернути БПЛА на базу. Комунікаційний інтерфейс буде забезпечувати безперебійний обмін даними між системою на базі ІІІ та бортовими системами БПЛА. Він використовуватиме стандартизований протокол для передачі інформації про погоду, рекомендацій щодо маршрутів та команд керування.

Компоненти системи з ІІІ, зокрема механізм розпізнавання погодніх шаблонів, потребують ретельного навчання та валідації. Для навчання та тестування моделей ІІІ нами було використано багатопотокові дані. Вони включали метеорологічні дані — швидкість і напрямок вітру, температура, вологість, атмосферний тиск, інтенсивність опадів. Дані були взяті з метеостанції аеродрому Кіровоград (UKKG) за період 2017–2022 рр., оброблені для видалення пропусків та аномалій. Бортові сенсори БПЛА здатні надавати у реальному часі дані швидкості, висоти, координати GPS, параметри турбулентності. Вони також будуть використані для підтвердження достовірності прогнозів та навчання моделей. Процес навчання буде включати такі кроки: 1) попередня обробка та доповнення даних; 2) вибір архітектури моделі та налаштування гіперпараметрів; 3) перенесення знань з попередньо навчених моделей на пов'язані завдання; 4) перехресна валідація для оцінки узагальнення моделі; 5) точне налаштування на специфічних для предметної області даних.

На наступному етапі досліджень буде розроблено симуляційну платформу, що відтворює польоти БПЛА у різних метеоумовах та проведено не менше 100 сценаріїв симуляційних польотів для оцінки точності прогнозів, надійності маршруту та безпеки польоту, а також автономності системи та часу реагування на критичні метеоумови.

Висновки. У результаті дослідження розроблена блок-схема удосконаленої комплексної системи розпізнавання погодніх умов на основі ІІІ для безпечного планування маршрутів в автономних БПЛА, яка на відміну від попередніх включає архітектуру глибокого навчання, що поєднує CNN та LSTM для точного розпізнавання шаблонів небезпечних погодніх моделей саме для БПЛА, адаптивний алгоритм планування маршруту для суттєвого зниження ризиків, пов'язаних з небезпечними погодніми явищами та систему підтримки рішень, призначену надавати своєчасні та відповідні рекомендації щодо операцій автономних БПЛА за різних погодніх сценаріїв.

ЛІТЕРАТУРА

8. Haji-Aghajany S., Rohm W., Lipinski P., & Kryza M. Beyond the horizon: A comprehensive analysis of artificial intelligence-based weather forecasting models. *Engineering Applic. of Artif. Intelligence*. 2025. 162. 112335. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112335>
9. Chen L., Zhong X., Zhang F. FuXi: a Cascade machine learning forecasting system for 15-day global weather forecast. *Clim. Atmos. Sci.* 2023. 6. 190. <https://doi.org/10.1038/s41612-023-00512-1>.
10. Калашник Г. А., Калашник-Рибалко М. А. Ознаки та критерії функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання сучасного повітряного судна та перспективні напрямки його розвитку. *Зб. наук. праць Харківського нац. унів. Пов. сил*. 2021. №2 (42). С.7-15. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.68.01>
11. Калашник Г.А., Бслий С.В. Корекція навігаційної інформації систем літальних апаратів в умовах аномальних збурень на базі прогнозуючих моделей. *Наука і техніка сьогодні*. 2025. №10 (51). С.1585-1598. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-10\(51\)-1585-1598](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-10(51)-1585-1598)
12. Tymochko O., Fustii V., Kolesnyk G., Olizarenko S., Kalashnyk G., Kulish R., Tymoschuk O., Galinskji D. Inter-Object Navigation of Unmanned Aerial Vehicles to Increase the Efficiency and Accuracy of Inspection of Power Lines. *Problemele Energeticii Regionale*. 1(57). 2023. P.28–38. DOI: 10.52254/1857-0070.2023.1-57.03

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ВІДДАЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ

¹Мостовой А.А., ²Сологубов П.П., ¹Поливода В.В.

¹Херсонська державна морська академія
(Україна)

²Приватне підприємство «Відеокомпроект»
(Україна)

Вступ. Актуальна задача безпеки та моніторингу віддалених об'єктів вимагають створення на сучасному етапі технічних рішень, здатних функціонувати приховано, ефективно та незалежно від умов навколишнього середовища [1–3]. У цьому контексті особливого значення набувають сейсмічні системи виявлення, які забезпечують контроль території без використання традиційних оптичних засобів спостереження.

Принцип функціонування таких систем ґрунтується на реєстрації динамічного впливу об'єктів на пружне середовище. На відміну від класичних методів, система не здійснює безпосереднього «спостереження» за об'єктом, а фіксує його присутність через аналіз збурень, що виникають у середовищі. Будь-яке переміщення, зокрема кроки людини, рух транспортних засобів або спроби несанкціонованого проникнення, супроводжується генерацією механічних коливань, які поширюються у ґрунті та можуть бути зафіксовані високочутливими сенсорами.

У якості первинного перетворювача в таких системах широко використовується геофон — інерційний датчик, що забезпечує перетворення механічних коливань у електричний сигнал. Використання геофонів у поєднанні з сучасними методами цифрової обробки сигналів, зокрема спектрального аналізу та кореляційних методів, дозволяє реалізувати не лише факт детектування, але й здійснювати класифікацію типів впливів.

Актуальність досліджень. Актуальність розробки автоматизованих систем дистанційного контролю на основі сейсмічних датчиків обумовлена необхідністю забезпечення високої достовірності виявлення подій у складних і змінних умовах експлуатації. Однією з ключових проблем є вплив зовнішніх факторів на процес вимірювання та точність реєстрації сейсмічних сигналів.

Ефективність функціонування сейсмічних систем значною мірою визначається умовами поширення пружних хвиль у середовищі. Фізико-механічні характеристики ґрунтів, такі як щільність, вологість, структура та пружні властивості, мають суттєвий вплив на процес передачі сигналів. Неоднорідність середовища призводить до затухання коливань, зміни їх амплітудно-частотних характеристик і спотворення інформаційної складової сигналу, що ускладнює його подальшу обробку та інтерпретацію.

Суттєвий вплив на результати вимірювань мають також зовнішні завади різної природи. Атмосферні фактори, зокрема вітер та опади, а також біологічні чинники (активність тварин) формують стохастичний фоновий шум, який знижує відношення сигнал/шум і ускладнює виділення корисної інформації. У таких умовах традиційні методи обробки сигналів виявляються недостатньо ефективними, що обумовлює необхідність застосування стійких алгоритмів фільтрації та аналізу.

Важливим фактором є також умови встановлення сенсорів. Глибина їх розміщення та просторова конфігурація безпосередньо впливають на характеристики приймання сигналів, формують зону чутливості системи та визначають ефективність її функціонування в цілому.

Додаткову актуальність дослідженню надають практичні вимоги до сучасних систем моніторингу, зокрема необхідність забезпечення їх низької вартості, простоти виготовлення та експлуатації, можливості автономної роботи, застосування у важкодоступних умовах і на великих територіях із використанням бездротових каналів зв'язку.

Таким чином, актуальність даного дослідження полягає у необхідності комплексного

дослідження впливу зовнішніх факторів, оптимізації параметрів системи та розробки ефективних методів обробки сигналів, що забезпечують підвищення достовірності та завадостійкості автоматизованих систем дистанційного контролю.

Постановка задачі. Метою роботи є розробка системи дистанційного контролю віддалених об'єктів, що поєднує фізичні принципи реєстрації сейсмічних сигналів з ефективними алгоритмами їх обробки та розпізнавання.

Результати досліджень. У рамках проведеного дослідження розроблено автоматизовану систему дистанційного контролю віддалених об'єктів, яка базується на використанні сейсмічного датчика типу геофон та сучасних методів цифрової обробки сигналів. Запропоноване рішення орієнтоване на забезпечення високої достовірності виявлення подій в умовах дії зовнішніх завад і змінних характеристик середовища.

Розроблена система (рис. 1) є багатокомпонентним апаратно-програмним комплексом, що включає: вимірювальний вузол на базі геофона; підсилювальний тракт аналогового сигналу; аналого-цифровий перетворювач (АЦП); процесорний модуль обробки даних; модуль глобального позиціонування (GPS); радіочастотний передавальний модуль (RF); автономне джерело живлення; програмне забезпечення мобільного пристрою.

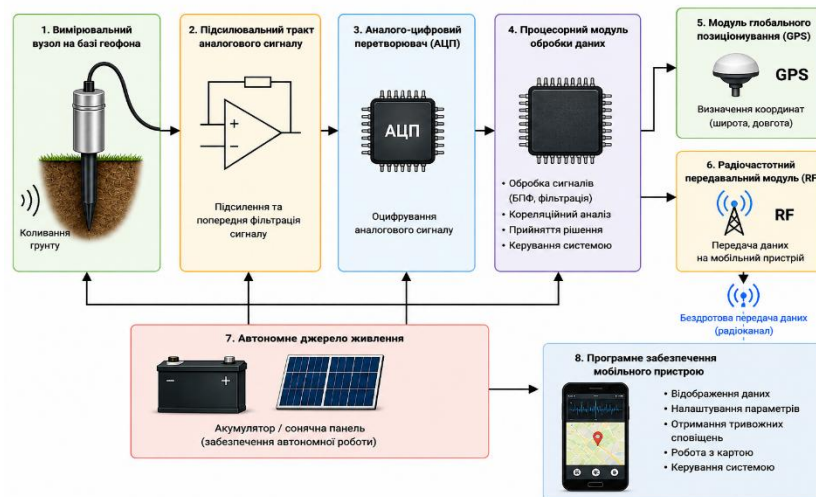


Рисунок 1 — Структурна схема обладнання системи дистанційного контролю

Функціонування системи реалізується під керуванням розробленого спеціалізованого програмного забезпечення, яке встановлюється на мобільних пристроях (смартфон або планшет). Програмна частина виконує комплекс функцій, зокрема налаштування параметрів, збір, попередню обробку та аналіз сигналів, а також прийняття рішень щодо наявності контрольованої події. Такий підхід забезпечує гнучкість системи та можливість її адаптації до різних умов експлуатації.

Ключовим принципом роботи системи є порівняння поточних сигналів, зареєстрованих геофоном, із заздалегідь сформованими еталонними образами [4-5]. Розпізнавання сигналів здійснюється із застосуванням кореляційного аналізу, який дозволяє оцінити ступінь подібності між поточним сигналом і еталонними даними. Для забезпечення адаптивності системи передбачено набір параметрів, що можуть змінюватися залежно від умов експлуатації.

Висновок. У результаті проведеного дослідження розроблено автоматизовану систему дистанційного контролю віддалених об'єктів, що базується на використанні сейсмічного датчика типу геофон та сучасних методів цифрової обробки сигналів. Запропонований підхід поєднує фізичні принципи реєстрації коливань пружного середовища з алгоритмами спектрального та кореляційного аналізу, що дозволяє забезпечити високий рівень достовірності виявлення контрольованих подій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Polyvoda O., Lytvynchuk D., Polyvoda V. (2020) Monitoring Subsystem Design Method in the Information Control System. In: Lytvynenko V., Babichev S., Wojcik W., Vynokurova O., Vyshemyrskaya S., Radetskaya S. (eds) Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI'2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1020. Springer, Cham, pp 294-303. ISSN:2194-5357 https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_21
2. Kondratieva I.U. Using entropy estimation to detect moving objects / I.U.Kondratieva, G.V. Rudakova, O.V. Polyvoda, Yu.O. Lebedenko, V.V. Polyvoda// 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD) Proceedings October 22-24, 2019, Kyiv, Ukraine, pp. 270-273. ISBN: 978-1-7281-2591-6 doi: <https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943839>
3. Поливода О.В., Назмєєв І.О. Метод інтелектуальної ідентифікації рухомих об'єктів на основі кластеризації ознак у мел-кепстральному просторі // Системні технології. Вип. 4(165). Дніпро, 2026. С. 108-119. DOI: 10.34185/1562-9945-4-165-2026-11
4. Rudakova H., Polyvoda O., Kondratieva I., Polyvoda V., Rudakova A., Rozov Y. (2022) Research of Acoustic Signals Digital Processing Methods Application Efficiency for the Electromechanical System Functional Diagnostics. In: Babichev S., Lytvynenko V. (eds) Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 77. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82014-5_23 Print ISBN 978-3-030-82013-8, Online ISBN 978-3-030-82014-5. pp. 349-366.
5. Kondratieva I.U., Rudakova H.V., Polyvoda O.V., Lebedenko Yu.O., Polyvoda V.V. Using entropy estimation to detect moving objects. 2019 IEEE 5th International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Development (APUAVD-2019) October 22-24, 2019, Kyiv, Ukraine Proceedings, P. 270–273. <https://doi.org/10.1109/APUAVD47061.2019.8943839>

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА В ЗАДАЧАХ КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНИМИ АВТОНОМНИМИ СУДНАМИ

Пелихівський Л.О.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Безекіпажні автономні судна (БАС) розглядаються як один із ключових напрямів розвитку морського транспорту, однак їх безпечне функціонування неможливе без формалізації невизначеності навігаційного середовища. Для Maritime Autonomous Surface Ships (MASS) поряд із очікуваним зниженням ролі людської помилки з'являються нові ризики; в оцінюванні ризиків MASS серед найбільш значущих загроз виділяються взаємодія з пілотованими суднами та виявлення об'єктів, а в огляді COLREGs (Міжнародні правила попередження зіткнень суден у морі) для MASS підкреслено, що сама мовна форма правил і регуляторні бар'єри ускладнюють надійне автономне ухвалення рішень [1,2].

Особлива складність полягає в тому, що БАС працює в динамічному, частково спостережуваному середовищі, де навігаційна інформація формується з неоднорідних джерел: AIS (автоматична ідентифікаційна система), GNSS (глобальна навігаційна супутникова система), радіолокаційних і допоміжних даних. Сучасний огляд морських PNT-систем (позиціонування, навігація та синхронізація часу) показує, що навіть базові задачі позиціонування та злиття даних обмежуються відсутністю або неточністю вимірювань, загрозами spoofing/jamming та слабкою адаптивністю до мінливих морських умов. Дослідження асоціації AIS і радарних трас у внутрішніх водних шляхах додатково підтверджує, що в умовах звивистих фарватерів і множинних зустрічей саме зв'язування різномірних спостережень стає окремою науковою проблемою [3,4].

Отже, для задач оцінювання ризику зіткнення, планування траєкторії та ухвалення рішень БАС недостатньо детермінованого опису навігаційної ситуації як набору «точних» параметрів. Необхідним є застосування моделі, яка дозволяє подати похибки сприйняття, невизначеності відносного руху, неоднозначність намірів інших суден, вплив стану зовнішнього середовища, часове старіння даних та нормативну неоднозначність Міжнародних правил попередження зіткнень суден (COLREGs) в єдиному структурованому описі [1–4].

Метою дослідження є розробка концептуальної моделі оцінювання факторів невизначеності навігаційного середовища для задач керування БАС, яка може слугувати основою для подальшої розробки методів запобігання зіткненням та планування траєкторій руху автономних суден.

Проведений аналіз першоджерел показав, що у науковій літературі [1-5] розглядаються різні підходи до оцінювання факторів невизначеності: перший клас підходів базується на застосуванні імовірнісних моделей та моделей, керованих даними, які використовують статистичні та алгоритмічні засоби для підвищення точності PNT-рішень і узгодження різномірних джерел. Їх перевага полягає у здатності працювати з шумом, пропусками даних і конфліктними спостереженнями; водночас ці підходи переважно зосереджені на точності позиціонування та агрегування даних і самі по собі ще не дають повноцінної інтерпретації намірів, правил COLREGs та навігаційного ризику як семантичної сутності [3], [4].

Другий клас підходів ґрунтується на нечіткій логіці, де індекс ризику зіткнення (CRI) визначається на основі DCPA (дистанція найкоротшого зближення), TCPA (час до найкоротшого зближення) та споріднених параметрів. Для традиційних нечітких систем існують обмеження, пов'язані з тим, що функції належності не враховують лінгвістичну та часову невизначеність. Тому розвиваються інтервальні нечіткі системи другого типу. Такі моделі краще узгоджуються з реальним навігаційним середовищем і дозволяють раніше та

плавніше виявляти небезпечні зближення [5]. Подальший розвиток цього напрямку полягає в переході від оцінювання поточного CRI до прогнозування майбутнього стану: аналіз руху судна, що зберігає курс і швидкість за правилами розходження дає змогу прогнозувати майбутнє значення CRI та отримувати часовий запас для маневру, хоча ускладнює модель і вимагає часових даних для навчання [6].

Третій клас становлять моделі на основі теорії свідчень та гібридні моделі. Теорія доказів Демпстера–Шафера приваблива тим, що дозволяє поєднувати нечітку, неповну та суперечливу інформацію у вигляді базових ймовірнісних призначень. У задачі розрахунку CRI цей підхід добре відображає невизначеність факторів зближення, однак за збільшення кількості незалежних факторів його обчислювальна складність зростає, що обмежує пряме використання в реальному часі [7]. Саме тому з'являються гібридні рішення, які поєднують нечіткі системи з теорією доказів. Такі моделі вже орієнтовані не лише на одночасну оцінку, а й на часову еволюцію невизначеності, що є принципово важливим для динамічного навігаційного середовища [8].

Четвертий клас підходів базується на байєсівських мережах та їх динамічних модифікаціях. Для MASS це особливо важливо, оскільки дефіцит історичних відмов і складні причинно-наслідкові зв'язки між ризик-факторами ускладнюють класичне статистичне оцінювання. FTA-FBN-підхід (поєднання аналізу дерева відмов і нечіткої байєсівської мережі) був запропонований саме для ризику зіткнення MASS за умов невизначених даних і нестачі історичної статистики; перевагою такого підходу є здатність до прямого прогнозування та зворотної діагностики ризику [9]. Окремий напрям репрезентують динамічні байєсівські мережі (DBN), які застосовуються для виведення намірів інших суден за їх реально спостережуваною поведінкою. Значущість цього напрямку зумовлена тим, що відкрите формулювання COLREGs і наявність неформалізованих практик роблять моделювання намірів критично важливим для автономного судноводіння [10].

П'ятий клас підходів пов'язаний із моделями безпечної зони навколо судна та розширеними CRI-моделями. Динамічна модель домену судна вже враховує курс зустрічі суден, інтенсивність руху, відносну швидкість суден і стан судноводія, тобто поєднує геометричні, кінематичні та поведінково-людські чинники. Водночас слід враховувати, що така модель у відповідному дослідженні свідомо не враховує вітер, течію та хвилювання, що виявляє неповноту просторово-середовищного опису [11]. Інші роботи розширюють класичний CRI шляхом включення погодних факторів: зокрема, нечітка модель ECRI-W об'єднує базовий CRI з індексом факторів навколишнього середовища на основі швидкості поривів вітру, видимості та напрямку вітру. Перевага такого рішення полягає у наближенні ризикової оцінки до реальних погодних умов, але обмеженням залишається те, що навігаційне середовище все ще зводиться здебільшого до розширення CRI, а не до цілісної багатокомпонентної моделі невизначеності [11,12].

Результати досліджень. Проведений аналіз показав, що сучасні дослідження вже пропонують ефективні інструменти для врахування окремих аспектів невизначеності: злиття даних для узгодження неоднорідних сенсорних потоків; нечітку логіку та інтервальні нечіткі системи для формування нечітких висновків щодо рівня ризику; теорію доказів Демпстера–Шафера для роботи з конфліктними свідченнями; байєсівські мережі для подання причинно-наслідкових зв'язків і намірів суден; моделі суднового домену та показники CRI для просторово-кінематичного опису навігаційної ситуації [3–12].

Однак наведені підходи переважно залишаються фрагментарними: одні з них описують невизначеність вимірювань, інші формують показник CRI, оцінюють наміри суден або модифікують модель суднового домену. Через це у задачах керування БАС недостатньо інтегрованими залишаються сенсорні похибки та затримки, невизначеність відносного руху, непередбачуваність маневру інших суден, гідрометеорологічні умови, часове старіння інформації та неоднозначність формального застосування COLREGs у багатосуднових ситуаціях. Власне вказану невідповідність між багатфакторною природою

навігаційного середовища і локальним характером більшості наявних моделей доцільно вважати основною науковою проблемою керування БАС.

З метою вирішення вказаної проблеми пропонується застосовувати таку концептуальну модель оцінки навігаційного середовища, що інтегрує різні види невизначеності навігаційної ситуації в єдиний опис:

$$U(t) = \{U_s(t), U_k(t), U_b(t), U_e(t), U_t(t), U_c(t)\} \quad (1)$$

де: U_s — сенсорна невизначеність у момент часу t ; U_k — кінематична невизначеність; U_b — поведінкова невизначеність; U_e — невизначеність зовнішнього середовища; U_t — просторово-часова невизначеність; U_c — нормативна невизначеність, пов'язана з формалізацією COLREGs. У прикладному аспекті такий вектор може слугувати аргументом для узагальненої функції ризику, представлені у вигляді:

$$R = F(X_{rel}(t), U(t)) \quad (2)$$

де: $X_{rel}(t)$ — відносні параметри зближення суден. Цей запис є саме концептуальним.

Компонент U_s повинен охоплювати похибки AIS/GNSS/радарних вимірювань, пропуски та конфліктність спостережень, а також неоднозначність асоціації цілей. Компонент U_k доцільно пов'язати з невизначеністю оцінювання курсу, швидкості, прискорення, DCPA, TCPA, відносного руху та похідних показників CRI. Компонент U_b має подавати невизначеність намірів судна-цілі, можливе відхилення від очікуваного маневру та неоднозначність поведінки в контексті COLREGs. Така декомпозиція спирається на результати досліджень щодо невизначеності PNT-даних, нечіткого оцінювання показника CRI, злиття доказів за Демпстером–Шафером, байєсівського оцінювання намірів та моделювання суднового домену [3], [11].

Компонент U_e пропонується трактувати ширше, ніж у більшості наявних моделей: не лише як окремий погодний фактор, а як узагальнений опис впливу вітру, хвилювання, течій, видимості та інших гідрометеорологічних чинників. Вищевказане обумовлено тим, що в сучасних роботах або прямо зазначається неврахування вітру, течій і хвиль у моделі суднового домену [11], або враховується лише частина погодних змінних, зокрема пориви вітру, видимість і напрям вітру [12]. Компонент U_t має відображати часове застарівання даних, асинхронність каналів спостереження, затримки між вимірюванням, обробленням і прийняттям рішення, а також зміну ступеня невизначеності на горизонті прогнозування. Нарешті, компонент U_c повинен відображати не просто тип навігаційної, а міру її нормативної відповідності: зокрема, наскільки формалізоване трактування COLREGs є чітким у багатосудновому, змішаному або нетиповому сценарії [2], [10], [12].

Принциповою відмінністю моделі, що пропонується, є те, вона не зводить навігаційну ситуацію лише до геометрії зближення: DCPA, TCPA, відносний пеленг, співвідношення швидкостей і модель суднового домену інтерпретуються лише як частина загального вектору невизначеності, а не як його повний заміник. Запропонований підхід забезпечить можливість подальшої побудови більш змістовних CRI-моделей із урахуванням навігаційних правил та алгоритмів уникнення зіткнень, які працюють не лише з “ризиком зближення”, а з повним контекстом навігаційної ситуації [5,12].

Висновки. Врахування впливу факторів невизначеності оцінки навігаційних ситуацій є найважливішою проблемою для процесів керування БАС, оскільки виникає вже на рівні сприйняття середовища і далі накопичується під час оцінювання ризику, прогнозування поведінки, інтерпретації правил і синтезу маневру.

Запропоновано концептуальну модель $U = \{U_s, U_k, U_b, U_e, U_t, U_c\}$, що дозволяє представити навігаційне середовище БАС як багатокомпонентну структуру. Така постановка створює методологічну основу для подальшої розробки більш адекватних моделей запобігання зіткненням, управління ризиками, та планування траєкторій руху БАС орієнтованих на неповну, неточну, суперечливу та часово мінливу навігаційну інформацію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Chang, C.-H., Kontovas, C. A., Yu, Q., Yang, Z. Risk assessment of the operations of maritime autonomous surface ships. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021;207:107324. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107324>.
2. Chang, C.-H., Wijeratne, I. B., Kontovas, C. A., Yang, Z. COLREG and MASS: Analytical review to identify research trends and gaps in the development of autonomous collision avoidance. *Ocean Engineering*. 2024;302:117652. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117652>.
3. Ziółkowska, N., Szłapczyńska, J. From mathematical to AI-based methods: A review of marine PNT data fusion and uncertainty handling. *Computer Science Review*. 2026;60:100864. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2025.100864>.
4. Lei, J., Sun, Y., Wu, Y., Zheng, F., He, W., Liu, X. Association of AIS and Radar Data in Intelligent Navigation in Inland Waterways Based on Trajectory Characteristics. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(6):890. <https://doi.org/10.3390/jmse12060890>.
5. Ohn, S.-W., Namgung, H. Interval Type-2 Fuzzy Inference System Based on Closest Point of Approach for Collision Avoidance between Ships. *Applied Sciences*. 2020;10(11):3919. <https://doi.org/10.3390/app10113919>.
6. Namgung, H., Ohn, S.-W. Fuzzy Inference and Sequence Model-Based Collision Risk Prediction System for Stand-On Vessel. *Sensors*. 2022;22(13):4983. <https://doi.org/10.3390/s22134983>.
7. Abebe, M., Noh, Y., Seo, C., Kim, D., Lee, I. Developing a Ship Collision Risk Index estimation model based on Dempster-Shafer theory. *Applied Ocean Research*. 2021;113:102735. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102735>.
8. Park, J. Estimation of Vessel Collision Risk Under Uncertainty Using Interval Type-2 Fuzzy Inference Systems and Dempster–Shafer Evidence Theory. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2026;14(1):34. <https://doi.org/10.3390/jmse14010034>.
9. Li, P., Wang, Y., Yang, Z. Risk assessment of maritime autonomous surface ships collisions using an FTA-FBN model. *Ocean Engineering*. 2024;309(Part 2):118444. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118444>.
10. Rothmund, S. V., Tengesdal, T., Brekke, E. F., Johansen, T. A. Intention modeling and inference for autonomous collision avoidance at sea. *Ocean Engineering*. 2022;266:113080. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113080>.
11. Liu, D., Zheng, Z., Liu, Z. Research on Dynamic Quaternion Ship Domain Model in Open Water Based on AIS Data and Navigator State. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024;12(3):516. <https://doi.org/10.3390/jmse12030516>.
12. Korupoju, A. K., Kapadia, V., Vilwathilakam, A. S., Samanta, A. Ship Collision Risk Evaluation using AIS and weather data through fuzzy logic and deep learning. *Ocean Engineering*. 2025;318:120116. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.120116>.

PATTERN RECOGNITION IN THE TASK OF PREDICTING THE STATE OF A SHIP'S ELECTRICAL POWER SYSTEM

*Samoilov O.O., Polyvoda V.V.
Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)*

Introduction. The marine sector is subject to rigorous environmental regulations. This pushes a move away from diesel engines toward hybrid and fully electric ships. These vessels use intricate, isolated electrical microgrids. It is very important to have the reliability of the ship's electrical power system (SEPS) in place. This is particularly the case for autonomous navigation. In autonomous systems, electrical system failures are highly detrimental to their performance and for safety. So, the fleet technical maintenance is changing as a result. Operators are giving up on classic run-to-failure or reactive maintenance. They are shifting towards a predictive maintenance approach. Predictive maintenance continuously monitors equipment health. It can anticipate functional degradation before a critical failure occurs. This minimizes physical inspections unnecessarily, reduces significant operational downtime, and increases vessel safety [1].

Relevance of research. The limitations of common ship alarm systems create a need for advanced predictive diagnostics. Traditional marine alarms are merely reactive. They do not generate alerts until an emergency deviation has been noted. Moreover, human operators experience cognitive overload from false alarms. This results in missed actual events and decreased diagnostic reliability. On the other hand, today's vessels are equipped with cutting-edge Power Management Systems (PMS). These systems serve as the central nervous system. They continuously log immense datasets concerning engine power, voltages, currents, and temperatures. But these data are not being thoroughly analyzed or used in real time at this point. Intelligent models are needed to convert raw operational data into maintenance insights. An advanced summary of the intelligent approaches available already is required urgently. It's a tool to help engineers choose the most appropriate instrument for diagnosing SEPS at an early stage [2].

The problem statement. Specifically, the current research objective is to develop a review analysis on pattern recognition technologies. It assesses their applicability to predictive diagnostics tasks in a SEPS. To accomplish this goal, specific review tasks are formulated. Task one: What is pattern recognition strictly within the context of ship telemetry? The second task is to characterize and categorize the current techniques, algorithms, and application tools. These instruments must be capable of predicting the operational state of ship generators and complex electrical networks.

Research results. Ship telemetry pattern recognition is an automated classification process. It assigns the current technical state of a SEPS to a specific class. Common classifications are «normal», «pre-fault wear», and «critical anomaly». This assignment is based entirely on the analysis of an input feature vector extracted from operational data. This process works effectively when the input features are selected. Key characteristics for SEPS are vibration, currents, voltage, temperature, and insulation resistance. Insulation resistance is essential because ships operate in a high-humidity, high-salinity environment. These conditions cause rapid dielectric deterioration. High-frequency partial discharge detection and infrared thermal analysis are used to identify nanoscale insulation defects. Structural integrity is tracked by vibration monitoring. It can detect micro-spalling or mechanical loosening in rotating machinery before complete failure [3].

Analytical methods can consist of simple statistics to advanced neural networks. Basic deviation analysis and physical observers are used for statistical methods. They work well for simple, clearly defined components. But these methods are severely limited when analyzing intricate nonlinear processes in a dynamic microgrid [3].

Classical machine learning (ML) excels at analyzing static indicators. Support Vector Machine (SVM) models create multidimensional boundaries to distinguish normal operations from anomalies. The k-Nearest Neighbors (k-NN) classifiers utilize distance metrics to classify states. It works perfectly well for unsupervised outlier detection. Decision Trees and their

ensemble versions classify states by recursively splitting features into groups. They are quite interpretable and robust to noisy sensor readings. Furthermore, Random Forest (RF) extends this concept through dynamic ensemble selection, making it highly robust against outliers and particularly useful for analyzing structured tabular sensor data [4].

Deep Learning relies heavily on Artificial Neural Networks to extract features. They use Recurrent Neural Networks (RNNs) and Long Short-Term Memory (LSTM) models for the maritime sector, with an emphasis on marine systems. They are well-suited to time-series data and especially good for processing it. LSTMs successfully simulate the dynamic changes in SEPS indicators over time, including load fluctuations and battery state-of-charge dynamics. Additionally, one-dimensional Convolutional Neural Networks (1D-CNN) offer strong timing-modeling capabilities; they extract multi-scale fault features and maintain high classification accuracy even under severe electromagnetic interference in ship environments [5]. In addition, hybrid physics-constrained deep learning models are maturing as well. These models make predictions that obey the laws of physics during transient grid phenomena [6].

Modern predictive architectures also depend on certain data sources and software designs. Highly automated vessels ships rely on onboard sensors, programmable controllers, and PMS networks to generate continuous data [7]. Software implementation relies heavily on standard programming languages. Python is the industry standard for building these models [8]. Engineers utilize specialized machine learning libraries. Classical ML models are utilized with libraries like scikit-learn, and the complex matrix operations required for deep neural networks are handled by TensorFlow [8].

A comparative overview of these algorithms is presented in Table 1 below.

Table 1 — A comparative overview of the algorithms

Method Category	Algorithm	Primary Capability	Best Suited For
Statistical	Deviation Analysis	Highly interpretable, low computation.	Simple component baselines.
Classical ML	Support Vector Machine	Defines clear boundaries in feature space.	Static state classification.
Classical ML	k-Nearest Neighbors	Outlier detection via distance metrics.	Mixed-value datasets.
Classical ML	Decision Trees	Robust against noisy sensor readings.	Structured tabular data.
Classical ML	Random Forest	Dynamic ensemble selection, it resists outliers.	Structured tabular sensor data.
Deep Learning	LSTM / RNN	Captures long-term temporal dependencies.	Dynamic time series prediction.
Deep Learning	1D-CNN	Extracts multi-scale features under high noise.	Vibration and timing data processing.

Conclusions. Pattern recognition is a very powerful instrument for updating fleet maintenance. It facilitates the critical shift of SEPS from reactive monitoring to proactive, predictive maintenance. The systematic review shows that the selection of a mathematical algorithm is influenced by various types of datasets. Conventional machine learning approaches, such as SVMs and k-NN, and Random Forests, are well-suited and efficient for static state classification. On the other hand, there are many advanced neural networks, such as LSTMs and CNNs, which are used to predict the time-varying nonlinear evolution of a defect accurately. Modern tools have building blocks, such as Python, TensorFlow, and scikit-learn, to implement such algorithms. The results of this analysis lay a strong theoretical foundation. This foundation also directly facilitates the development of deeper practical research and hyper-specific, digital predictive models for autonomous ship systems.

REFERENCES

1. Tsoumpris, C., & Theotokatos, G. (2025). Energy management and health monitoring for hybrid ship power plants. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 24(4), 320–337. <https://doi.org/10.1080/20464177.2025.2518782>
2. Xiaojian Xu, Xiping Yan, Kun Yang, Jiangbin Zhao, Chenxing Sheng, Chengqing Yuan, Review of condition monitoring and fault diagnosis for marine power systems, *Transportation Safety and Environment*, Volume 3, Issue 2, June 2021, Pages 85–102, <https://doi.org/10.1093/tse/tdab005>
3. Sun, J., Sun, P., Lin, B., & Li, W. (2025). Evolution of Shipboard Motor Failure Monitoring Technology: Multi-Physics Field Mechanism Modeling and Intelligent Operation and Maintenance System Integration. *Energies*, 18(16), 4336. <https://doi.org/10.3390/en18164336>
4. Uyanık, T., Bakar, N. N. A., Kalenderli, Ö., Arslanoğlu, Y., Guerrero, J. M., & Lashab, A. (2023). A Data-Driven Approach for Generator Load Prediction in Shipboard Microgrid: The Chemical Tanker Case Study. *Energies*, 16(13), 5092. <https://doi.org/10.3390/en16135092>
5. Branco, N. W., Cavalca, M. S. M., Stefenon, S. F., & Leithardt, V. R. Q. (2022). Wavelet LSTM for Fault Forecasting in Electrical Power Grids. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 22(21), 8323. <https://doi.org/10.3390/s22218323>
6. Wang, J., Dai, X., Zhang, M., You, K., & Liu, J. (2026). A Physics-Constrained Hybrid Deep Learning Model for State Prediction in Shipboard Power Systems. *Modelling*, 7(2), 65. <https://doi.org/10.3390/modelling7020065>
7. Kalafatelis, A. S., Nomikos, N., Giannopoulos, A., Alexandridis, G., Karditsa, A., & Trakadas, P. (2025). Towards Predictive Maintenance in the Maritime Industry: A Component-Based Overview. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 425. <https://doi.org/10.3390/jmse13030425>
8. Pookkuttath, S., Rajesh Elara, M., Sivanantham, V., & Ramalingam, B. (2022). AI-Enabled Predictive Maintenance Framework for Autonomous Mobile Cleaning Robots. *Sensors*, 22(1), 13. <https://doi.org/10.3390/s22010013>

ANALYTICAL ASSESSMENT OF HULL-LENGTHENING EFFECTS ON SHIP CONTROLLABILITY WITH INTEGRATED ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS

¹Shumylo O., ²Píštěk V., ¹Yarovenko V., ¹Melnyk O.

¹Odesa National Maritime University

(Ukraine);

²Brno University of Technology

(Czech Republic)

Introduction. Modern maritime transport increasingly applies integrated electric propulsion systems due to their high energy efficiency, maneuverability, and adaptability to intelligent control systems. At the same time, modernization of ships often includes hull-lengthening procedures aimed at increasing cargo or passenger capacity. Such structural modifications inevitably influence hydrodynamic characteristics, inertia parameters, and controllability of the vessel.

Traditional approaches to maneuverability assessment mainly analyze hull geometry and propulsion systems separately, while transient operating modes of electric propulsion plants remain insufficiently investigated. This creates difficulties in predicting maneuverability changes during ship modernization. Therefore, the development of analytical approaches capable of integrating hull geometry variations with electric propulsion dynamics represents an актуальне scientific and practical task.

Research relevance. The critical importance of this study is underscored by the fundamental shifts currently reshaping the maritime industry's technological landscape. The imperative for this analytical framework is driven by several converging factors:

Table 1 — Key Research Drivers and Methodological Contributions of the Proposed Controllability Assessment Framework

Research Driver	Existing Limitation	Proposed Contribution	Expected Outcome
Advanced electric and hybrid propulsion systems	Traditional maneuverability models do not account for electric drive dynamics and transient torque response.	Integration of electric propulsion behavior into controllability assessment.	More accurate prediction of maneuvering performance.
Increasing navigational safety requirements	Existing approaches insufficiently evaluate controllability after structural modifications.	Introduction of safety-oriented maneuverability evaluation criteria.	Improved operational safety and maneuver precision.
Need for rapid pre-design assessment	CFD-based methods are computationally expensive for early-stage analysis.	Development of a simplified analytical assessment framework.	Faster feasibility analysis and design optimization.
Coupled hull–propulsion dynamics	Hydrodynamics and propulsion are often analyzed separately.	Unified modeling of hydrodynamic and propulsion interactions.	More realistic representation of ship behavior during maneuvers.
Modernization and hull modification projects	Existing tools inadequately capture structural–propulsion interaction effects.	High-fidelity diagnostic methodology for modified vessels.	Reliable assessment of modernization impact on controllability.

Objectives of the study. The central objective of this research is to establish a comprehensive analytical framework for evaluating the impact of hull-lengthening modifications

on the controllability of vessels equipped with integrated electric propulsion systems. Unlike conventional methods that treat structural changes and propulsion dynamics as decoupled phenomena, this study aims to synthesize these elements into a unified predictive model that explicitly accounts for the transient operating modes of the electric drive complex. The ultimate goal is to provide a robust methodology that bridges the gap between early-stage structural design and operational maneuvering safety.

To fulfill this objective, the research first focuses on the systematic identification of the dominant dimensionless parameters that govern vessel controllability. By isolating these key variables, it becomes possible to understand the complex sensitivity of the ship's maneuvering performance to both geometric scaling and the power-to-weight characteristics of the propulsion plant. Following this parametric identification, the study centers on the development of high-fidelity, regression-based analytical dependencies. These mathematical models are designed to accurately determine the characteristic anchor points of controllability diagrams, thereby enabling the rapid synthesis of performance profiles under various rudder deflection angles without the immediate need for computationally intensive numerical simulations.

Furthermore, a significant portion of the study is dedicated to a rigorous evaluation of how specific hull-lengthening increments affect the ship's fundamental maneuverability characteristics. By analyzing the interaction between increased hull inertia and the dynamic response of the electric propulsion system, the research seeks to quantify the limits of structural modification that can be undertaken while still maintaining course stability and maneuvering compliance. Ultimately, this integrated approach provides a sophisticated tool for ensuring that ship modernization strategies are both economically viable and inherently safe within the dynamic constraints of the maritime environment.

Main material. The proposed analytical framework combines transient-mode modelling of integrated electric propulsion systems, screening experiments based on the Random Balance Method, and regression analysis of controllability indicators. The methodology enables analytical evaluation of ship manoeuvrability while accounting for interactions between hull geometry and propulsion-system dynamics. In contrast to conventional approaches, where hydrodynamic and propulsion subsystems are analyzed independently, the developed framework integrates both components into a unified controllability assessment environment. Such integration allows improving the accuracy of maneuverability prediction under modernization scenarios involving hull-lengthening procedures.

The integrated propulsion complex considered in the study includes generator units, electric propulsion motors, frequency converters, propellers, steering devices, and centralized control systems. The transient operating modes of these components substantially influence vessel dynamic response during maneuver execution, particularly under rapid rudder-angle variations and trajectory correction processes. Therefore, the proposed methodology introduces generalized dimensionless parameters capable of characterizing coupled hydrodynamic–electromechanical interactions.

The controllability assessment is based on characteristic points of the controllability diagram and generalized dimensionless parameters, including propulsion power-to-weight ratio N_x , hydrodynamic interaction coefficients C_{21} , and added-mass parameters. These variables form the basis for constructing regression-based analytical dependencies describing the relative trajectory curvature and maneuvering response of the vessel under different modernization conditions.

The relative trajectory curvature was determined using regression analytical dependencies of the following type:

$$(L/R)_{40} = 0.501 - 0.231N_x + 0.075C_{21}. \quad (1)$$

The obtained analytical relationship demonstrates that controllability characteristics are strongly affected by the balance between propulsion-system power characteristics and hydrodynamic interaction effects. The regression-based approach significantly reduces

computational complexity compared with full-scale CFD simulations while maintaining sufficient analytical accuracy for preliminary engineering evaluations.

To evaluate the influence of modernization, hull-lengthening scenarios of $0.08L$, $0.10L$, $0.12L$, and $0.16L$ were investigated. The obtained results demonstrated only moderate variation of manoeuvrability characteristics and acceptable operational stability for all analyzed configurations.

Table 2 — Analytical evaluation of controllability indicators under hull-lengthening scenarios

Hull elongation	Relative curvature (L/R)	Controllability degradation index	Hydrodynamic stability trend
0.08L	0.515	0.042	Stable
0.10L	0.520	0.051	Stable
0.12L	0.524	0.061	Moderately stable
0.16L	0.532	0.079	Reduced stability margin

The presented results indicate a gradual increase in relative trajectory curvature and controllability degradation index with increasing hull elongation. However, the observed changes remain within acceptable maneuverability limits for practical ship operation. The study confirms that moderate structural modernization does not critically deteriorate navigational controllability when integrated electric propulsion systems are properly coordinated with hydrodynamic parameters.

Figure 1 illustrates the coupled evolution of the principal controllability indicators under progressive hull-lengthening conditions. The obtained results demonstrate a gradual increase in the relative trajectory curvature L/R and controllability degradation index D_c as the hull elongation ratio increases from $0.08L$ to $0.16L$. Simultaneously, the hydrodynamic interaction coefficient C_{21} exhibits moderate growth, indicating strengthening hydrodynamic coupling effects caused by structural modification of the vessel hull.

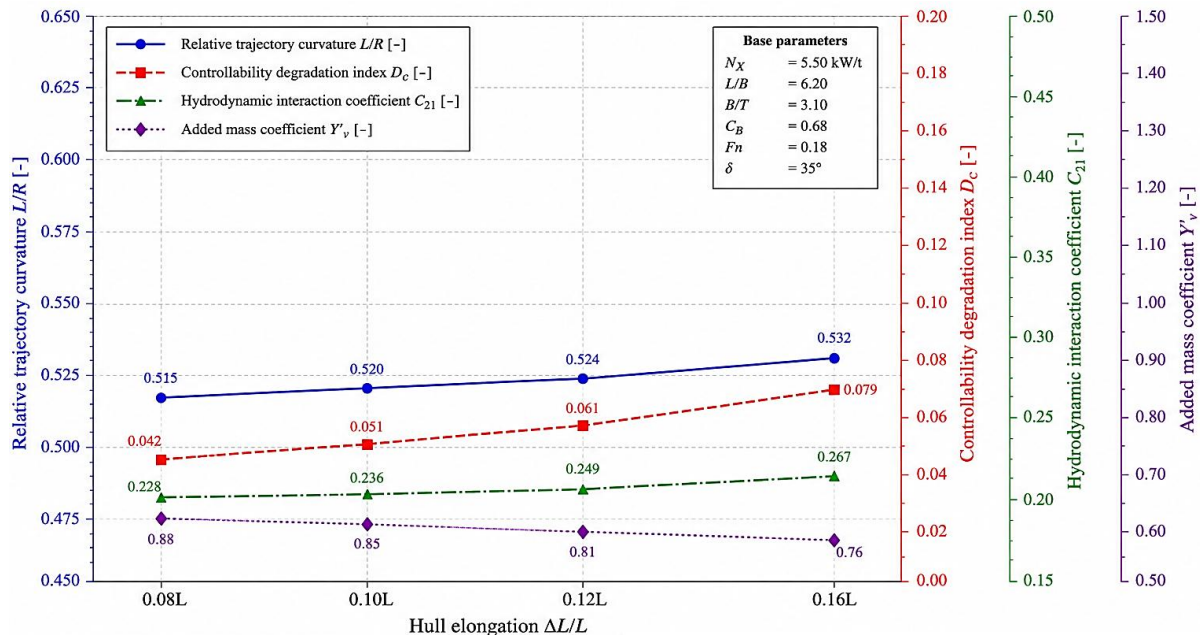


Figure 1 — Evolution of controllability indicators under hull-lengthening scenarios

In contrast, the added-mass coefficient γ_v decreases with increasing hull elongation, reflecting redistribution of inertial hydrodynamic effects during maneuver execution. Despite the observed nonlinear interaction between hydrodynamic and propulsion-system parameters, the investigated modernization scenarios preserve acceptable maneuverability and operational

stability characteristics.

The obtained dependencies confirm that moderate hull-lengthening procedures can be implemented without critical deterioration of navigational controllability for vessels equipped with integrated electric propulsion systems.

Conclusions. An analytical methodology for evaluating hull-lengthening influence on the controllability of ships equipped with integrated electric propulsion systems has been developed. The proposed framework combines transient propulsion modelling, screening experiments, and regression analysis for rapid assessment of maneuverability characteristics under modernization conditions.

The conducted analysis demonstrated that hull elongation within the range of $0.08L - 0.16L$ produces only moderate influence on vessel controllability and hydrodynamic stability. The maximum variation of relative trajectory curvature remained within acceptable operational limits, confirming the feasibility of moderate structural modernization without substantial deterioration of maneuverability performance.

The developed methodology may be effectively applied during:

- preliminary ship modernization studies;
- maneuverability assessment procedures;
- intelligent decision-support systems;
- digital twins of maritime transport systems;
- safety-oriented operational planning.

The proposed analytical framework provides a computationally efficient alternative to large-scale numerical simulations and can serve as an effective engineering tool for early-stage assessment of modernization strategies for advanced electric-propelled maritime transport systems.

REFERENCES

1. Shumylo, O., Yarovenko, V., Malaksiano, M., & Melnyk, O. (2023). Comprehensive assessment of hull geometry influence of a modernized ship on maneuvering performance and propulsion system parameters. *Pomorstvo*, 37(2), 314–325. <https://doi.org/10.31217/p.37.2.8>
2. Melnyk, O., Onyshchenko, S., Píštěk, V., & Kučera, P. (2026). Analytical evaluation of hull-design parameters affecting ship controllability and dynamic behaviour with integrated electric-propulsion systems. *Journal of Marine Science and Engineering*, 14(1), 1–20.
3. Zhang, X., Wang, C., Jiang, L., An, L., & Yang, R. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state-of-the-art survey. *Ocean Engineering*, 235, 109380. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380>
4. Liu, X., He, Y., Zhang, K., Mou, J., & Zhao, X. (2025). Research on the decision-making method for autonomous navigation for the ocean-going ship in the ships' routing waters. *Ocean Engineering*, 323, 120641. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120641>
5. Wang, S., Li, L., Wang, X., Wang, H., & Mao, W. (2026). Modeling the decision-making trigger for autonomous ship collision avoidance via imitating human social cognitive process. *Regional Studies in Marine Science*, 95, 104852. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2026.104852>
6. Cui, Z., Guan, W., & Zhang, X. (2025). Gated transformer-based proximal policy optimization for multiple marine autonomous surface ships collision avoidance decision-making strategy. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 156, 111242. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111242>
7. Song, R., Papadimitriou, E., Negenborn, R. R., & Van Gelder, P. (2025). Experimental trust dynamics modelling in supervised autonomous ship navigation in collision avoidance scenarios. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 34, 101634. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101634>
8. Palmer, K. P., & Irani, R. A. (2025). Neural networks for high accuracy short term ship

motion predictions with applications to autonomous UAVs. *Aerospace Science and Technology*, 168, 110964. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2025.110964>

9. Lai, L., Liu, C., He, Z., Li, M., Fu, Z., & Chu, X. (2025). A novel waterway navigability assessment method based on encounter safety analysis of ship autonomous navigation. *Ocean Engineering*, 342, 121388. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121388>

10. Kurdiuk, S., Dreliuk, V., Melnyk, O., Onishchenko, O., Fomin, O., Píštěk, V., & Kučera, P. (2025). Development of a high reliability hybrid data transmission system for unmanned surface vehicles under interference conditions. *Drones*, 9(3), 179. <https://doi.org/10.3390/drones9030174>

ВДОСКОНАЛЕННЯ ПІД РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ СУДНОВИМ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ

Тимофеев К.В., Топалов О.І., Багін Є.П.
Херсонська державна морська академія
(Україна)

Вступ. Однією з основних тенденцій розвитку суднової електроенергетики є постійне зростання потужності суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) та встановленого електрообладнання. У міру зростання потужності СЕЕС ускладнюються їх структура, структура електричних мереж, удосконалюються системи автоматичного регулювання, управління, захисту та контролю. Основним джерелом електроенергії на судні є дизель-генератор.

Актуальність досліджень. З метою забезпечення стабільності постачання електроенергії необхідно мати постійний контроль та керування розподілом активної та реактивної потужностей аварійного дизель-генератора. Енергетична система динамічна, попит суднових споживачів електроенергії постійно відхиляється від нормального значення, що потребує швидкої реакції на зміну навантаження. Це особливо стосується для суден з електрорушійними які виконують задачі динамічного позиціонування. Автоматичний контроль повинен діяти замкненою схемою, щоб виявити зміни потужності споживачів та розпочати дії для усунення відхилень. Розробка системи управління дизель-генератором СЕЕС з метою утримання належної якості електроенергії, що генерується, є актуальною.

Постановка задачі. У взаємно з'єднаній енергосистемі для генератора встановлено обладнання регулювання частоти навантаження (load frequency control (LFC)) та AVR. Схематична схема контуру управління напругою та частотою представлена на рисунку 1. Регулятори встановлюються для певного робочого стану та дбають про невеликі зміни навантаження для підтримання величини частоти та напруги в заданих межах.

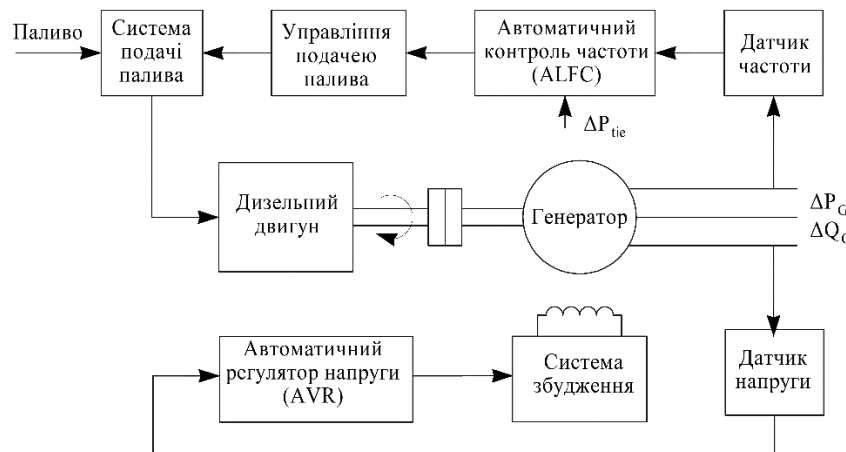


Рисунок 1 — Контрури управління АДГ

Для оцінки ефективності ПІД-регулятора застосовуються методи інтегральної абсолютної похибки (integrated absolute error (IAE)), інтеграл від квадрата помилки (integral of squared-error (ISE)) або інтеграл від квадрата помилки виваженої за часом (integrated of time-weighted-squared-error (ITSE)). Метод ITSE часто використовується при проектуванні систем управління, так як його можна аналітично оцінити в частотній області.

Запропоновано застосувати критерій ефективності в часовій області для оцінки ПІД-регулятора. Вибір кращих параметрів управління K_p , K_i , K_d може дати хороший результат, який призведе до мінімізації критеріїв ефективності в часовій області. Ці критерії ефективності у часовій області включають перевищення M_p , час підйому t_r , час встановлення t_s та стаціонарну помилку E_{ss} . Запропонований критерій ефективності

визначається таким чином:

$$\min_{K: \text{stabilizing}} W(K) = (1 - e^{-\beta}) \cdot (M_p + E_{SS}) + e^{-\beta} (t_s - t_r), \quad (1)$$

де $K \in [k_p, k_i, k_d]$, β — ваговий коефіцієнт.

Критерій ефективності $W(K)$ може задовольнити вимоги, використовуючи значення вагового коефіцієнта β . Можна встановити β більше 0,7, щоб зменшити перевищення і стаціонарну помилку. З іншого боку, можна встановити менше, ніж 0,7, щоб зменшити час підйому та час встановлення [1, 2].

Оскільки компоненти енергосистеми нелінійні, в процесі проектування регуляторів LFC та AVR використовується лінеаризована модель навколо робочої точки. Проте регулятори на основі лінеаризованих моделей не здатні підтримувати варіації параметрів для стабільності роботи. Коли процес стає занадто складним для опису аналітичними моделями, він не буде ефективно контролюватися традиційними регуляторами фіксованого посилення.

Результати досліджень. Для покращення перехідної характеристики AVR дизель-генератора запропоновано PID-регулятор із використанням методу оптимізації рою частинок (particle swarm optimization (PSO)). Цей метод є надійним у вирішенні проблем, що характеризуються нелінійністю та недиференційованістю, множинними оптимумами та високою розмірністю через адаптацію до збурень. Кожна частинка в PSO летить в пошуковому просторі зі швидкістю, яка динамічно регулюється відповідно до власного досвіду польоту та досвіду польотів своїх супутників. Кожна частинка розглядається як об'ємна частка в g -розмірному просторі пошуку. Кожна частинка відстежує свої координати в проблемному просторі, які пов'язані з найкращим рішенням, яке досягнуто в цей час. Це значення називається $pbest$. Ще одне найкраще значення, яке відстежується глобальною версією оптимізатора треків частинок, є загальним найкращим значенням, і його положення, отримане до цих пір будь-якою часткою в групі, називається $gbest$.

Концепція PSO складається з часу кожного кроку, зміни швидкості кожної частинки до $pbest$ та $gbest$ її положення. Прискорення зважується випадковим параметром, з окремими випадковими числами, які генеруються для прискорення в напрямку наступного $pbest$ та $gbest$ її положення [3, 4].

Алгоритм PSO використовується для визначення трьох параметрів оптимального регулятора k_p , k_i і k_d , таким чином, щоб керована система могла отримати якісний сигнал управління.

Щоб застосувати метод PSO для пошуку параметрів регулятора, використовуємо термін «група». Визначено три параметри регулятора k_i , k_p і k_d , для утворення групи $K := [k_p, k_i, k_d]$. Ці параметри визначаються як дійсні значення. Якщо в популяції є n груп, то є чисельність масиву $n \times 3$.

Визначимо функцію оцінки f як оціночну значимість кожного окремої групи в масиві:

$$f = \frac{1}{W(K)} \quad (2)$$

Функція оцінки f є зворотною критерію ефективності $W(K)$ (1). Звідси випливає, що чим менша цінність групи, тим вища її оцінка значимості.

Для того, щоб обмежити оціночну значимість у межах розумного діапазону, необхідно застосувати критерій Рауса-Гурвіца для перевірки стабільності системи з замкнутим контуром перед оцінкою значимості групи. Якщо група задовольняє вимогам стійкості критерію Рауса-Гурвіца, застосованого до характеристичного рівняння системи, то він є можливою групою, а значення $W(K)$ мале. У протилежному випадку значення групи обмежується дуже великою позитивною константою [5].

Щоб перевірити ефективність регулятора PSO-PID, було проведено моделювання

високошвидкісної системи AVR. Структурна схема системи AVR з ПІД-регулятором показана на рисунку 2. Нижня та верхня межі трьох параметрів регулятора наведено в таблиці 1.

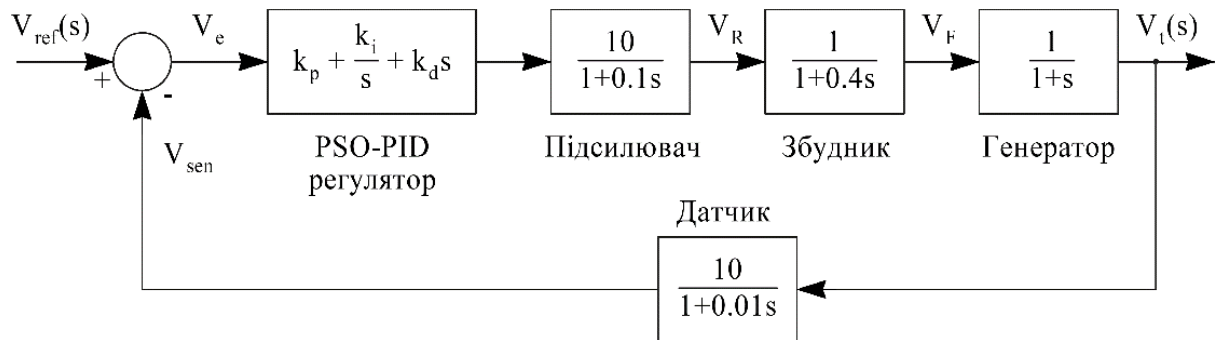


Рисунок 2 — Структурна схема системи AVR з ПІД-регулятором

Межі зміни параметрів регулятора: $0 < k_p < 1$; $0 < k_i < 1,5$; $0 < k_d < 1$.

Для перевірки ефективності PSO-PID регулятора при пошуку параметрів PID-регулятора використовуються наступні параметри PSO:

- параметри групи, $0 < k_p < 1$; $0 < k_i < 1,5$; $0 < k_d < 1$;
- розмір популяції дорівнює 50;
- ваговий коефіцієнт інерції змінюється в межах $0,4 < w < 0,9$;
- межа зміни швидкості дорівнює половині значення зміни параметрів групи;
- постійні прискорення $c_1 = c_2 = 2$.

Результати моделювання, що показали найкраще рішення, наведені в таблиці 1. На рисунку 3 показано перехідну характеристику термінальної напруги AVR з PSO-PID регулятором

Таблиця 1 — Результати застосування PSO-PID регулятора

β	Число ітерацій	k_p	k_i	k_d	$M_p, \%$	E_{ss}	t_s, c	t_r, c	Оцінка значимості
1,0	200	0,6570	0,5389	0,2458	1,16	0	0,4025	0,2767	1,4583
1,5	200	0,6254	0,4577	0,2187	0,44	0	0,4528	0,3070	1,2303

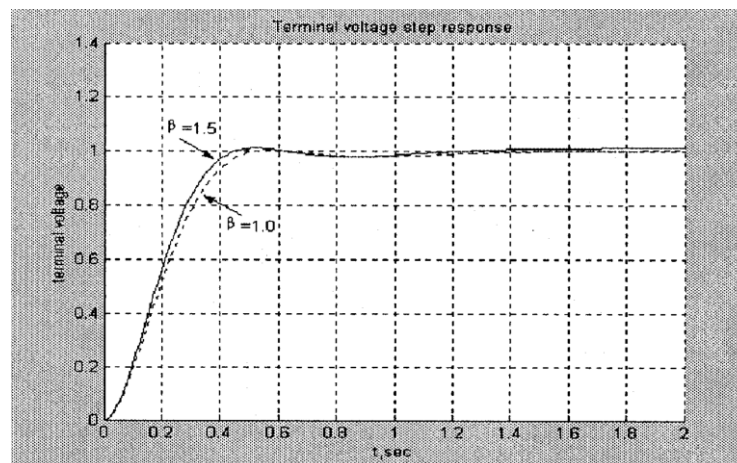


Рисунок 3 — Перехідна характеристика термінальної напруги AVR з PSO-PID регулятором

Висновки. Таким чином, з метою подолання недоліків звичайних регуляторів в роботі запропоновано PSO-PID регулятор управління напругою та частотою дизель-генератора для різних умов навантаження та регулювання. Алгоритм PSO використовується для визначення трьох параметрів оптимального регулятора k_p , k_i , k_d ,

таким чином, щоб керована система могла отримати якісний сигнал управління. Відповідний вибір вагового коефіцієнта інерції забезпечує баланс між глобальними та локальними дослідженнями, що вимагає в середньому меншої кількості ітерацій для знаходження досить оптимального рішення. Розроблено алгоритм пошуку параметрів налаштування та виконано аналіз динаміки PSO-PID регулятора.

ЛІТЕРАТУРА

1. Rodriguez, E. X. (2024). Particle Swarm Optimization for Training Quadrotor PID Controller [Master's thesis, The University of Texas Rio Grande Valley]. ScholarWorks @ UTRGV. <https://scholarworks.utrgv.edu/etd/1494>
2. Rahayu, E. S., Ma'arif, A., & Cakan, A. (2022). Particle swarm optimization (PSO) tuning of PID control on DC motor. *International Journal of Robotics and Control Systems*. Vol. 2, No. 2, 2022, pp. 435-447.
3. Gruber, L., Büchi, R. (2024). Particle Swarm Optimization for Tuning PID Parameters to Control General Systems. In: Arai, K. (eds) *Intelligent Systems and Applications*. IntelliSys 2024. *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 1067. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66431-1_6.
4. Mustafa, N., & Hashim, F. H. (2020). Design of a predictive PID controller using particle swarm optimization. *International Journal of Electronics and Telecommunications*, 66(4), 737-743.
5. Nie, W., Wu, Z., Luo, C., & Zhang, S. (2020, November). A tuning method for PID controller parameters based on particle swarm optimization (PSO). In *2020 Chinese Automation Congress (CAC)* (pp. 497-501). IEEE.

МУЛЬТИМОДАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ТРАНСПОРТІ

Білан С.М., Червонець К.М.

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка
(Україна)*

Вступ. Сучасний стан розвитку технологій штучного інтелекту характеризується стрімким впровадженням різних моделей, які призначені для обробки візуальної інформації та тексту. Останнім часом великої популярності набули великі мовні моделі (LLM), які демонструють тексти, що генеруються з високою ефективністю, а також здійснюють якісний переклад та узагальнення інформації. Однак існуючі класичні LLM характеризуються значним обмеженням, на які впливають навчальні дані, що призводить до проблеми галюцинацій та неможливості оперувати актуальною інформацією. Значним проривом у вирішенні такої проблеми стала архітектура RAG (Retrieval-Augmented Generation — генерація, доповнена пошуком). Вона дозволила моделі здійснювати зв'язок з іншими зовнішніми джерелами, а також отримувати контекст із них. В сучасних системах управління транспортом виникає необхідність у створенні мультимодальних систем, здатних оперувати у спільному векторному просторі, де текстові та візуальні дані можуть бути порівняні та оброблені одночасно. Розробка методів ефективного поєднання векторних представлень для доповненого пошуку та методів обробки візуальних даних є критично важливою задачею, вирішення якої дозволить значно підвищити якість та ефективність генеративних систем, які мають високу точність рішення поставлених задач.

Сучасні методи отримання текстових векторів базуються на архітектурі Трансформер [1]. Ранні підходи характеризуються втратою семантики при генерації статичних векторів для слів. Моделі на основі трансформерів створюють контекстуалізовані вектори, що дає можливість вектору слова змінювати своє значення в залежності від сусідніх слів. Проблемаю при поєднанні тексту та зображень є те, що унімодальні моделі формують вектори у різних просторах. Вектор слова і вектор зображення можуть знаходитись у зовсім різних областях гіперпростору, тому пряме обчислення відстані між ними не має сенсу.

В зв'язку з зазначеними проблемами в якості основного напрямку розробки обрано архітектуру мультимодальної генеративної системи з доповненим пошуком на основі поєднання текстових та візуальних векторів. Система використовує швидкий векторний пошук для попереднього відбору кращих об'єктів за своїми характеристиками. Більшість систем здійснювали обробку великих масивів візуальних даних безпосередньо генеративною моделлю. Це дозволяє оптимізувати використання обчислювальних ресурсів.

Основна частина. Архітектура мультимодальної моделі складається з двох паралельних кодувальників, а саме кодувальника зображень та кодувальника тексту. Обидва вектори проєктуються у спільний багатовимірний простір однакової розмірності [2].

Навчання відбувається методом контрастного навчання. Для групи з пар (зображення, текст) модель будує матрицю подібності розміром $N \times N$, де елементами є скалярні добутки векторів. Модель максимізує значення на головній діагоналі (правильні пари) і мінімізує всі інші значення. Функція втрат є симетричною перехресною ентропією (InfoNCE loss):

$$L = \frac{1}{2}(L_{image \rightarrow text} + L_{text \rightarrow image}) \quad (1)$$

Завдяки цьому модель створює спільний семантичний простір. Це означає, що вектор зображення буде геометрично близьким до вектора тексту, навіть якщо саме слово в описі відсутнє. Даний підхід базується на спільному векторному просторі об'єктів, які мають різні виміри у множині характеристичних ознак.

У крос-енкодерах зображення і текст об'єднуються на самому початку і подаються в

одну нейронну мережу. Даний метод є абсолютно непридатним для систем інформаційного пошуку. Для бази з N документів пошук релевантного зображення за текстом вимагатиме прогону важкої моделі N разів для кожного запиту, що формує обчислювальну складність на попередньо навченій моделі нейромережі. В цьому плані у системі, що пропонується, використовують архітектуру двоканального кодування.

Як доведено в роботі [3], двоканальна архітектура дозволяє незалежно обчислити вектори всіх документів і зберегти їх у векторній базі. Під час запиту користувача через нейромережу проходить лише один вектор запиту, а порівняння з базою здійснюється алгоритмами ANN.

Мультимодальна архітектура містить дві підсистеми всередині єдиної моделі, яка обробляє ваги візуальної та текстової моделі, які навчаються разом. Наприклад, за допомогою простого середнього здійснюється усереднення ваг для обох моделей. Для узгодження розмірностей застосовуються навчені лінійні проекційні матриці.

Одним з тонких місць в роботі системи є етап перетворення на основі L2 — нормалізації. Нормалізація гарантує, що вектори лежать на гіперсфері одиничного радіуса. Завдяки цьому мінімізація евклідової відстані під час пошуку стає математично еквівалентною максимізації скалярного добутку, що прискорює пошук у векторній базі на декілька порядків за рахунок апаратної оптимізації (SIMD/AVX інструкцій процесора) [4].

Розроблена архітектура мультимодальної генеративної системи є концептуально повною, логічно обґрунтованою та оптимізованою для роботи з великими інформаційними потоками. Декомпозиція системи на незалежні конвеєри індексації та пошуку забезпечує її гнучкість і високу швидкість реакції.

Висновок. Реалізація мультимодального доповненого пошуку через спільний векторний простір забезпечує оптимальний баланс між швидкістю вилучення контексту та якістю генерації відповідей. Перехід від крос-енкодерів до двоканальної архітектури з використанням ANN-алгоритмів дозволяє масштабувати систему для великих масивів гетерогенних даних. Застосування L2 — нормалізації та апаратної оптимізації гарантує високу продуктивність системи, що робить її придатною для впровадження у реальні інтелектуальні сервіси підтримки прийняття рішень.

Дана модель може бути використана в автомобільній галузі для розпізнавання дорожніх знаків або аналізу текстової інформації на дорозі. Система здатна корелювати зображення з камери із текстовими даними для динамічного коригування маршруту та в якості асистента для водія.

ЛІТЕРАТУРА

1. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention is all you need. NeurIPS, 2017. https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Paper.pdf
2. Alexey Dosovitskiy, Lucas Beyer, Alexander Kolesnikov, Dirk Weissenborn, Xiaohua Zhai, Thomas Unterthiner, Mostafa Dehghani, Matthias Minderer, Georg Heigold, Sylvain Gelly, et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. arXiv preprint arXiv:2010.11929, 2020. <https://arxiv.org/abs/2010.11929>
3. Radford A., Kim J. W., Hallacy C. et al. Learning transferable visual models from natural language supervision. International conference on machine learning (ICML). PMLR, 2021. P. 8748–8763.
4. Johnson J., Douze M., Jégou H. Billion-scale similarity search with GPUs. IEEE Transactions on Big Data. 2019. Vol. 7, No. 3. P. 535–547.

**СЕКЦІЯ:
БЕЗПЕКА СУДНОПЛАВСТВА**

**SECTION:
SAFETY OF NAVIGATION**

УДК 656.61.08

СТРАТЕГІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА В УМОВАХ РАПТОВИХ ЗБРОЙНИХ КОНФЛІКТІВ

Волков О. М., Рябенко Д. В.

*Національний університет «Одеська морська академія»
(Україна)*

Вступ. Глобальна архітектура морської безпеки у ХХІ столітті зіткнулася з викликом, який виходить за межі традиційного розуміння воєнних дій на морі. Раптові збройні конфлікти, що спалахують у важливих для світової економіки географічних регіонах, демонструють критичну вразливість світової торговельної системи до сучасних загроз, електронної боротьби та функціонального блокування навігаційного простору. Події початку 2026 року в Перській затоці стали одними з тих регіональних зіткнень, що виявили невідповідність цивільного флоту до умов тотального блокування доступу (за військовою термінологією — Anti-Access and Area Denial) у певному водному басейні.

Традиційні методи гарантування безпеки, засновані на міжнародному праві та використанні Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS), виявилися недостатніми в умовах, коли держава використовує територіальні води як геополітичний важіль в умовах військового зіткнення. Наведений конфлікт продемонстрував, що безпека судноплавства більше не може розглядатися лише крізь призму технічної справності судна або кваліфікації екіпажу: тепер вона включає здатність систем витримувати масований радіоелектронний вплив, здатність логістичних ланцюгів до миттєвої перебудови та готовність до експлуатації автономних систем у зонах бойових дій.

Актуальність досліджень. Актуальність вивчення механізмів гарантування безпеки в умовах раптових конфліктів обумовлена безпрецедентною інтегрованістю морських шляхів у світову економіку. Будь-яке порушення стабільності в таких регіонах як Перська затока та, зокрема, Ормузька протока, через яку проходить до 20% світового обсягу нафти та понад 20% зрізеного природного газу (ЗПГ), миттєво трансформується у величезний тиск на світову торгівлю та економіку в цілому.

Виклики, що постали перед морською галуззю, мають декілька аспектів, серед яких вважається необхідним виокремити такі як технологічний, економічний та гуманітарний аспекти.

Технологічна сторона питання полягає у масовому застосуванні засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ), що призводить до спуфінгу та джамінгу навігаційних сигналів, що призвело до дезорієнтації понад 1600 суден [1].

Економічний аспект відображається у різкому зростанні страхових премій за військові ризики, а також світових цін на енергоносії.

Гуманітарна сторона стосується понад 22500 моряків, які перебувають на судах, що знаходяться всередині затоки [2] (хоча можливість здійснити зміни екіпажів через вкрай обмежений перелік країн наразі присутня).

Сучасна наукова думка повинна зосередитися на розробці стійких систем навігації та зв'язку, які здатні працювати в умовах наявних перешкод супутникового сигналу. Дослідження досвіду наведеного конфлікту дозволяє ідентифікувати прогалини в існуючих протоколах безпеки, таких як Міжнародний кодекс з охорони суден та портів засобів (ISPS Code), та запропонувати нові підходи до інтеграції автономних охоронних систем та альтернативних методів позиціонування [3].

Постановка задачі. Основною метою представленої роботи є аналіз впливу раптового військового конфлікту на безпеку судноплавства та оцінка ефективності сучасних і перспективних технічних засобів протидії загрозам, що з ними пов'язані. У межах дослідження вирішуються такі завдання як: оцінка динаміки судноплавства в регіоні на

основі даних AIS до та після початку активної фази конфлікту; дослідження впливу засобів РЕБ на навігаційну безпеку цивільного флоту та виявлення моделей спуфінгу; аналіз методів блокування Ормузької протоки, включаючи фізичні перешкоди, мінні загрози та використання безпілотних систем (Unmanned Aerial Vehicle — UAV / Unmanned Surface Vehicle — USV); порівняльний аналіз наявних засобів захисту (військові конвої) та перспективних розробок (PNT (Positioning, Navigation and Timing)-стійкі системи, автономні платформи спостереження); розробка рекомендацій щодо підвищення стійкості морських транспортних систем в умовах воєнної нестабільності.

Аналіз даних Автоматичної ідентифікаційної системи (AIS) демонструє катастрофічне падіння активності судноплавства в регіоні через настання конфлікту. Якщо до 28 лютого 2026 року середньодобова кількість суден, що проходили через протоку, коливалася в межах 138-175 одиниць, то вже на початок березня цей показник впав до поодиноких випадків [4].

У табл. 1 наведена кількість суден, що виконували транзит через Ормузьку протоку на кожну з зазначених дат, з метою ілюстрації величезного падіння об'єму перевезень через водний шлях, де за 100% була прийнята кількість суден, що прямували протокою напередодні настання конфлікту.

Таблиця 1 — Кількість суден, що прямували Ормузькою протокою до та після настання конфлікту в регіоні

Дата	Кількість суден, що здійснили транзит	Стан трафіку протокою відносно 22.02.2026
22.02.2026	175	100%
28.02.2026	138	79%
01.03.2026	40 (приблизно)	23%
07.03.2026	6	3,4%
25.03.2026	5	2,8%
04.05.2026	3	1,7%

З впевненістю можна сказати, що наведене скорочення трафіку на 97% за дев'ять днів є найшвидшим колапсом морського сполучення в історії. Навіть за умов, коли протока не була заблокована фізично, відсутність страхового покриття та прямі погрози застосування сили зробили її фактично непрохідною для цивільних суден. Станом на травень 2026 року в портах та на якірних стоянках всередині затоки опинилися заблокованими 1550 суден з 87 країн світу [5].

Одним із найбільш небезпечних факторів конфлікту стало використання засобів РЕБ як засобу примусового контролю над трафіком протоки. Було зафіксовано понад 1735 випадків втручання в роботу навігаційних систем лише за перший тиждень бойових дій [6].

Механізм спуфінгу в Перській затоці відрізнявся високою складністю. Сигнали Глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) підмінялися таким чином, що судна «відображалися» на радарах та картах ECDIS як такі, що перебувають у територіальних водах Ірану або в закритих військових зонах, хоча фактично вони знаходилися в міжнародному коридорі. Це давало Ірану формальний привід для захоплення або обстрілу суден за порушення кордону. Іншим варіантом був так званий «аеропортовий спуфінг», коли координати судна раптово переносилися до найближчого міжнародного аеропорту, що паралізовувало роботу систем автоматичного управління та попередження зіткнень [6].

Разом з цим використання сотень швидкісних катерів, здатних протягом короткого проміжку часу встановлювати морські міни в вузьких місцях, створило тривалу загрозу, яку важко нейтралізувати авіацією. Вважається, що Іран розгорнув до 6 000 мін різного типу, включаючи сучасні донні міни з акустичними та магнітними детонаторами [7].

Безпілотні літальні апарати (Unmanned Aerial Vehicle — UAV) стали основним засобом розвідки та ураження верхніх палуб суден. Зокрема, атака на судно MSC Ishyka

продемонструвала здатність малих дронів виводити з ладу антени супутникового зв'язку та радари, фактично «засліплюючи» судно перед атакою катерів-камікадзе.

З огляду на наведене вище, гарантування безпеки судноплавства в зазначених умовах вимагає зміни парадигми — від пасивного дотримання правил до активного технічного захисту.

Iridium PNT – це технологія, що базується на використанні низькоорбітальної мережі Iridium. Завдяки тому, що її супутники знаходяться значно ближче до Землі, ніж GPS, заявляється, що потужність сигналу на приймачі в 1000 разів перевищує потужність GNSS [8]. Це робить його майже невразливим для наземних джамерів. У березні 2026 року Iridium випустив спеціалізований ASIC-чип, що дозволяє інтегрувати цю технологію безпосередньо в існуюче бортове обладнання [9].

PntGuard — ще одне рішення захисту від кібернетичних атак, розроблене консорціумом Tschudi Shipping, NAL Research та SGM Technology. Це незалежне від містка рішення, яке порівнює дані GPS з автентифікованим сигналом Iridium. У разі виявлення розбіжностей (ознака спуфінгу), система активує світлову та звукову сигналізацію на містку та передає «чисті» координати безпосередньо на дисплей капітана [10].

Проект «Pulling Guard» від Raytheon є прикладом охоронної системи, що став відомий на загрозу з боку безпілотних літальних апаратів та малих дронів. Система використовує прив'язаний дрон-сенсор (tethered drone), який запускається з корми цивільного судна або спеціалізованої безпілотної платформи, що буксирується цим судном. Це дозволяє підняти дрон, оснащений електро-оптичними та інфрачервоними сенсорами, над судном, забезпечуючи можливість огляду та визначення інших об'єктів за межами радіуса дії звичайних радарів, що часто не бачать пластикові катери на фоні хвиль.

Результати досліджень. Представлена робота підкреслила важливість технологічної диверсифікації, за якою судна сьогодні повинні бути оснащені гібридними системами навігації, які поєднують GNSS з інерціальними навігаційними системами та LEO (Low Earth Orbit)-супутниковими рішеннями (Iridium PNT), тобто відмова від єдиного джерела даних є критичною умовою виживання в під час виникнення раптових збройних конфліктів.

Вимоги до кіберзахисту суден під час їх проектування також повинні посилюватися задля забезпечення стійкості суден під час кібернетичних атак.

Подальша робота над Кодексом автономних суден (MASS Code) та його впровадження також прискорить розвиток автономних суден та їх подальшу експлуатацію в тому числі в зонах підвищених ризиків (зонах збройних конфліктів).

Розвиток та впровадження технологій штучного інтелекту також може бути корисним для гарантування безпеки судноплавства шляхом їх використання для аналізу даних AIS та супутникових знімків у реальному часі (як у системі SeaSpoofFinder) задля виявлення моделей спуфінгу та попередження суден про вхід у зону дії засобів РЕБ ще до того, як прилади почнуть видавати помилкові дані.

За неможливості національним Військово-Морським Силам забезпечувати постійний супровід суден розвиток приватно-державних партнерств у сфері морської безпеки з залученням охоронних дронів на комерційній основі вважається вкрай доцільним.

Висновки. Приклад конфлікту у Перській затоці став нагадуванням про те, що епоха безпечної глобальної навігації завершилася. Раптові конфлікти майбутнього будуть визначатися стійкістю цифрових мереж.

У наш час безпека судноплавства в умовах випадків раптової часткової геополітичної напруги визначається не лише майстерністю судноводія, а й технологічними перевагами. Перемога у майбутніх «битвах за протоки» буде належати тим, хто зможе зберегти цілісність своїх даних та автономність своїх систем у найбільш ворожому середовищі.

ЛІТЕРАТУРА

1. The 2026 Iran War: Impact on Global Shipping Routes, Trade, and Future Scenarios.
URL: <https://www.eezyimport.com/the-2026-iran-war-impact-on-global-shipping-routes-trade->

and-future-scenarios (дата звернення: 04.05.2026).

2. These numbers show the global impact of Iran's grip on the Strait of Hormuz. URL: <https://apnews.com/article/iran-us-war-strait-hormuz-fuel-price-economy-numbers-408faf6d6fb1c0aa104d059257204f52> (дата звернення: 07.05.2026).

3. Kilinc, Noah. (2026). Integrated Autonomous Maritime Strategy: Naval Transformation and Geopolitical Competition in the Twenty- First Century. DOI:10.13140/RG.2.2.30542.93767.

4. Cao, Y., Wang, H., Su, F., Fu, D., Yan, F., Hong, X., He, W., Xu, N., Ou, Y., Chen, C. The Innovation (2026). Satellite radar and AIS reveal a 97% decline in shipping traffic through the Strait of Hormuz. DOI: 10.1016/j.xinn.2026.101367 – P. 5.

5. These numbers show the global impact of Iran's grip on the Strait of Hormuz. URL: <https://apnews.com/article/iran-us-war-strait-hormuz-fuel-price-economy-numbers-408faf6d6fb1c0aa104d059257204f52> (дата звернення: 07.05.2026).

6. Signals Before Strikes: Electronic Warfare in the Iran War. URL: <https://www.orfonline.org/expert-speak/signals-before-strikes-electronic-warfare-in-the-iran-war> (дата звернення: 07.05.2026).

7. Strait of Hormuz Under Threat of Mines: Are Littoral Combat Ships the Solution? URL: <https://dsm.forecastinternational.com/2026/04/03/strait-of-hormuz-under-threat-of-mines-are-littoral-combat-ships-the-solution> (дата звернення: 07.05.2026).

8. Iridium PNT for Maritime. URL: <https://www.iridium.com/iridium-pnt/industries/maritime> (дата звернення: 07.05.2026).

9. Iridium unveils new chip to counter GNSS jamming and spoofing. URL: <https://smartmaritimenetwork.com/2025/10/28/iridium-unveils-new-chip-to-counter-gnss-jamming-and-spoofing/> (дата звернення: 07.05.2026).

10. Introducing PntGuard - the ultimate safeguard against GNSS spoofing and jamming at sea. URL: <https://www.prnewswire.com/ae/news-releases/introducing-pntguard--the-ultimate-safeguard-against-gnss-spoofing-and-jamming-at-sea-302599258.html> (дата звернення: 07.05.2026).

ПРОБЛЕМИ АДАПТАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ МОРСЬКИХ КОНВЕНЦІЙ ДО ВИКЛИКІВ АВТОНОМНОГО СУДНОПЛАВСТВА

Догодькін І.В., Панченко І.М.

Херсонська державна морська академія

(Україна)

Вступ. Морський транспорт традиційно залишається ключовим елементом світової транспортної системи, забезпечуючи основну частку міжнародних вантажних перевезень. Водночас розвиток цифрових технологій, автоматизованих систем управління та штучного інтелекту зумовив появу принципово нового явища — автономних морських суден (Maritime Autonomous Surface Ships, MASS). Такі судна здатні виконувати навігаційні функції частково або повністю без участі екіпажу на борту, що розглядається як перспективний шлях підвищення безпеки мореплавства, зменшення людського елемента та оптимізації експлуатаційних витрат судноплавних компаній [1].

Однак впровадження автономних суден у практику міжнародного судноплавства супроводжується низкою правових викликів. Чинна система міжнародного морського права формувалася в умовах традиційного судноплавства і ґрунтується на припущенні обов'язкової присутності капітана та екіпажу на борту судна. Це ставить під сумнів можливість ефективного застосування існуючих правових норм до автономних технологій.

Актуальність досліджень. Актуальність теми зумовлена відсутністю комплексного міжнародно-правового регулювання експлуатації автономних морських суден. Основні міжнародні договори у сфері морського права, зокрема Конвенція ООН з морського права 1982 року (UNCLOS), Міжнародна конвенція з охорони людського життя на морі (SOLAS) та Міжнародні правила попередження зіткнень суден у морі (COLREG), не містять спеціальних положень, які б регулювали діяльність безекіпажних або дистанційно керованих суден [2].

У зв'язку з цим виникає правова невизначеність щодо статусу автономного судна, відповідальності за шкоду, завдану внаслідок його експлуатації, а також щодо механізмів контролю та сертифікації. Наявність таких прогалин створює потенційні ризики як для безпеки мореплавства, так і для захисту морського середовища, що обумовлює необхідність наукового аналізу цієї проблематики.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є аналіз чинних міжнародно-правових норм у сфері морського права з точки зору можливості їх застосування до автономного судноплавства, виявлення ключових проблем імплементації таких норм та формування напрямів удосконалення правового регулювання експлуатації автономних морських суден.

Результати досліджень. У ході дослідження встановлено, що впровадження автономних морських суден відбувається значно швидше, ніж адаптація до них міжнародно-правового регулювання. Однією з базових проблем є відсутність у міжнародному морському праві нормативного визначення поняття автономного морського судна та класифікації суден за рівнем автономності. Хоча Міжнародна морська організація (далі – ІМО) у своїх робочих документах використовує термін Maritime Autonomous Surface Ships, він не має обов'язкової юридичної сили та не закріплений у жодній із чинних міжнародних конвенцій [1]. Це ускладнює правозастосування та створює неоднозначність у тлумаченні правового статусу таких суден.

Наступною суттєвою проблемою є невідповідність ключових норм міжнародного морського права концепції автономного судноплавства. Аналіз положень Конвенції ООН з морського права 1982 року (UNCLOS) свідчить, що більшість її норм ґрунтується на припущенні фізичної присутності екіпажу та капітана на борту судна. Зокрема, обов'язки держави прапора щодо забезпечення належної підготовки екіпажу, дисципліни на судні та дотримання навігаційних правил не можуть бути прямо застосовані до суден, керованих дистанційно або повністю автоматизовано [2]. Аналогічна проблема виникає при застосуванні положень Конвенції SOLAS та правил COLREG, які передбачають людське спостереження, вахту та прийняття рішень у режимі реального часу.

Окрему увагу в межах дослідження приділено питанню юридичної відповідальності за

шкоду, завдану автономним судном. У традиційній моделі судноплавства відповідальність, як правило, покладається на капітана та судновласника. Проте у випадку автономного судна функції капітана можуть виконуватися дистанційним оператором або програмним забезпеченням, що унеможливорює застосування класичних підходів до визначення вини [3, с.116]. Відсутність чіткого механізму розподілу відповідальності між судновласником, оператором берегового центру управління та розробником програмного забезпечення створює передумови для уникнення відповідальності та ускладнює процедури страхування таких суден.

Ще однією проблемою є технічна та правова сертифікація автономних суден. Регуляторне дослідження ІМО щодо MASS засвідчило, що чинні міжнародні стандарти безпеки не враховують ризики, пов'язані з кібербезпекою, відмовами алгоритмів штучного інтелекту та збоями систем дистанційного управління [4]. Унаслідок цього держави змушені розробляти власні національні підходи до сертифікації автономних суден, що призводить до фрагментації міжнародного правового режиму та створює нерівні умови для судноплавних компаній [5, с.843].

Додатковим викликом є проблема контролю та нагляду за діяльністю автономних суден у відкритому морі. Відсутність екіпажу значно ускладнює реалізацію функцій портового контролю, а також виконання обов'язків держави прапора щодо забезпечення дотримання міжнародних стандартів безпеки та охорони морського середовища. У наукових дослідженнях наголошується, що без закріплення чітких процедур дистанційного нагляду та відповідальності берегових операторів ефективне застосування міжнародних норм є неможливим [3, с.115].

Таким чином, результати дослідження свідчать, що автономне судноплавство створює комплексну правову проблему, яка охоплює питання статусу судна, відповідальності, сертифікації, контролю та екологічної безпеки. Відсутність узгодженого міжнародного підходу до цих питань становить потенційну загрозу як для безпеки мореплавства, так і для стабільності міжнародного морського правопорядку.

Висновки. Проведене дослідження свідчить, що чинна система міжнародного морського права не готова до повноцінного регулювання автономного судноплавства. Основні проблеми полягають у відсутності правового статусу автономних суден, невизначеності механізмів відповідальності, а також нестачі уніфікованих стандартів безпеки та сертифікації.

Вирішення зазначених проблем потребує комплексного підходу, що включає внесення змін до ключових міжнародних конвенцій, розробку спеціальних міжнародно-правових актів щодо автономних суден та активну координацію діяльності держав у межах ІМО. Лише системне оновлення міжнародного морського права здатне забезпечити безпечну та ефективну інтеграцію автономних технологій у сучасне судноплавство.

ЛІТЕРАТУРА

1. Seminar on legal issues including UNCLOS and MASS at the second session of the Joint MSC-LEG-FAL MASS Working Group. International Maritime Organization. URL: <https://www.imo.org/en/about/events/pages/seminar-on-legal-issues-unclos-mass-jwg.aspx>
2. United Nations Convention on the Law of the Sea, 1982. URL: https://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_e.pdf
3. Плачкова Т. М. Проблеми правового регулювання безпеки автономного судноплавства. *Правова держава*. 2018. №30. С.114–118. DOI: <https://doi.org/10.18524/2411-2054.2018.30.132862>
4. Regulatory Scoping Exercise for Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). International Maritime Organization. URL: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/Joint-MS-C-LEG-FAL-Working-Group-on-MASS.aspx>
5. Веремчук В. С. Роль міжнародних організацій у розробці правового регулювання інституту автономних суден. *Аналітично-порівняльне правознавство*. 2025. № 1. С. 843–847. DOI: <https://doi.org/10.24144/2788-6018.2025.01.140> URL: <https://doaj.org/article/8bbb28873a634a65aafffc293567cf67>

THE STRATEGIC TASK OF MODERN SHIPPING IS REDUCING FUEL CONSUMPTION

Zhmur V.

*Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)*

Introduction. In the current operating conditions of technical systems, economic issues predominate, being significant and prioritized, to the detriment of environmental problems in modern society. This article outlines principles for solving economic and environmental problems using maritime transport as an example.

The Climate Summit Memorandum (Paris, 2015) does not include maritime transport, essentially exempting it from the consequences that lead to the greenhouse effect. However, maritime transport's contribution to the greenhouse effect is 15% and is growing.

And so, the first step has already been taken. This is the Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) [1–3].

The requirements for the SEEMP are regulated by:

- Regulation 22 of MARPOL Annex VI;
- Resolution MEPC.203(62);
- Resolution MEPC.212(63);
- Resolution MEPC.213(63);
- Resolution MEPC.214(63);
- Resolution MEPC.231(65);
- Resolution MEPC.282(70) — enters into force on 1 March 2018. [4-10]

Analysis of Ship Energy Efficiency Resolutions.

The Marine Environment Protection Committee (MEPC) 65 (May 2013) considered a US proposal to improve the energy efficiency of international shipping through a phased approach.

The International Maritime Organization's Marine Environment Protection Committee, by resolution MEPC.282(70) of 28 October 2016, adopted the 2016 Guidelines for the Development of Ship Energy Efficiency Management Plans (SEMPs). The adoption of these Guidelines revokes the 2012 Guidelines adopted by resolution MEPC.213(63). The main difference of the new Guidelines is their incorporation of the requirements of resolution MEPC.278(70) of 28 October 2016 regarding annual reporting of fuel consumption, distance traveled, and time en route by ships of 5,000 gross tonnage and above. Resolution MEPC.278(70) of 28 October 2016 is scheduled to enter into force on 01 March 2018, but as noted in resolution MEPC.282(70), the early amendment of the Guidelines is due to the need to ensure «uniform and effective implementation of the regulations, as well as to provide the industry with sufficient time to prepare» [5–11] .

The purpose is to study the value of the energy efficiency index EEOI, to reduce fuel consumption in order to reduce it when sailing in different weather conditions.

Main Part. According to the 2016 Guidelines, the FEMP should have two parts: Part I «Energy Efficiency Management Plan» (required by the 2012 Guidelines) and, additionally, Part II "Fuel Consumption Data Collection Plan" with the following sample format:

- Vessel details.
- Form for recording changes to the Fuel Oil Consumption Data Collection Plan.
- Marine engines, other marine fuel consumers, and types of marine fuel used.
- Emission Factor.

CF is a dimensionless factor for converting marine fuel consumption into CO₂ emissions, specified in the 2014 Guidelines for the method for calculating the Actual Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships (resolution MEPC.245(66), as amended). Total annual CO₂ emissions are calculated by multiplying the annual marine fuel consumption by the CF for a given fuel type.

- Method for measuring ship fuel consumption.
- Method for measuring distance traveled.
- Method for measuring journey time in hours.

- Procedures for submitting data to the Administration.
- Data quality.

The energy efficiency design index for new ships (EEDI) and the ship's operational energy efficiency criterion (EEOI) have the same physical meaning — the ratio of the amount of greenhouse gas CO₂ produced to the amount of ship's transport work over a certain period of time (voyage, year, etc.) and differ only in the way the components are calculated:

$$\begin{aligned} \text{EEDI} &= \frac{(MTER_{pr} \times CF)}{Apr}, \\ \text{EEOI} &= \frac{(MTER_f \times CF)}{Af}, \end{aligned}$$

where MTERpr MTERf – design and actual (factual) consumption of fuel and energy resources by all ship energy consumers, kg; Apr; Af – design and actual (factual) work performed by the vessel, t·km (per voyage, year or other calculation period); CF – dimensionless conversion factor for converting fuel consumption to CO₂ emissions, kgCO₂/kg fuel.

A Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) is developed by the company for each vessel using an Energy Operational Performance Index (EEOI) in accordance with MEPC.1/Circ.684 of 17 August 2009 and Resolution MEPC 203, adopted on 15 July 2011. There are no restrictions or technological requirements; other indicators may be used.

As an example, we present the EEOI calculation for the m/v «BBC Steinhoeft» HLFT voyage. 1031–027 Houston — Maracaibo. Table 1. Cargo 2884.7 mt. Distance 1948 miles. Heavy fuel oil (HFO) consumed – 95500 kg, diesel fuel (MGO) — 12800 kg. Average speed — 12.48 knots. Sea state — 5–6.

Table 1 — Calculation of the EEOI

Calculation of the EEOI

Vessel's name:
from:

BBC Steinhoff
Houston

Voyage number:
to:

1031-027
Maracaibo

Cargo quantity: 2884.7 mt (for ballast voyages enter ballast water quantity)

From position date / time	To position date / time	distance	speed	fuel quantity (kg)			weather conditions, remarks
				HFO	LFO	Gas oil	
Houston 30.12.16/20.05	Maracaibo 06.01.17/10.10	1948	12.48	95 500	0	12 800	rough
Summary		1948		95 500	0	12 800	
Factor				3,1144	3,15104	3,206	
Fuel quantity x factor				297 425	0	41 037	
Sum of CO ₂ , per voyage (kg)				338 462			
Sum of CO ₂ / (1000 x ton cargo x nm)				0,060			EEOI

Instruction:
Having completed the above table (voyage) copy the values of the below row no. 33 to the end of the table on the next page „Year“. Important: Do not copy the formulars but the values only.

Voyage	from	to	distance (cargo (mt))	CO ₂ (kg)	EEOI
1031-027	Houston	Maracaibo	1948	2884.7	338 462 0.060231033

<<< copy these cells into table on page „Year“

10.11.2017page 1 of 1

As an example, we provide methods for improving energy efficiency. These methods include:

1. Voyage planning. An optimal route and its precise execution contribute to increased energy efficiency.
 2. Weather planning. On certain routes, the cost of overcoming poor sailing conditions may be higher than the cost of traveling an extra mile to avoid them.
 3. Time planning. Communication with the next port provides early warning of berth availability and, therefore, the ability to plan the optimal vessel speed.
 4. Vessel speed optimization. One of the most effective methods for reducing fuel consumption and increasing energy efficiency.
 5. Optimization of the developed power of the main engine.
 6. Optimal vessel control. This includes the use of optimal trim, the adoption of the optimal amount of ballast, optimization of the oncoming water flow to the ship's propeller, and optimization of the autopilot.
 7. Hull maintenance.
 8. Optimization of the ship's propulsion system. This includes systematically reducing mechanical and heat losses.
 9. Maintenance of the ship's propulsion system.
- Using a wear monitoring system can be a useful tool for maintaining high efficiency of the ship's propulsion system.
10. Heat recovery. Modern systems can utilize exhaust heat to generate electricity or provide additional power to the propeller shaft.
 11. Improved ship management. Better utilization of the company's ships' power can improve their energy efficiency. For example, by minimizing ballast transfers.
 12. Optimization of cargo operations.
 13. Energy management. Reviewing energy consumption can lead to optimized energy management.
 14. Use of alternative fuels.

Conclusions.

1. A detailed analysis of the Ship's Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) was conducted, allowing us to confirm that it is a regulator of operational environmental efficiency.
2. A practical calculation of the m/v «BBC Steinhoeft» EEOI during the Houston-Maracaibo voyage was performed, demonstrating the impact of the ship's fuel on carbon dioxide emissions, a component of greenhouse gases.

REFERENCES

1. Gorb S.I. Novaya otchotnost' po raskhodu topliva sudami. Rabotnik morya. 2017, № 16 (128), s. 4.
2. Elektronnyy tekst dokumenta podgotovlen ZAO «Kodeks» i sveren po: MARPOL. Kniga III, peresmotrennoye Prilozheniye VI MARPOL «Pravila predotvrashcheniya zagryazneniya vozduшной sredy s sudov», izdaniye ZAO «TSNIIMF», 2012.
3. IMO – MODEL – COURSE CHARTERS 7.01 – 7.04, 7.08, 1.38 – MARINE INVIROMENTAL AWARENESS. LONDON: IMO, MEPC – 2010, 37 p.
4. Rezolyutsiya MEPC.203(62). Elektronnyy tekst dokumenta: http://rise.odessa.ua/texts/MEPC203_62.php3
5. Rezolyutsiya MEPC.212(63). Elektronnyy tekst dokumenta: [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.212\(63\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.212(63).pdf).
6. Rezolyutsiya MEPC.213(63). Elektronnyy tekst dokumenta: http://rise.odessa.ua/texts/MEPC213_63r.php3
7. Rezolyutsiya MEPC.214(63). Elektronnyy tekst dokumenta: http://rise.odessa.ua/texts/MEPC214_63.php3

8. Rezolyutsiya MEPC.231(65). Elektronnyy tekst dokumenta:
http://rise.odessa.ua/texts/MEPC231_65.php3
9. Rezolyutsiya MEPC.278(70). Elektronnyy tekst dokumenta:
[http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.282\(70\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.282(70).pdf)

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ПРАВОВИХ РИЗИКІВ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

Ібрагім А. М., Стулій І. О., Клевцов К. М.
Херсонська державна морська академія
(Україна)

Вступ. Уявіть: контейнер із вантажем зникає десь між портом Гуанчжоу та портом Одеса під час надзвичайної ситуації на маршруті. Вантажоотримувач вимагає компенсацію. Але яку саме? За яким законом? Якою є її гранична сума? Відповідей на ці питання в українському правовому полі сьогодні не існує. І це не метафора, а математично доведений факт. Колізія між Законом «Про мультимодальні вантажні перевезення» 2021 року та Кодексом торговельного мореплавства України (КТМУ) 1995 року [1] породжує системні правові конфлікти [2]. Ці конфлікти у звичайних умовах є «сплячими», але під час надзвичайних ситуацій активуються з розрахунковою ймовірністю, що наближається до 1,0. За моделлю організаційних аварій Дж. Різона [3], прогалини в законодавстві функціонують як «латентні умови». Тобто це невидимі дірки у захисних бар'єрах, що миттєво спрацьовують під впливом тригерів від надзвичайних ситуацій. Потенційна загроза перетворюється на масштабні фінансові катастрофи для транспортних компаній.

Актуальність досліджень. В умовах надзвичайних ситуацій транспортна галузь України зіштовхується з безпрецедентними викликами. Мова йде про GPS-спуфінг у Чорному морі, мінна небезпека, повітряні тривоги під час вантажних операцій у портах, постійна зміна логістичних коридорів. Саме в цих обставинах «сплячі» правові колізії прокидаються і стають реальними фінансовими катастрофами для операторів. Академічна наука традиційно концентрується на питаннях *de lege ferenda* — як слід реформувати законодавство. Проте залишається без відповіді принципово важливе практичне питання: як оператору управляти правовим ризиком вже зараз, у межах недосконалої чинної нормативної бази? Кількісних інструментів для цього в українській транспортній науці досі не існувало. Небезпека загострюється через феномен «правового практичного зсуву». А саме під час надзвичайної ситуації персонал прискорює вантажні операції. При цьому, до прикладу, пропускає оформлення акта огляду вантажу на стику видів транспорту. Коли виникає арбітраж, місце втрати виявляється «нелокалізованим». В даному випадку застосовується найнижча межа відповідальності за мережевою моделлю. Юридично грамотна компанія втрачає мільйони — не через некомпетентність, а через відсутність системного механізму контролю.

Постановка задачі. Мета дослідження — розробити методологічний інструментарій для кількісної оцінки правових ризиків у мультимодальних перевезеннях за участю морського транспорту в умовах надзвичайних ситуацій. Для цього вперше в українській транспортно-правовій науці поставлено завдання:

1. Синтезувати інженерні методи аналізу безпеки з методологією правового аналізу.
2. Адаптувати методику HEART (*Human Error Assessment and Reduction Technique*) [4] для розрахунку скоригованої ймовірності (P_{scor}) реалізації правових ризиків.
3. Розробити матрицю бар'єрного аналізу правових ризиків (БАПР), придатну як доказова база у міжнародному транспортному арбітражі.

Результати досліджень. Методологію покладено на синтезі трьох концепцій.

По-перше, теорія енергетичних бар'єрів Гібсона–Хаддона та модель організаційних аварій Різона («швейцарський сир») дозволили ідентифікувати правові конфлікти як *латентні умови*. За нею «дірки» у захисних бар'єрах, що існують завжди, але призводять до втрат лише тоді, коли вирівнюються з тригером надзвичайної ситуації. Вразливий об'єкт — гарантоване право вантажовласника на компенсацію; джерела небезпеки — наслідки надзвичайних ситуацій, збройних конфліктів та інших форм-мажорних обставин: GPS-

спуфінг, надзвичайні погодні умови, мінна небезпека, повітряні тривоги; захисні бар'єри — наскрізний договір, страховий поліс, акти огляду вантажу; «дірки» — самі правові колізії.

По-друге, авторська концепція «правового практичного зсуву» (розвиток теорії «практичного дрейфу» Снука) [5] пояснює конкретний механізм руйнування правових гарантій під екстремальним тиском. Мова йде про те, що безпека соціо-технічної системи поступово деградує через нормалізацію відхилень від юридичних процедур в умовах надзвичайної ситуації.

По-третє, адаптація методики HEART для розрахунку скоригованої ймовірності (P_{scor}) реалізації правового ризику за Формулою 1:

$$P_{scor} = P_{base} \times \Pi(EPC_i - 1) \times wi + 1, \quad (1)$$

де P_{base} — номінальна ймовірність задачі за HEART; EPC_i — максимальний коефіцієнт i -ї умови, що породжує помилку; wi — ваговий коефіцієнт присутності умови ($0 \leq wi \leq 1$). Практичну силу методу наочно демонструє розрахунок (Формула 2) для сценарію «клаптикової» відповідальності (тип задачі С, $P_{base} = 0,16$; EPC-1 «недооцінка наслідків» $\times 17,0$; EPC-2 «брак часу» $\times 11,0$):

$$P_{scor} = 0,16 \times 17,0 \times 11,0 = 29,92 \rightarrow 1,0 \text{ (КРИТИЧНИЙ)}. \quad (2)$$

Це означає: в умовах надзвичайної ситуації правовий ризик нелокалізованої втрати вантажу є не теоретичним, а **гарантованим**. Матриця бар'єрного аналізу правових ризиків (БАПР), що синтезує результати всіх ідентифікованих правових конфліктів, наведена у таблиці 1.

Таблиця 1 — Матриця БАПР: кількісна оцінка правових ризиків мультимодальних перевезень під час надзвичайних ситуацій

Правовий конфлікт / фактор ризику	Тип HEART	P_{base}	Задіяні EPC	P_{scor}	Рівень БАПР
«Клаптикова» відповідальність: нелокалізована втрата вантажу (мережева модель)	С	0,16	EPC-1 ($\times 17,0$) EPC-2 ($\times 11,0$)	1,0*	КРИТИЧНИЙ
Збереження в КТМУ звільнення від відповідальності за навігаційну помилку	А	0,55	EPC-7 ($\times 1,3$) EPC-3 ($\times 3,0$)	1,0*	КРИТИЧНИЙ
Правовий вакуум щодо форс-мажору та страхування воєнних ризиків	А	0,55	EPC-7 ($\times 1,3$) EPC-4 ($\times 3,0$)	1,0*	КРИТИЧНИЙ
Конфлікт строків позовної давності (1 рік за КТМУ проти 2 років за Гамбурзькими правилами)	Д	0,09	EPC-5 ($\times 2,5$) EPC-6 ($\times 2,5$)	0,563	ВИСОКИЙ
Відсутність обов'язкового електронного документообігу	Е	0,02	EPC-2 ($\times 11,0$) EPC-8 ($\times 1,15$)	0,253	СЕРЕДНІЙ
Термінологічна неузгодженість: «мультимодальний» vs «інтермодальний»	Д	0,09	EPC-5 ($\times 2,5$)	0,225	СЕРЕДНІЙ

Примітка: * — розраховане значення $\geq 1,0$ фіксується як максимальна ймовірність. Рівень ризику: червоний — критичний ($P_{scor} \geq 0,90$), жовтий — високий ($0,40-0,89$), зелений — середній ($< 0,40$).

Важливим методологічним результатом є можливість порівнювати різномірні ризики за єдиним числовим критерієм. Тобто ризик відсутності електронного документообігу ($P_{scor} = 0,253$) є пріоритетом у 2,2 рази нижчим, ніж конфлікт строків позовної давності ($P_{scor} = 0,563$) — хоча в академічних дослідженнях обидва конфлікти нерідко оцінюються як рівнозначні. Розрахунок HEART перетворює суб'єктивні судження на об'єктивний математичний аргумент, придатний для міжнародного транспортного

арбітражу.

Ключовими компенсаційними бар'єрами, здатними нейтралізувати критичні ризики ($P_{scor} = 1,0$), визначено: технологія «Цифровий двійник» (IoT-сенсори контейнера в реальному часі фіксують точне місце та час інциденту, усуваючи проблему «нелокалізованої втрати») та Аккрська конвенція ООН 2025 року [6] (легалізація електронних оборотних вантажних документів — eNCD — для всіх видів транспорту). Інтеграція eNCD у блокчейн-платформу зі смарт-контрактами фізично унеможлиблює виникнення «правового практичного зсуву». Електронна система не дозволяє пропустити крок верифікації вантажу при перевантаженні. Вона формує незаперечну доказову базу незалежно від стану інфраструктури. Повна архітектура «цифрового щита» — IoT-сенсор → блокчейн-оракул → смарт-контракт → eNCD — розкриється у повній статті.

Висновки. Розроблена методологія БАПР є першою в українській транспортній науці спробою інтегрувати інженерні методи аналізу бар'єрів безпеки (Гібсон–Хаддон, Різон) з кількісними інструментами оцінки людського фактора (HEART) у сферу правового комплаєнсу. Три з шести ідентифікованих правових конфліктів отримали статус КРИТИЧНИЙ ($P_{scor} \approx 1,0$): «клаптикова» відповідальність, архаїчне звільнення за навігаційну помилку у КТМУ та правовий вакуум щодо воєнного стану. Концепція «правового практичного зсуву» пояснює механізм, завдяки якому навіть юридично грамотні компанії систематично опиняються беззахисними у кризових умовах. Синергія права, математики та цифрових технологій відкриває нову еру в управлінні стійкістю та безпекою мультимодальних перевезень. Отримані кількісні оцінки слугують доказовою базою для міжнародного транспортного арбітражу та обґрунтуванням для законодавчих реформ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кодекс торговельного мореплавства України: Закон України від 23.05.1995 № 176/95-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1995. № 47–52. Ст. 349. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-вр>
2. Ібрагім А. М., Клевцов К. М. Правові колізії в практиці організації мультимодальних перевезень за участю морського транспорту. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2025. Вип. 51. С. 340–349. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344989>
3. Reason J. T. Managing the risks of organizational accidents. London : Routledge, 1997. 252 p.
4. Williams J. C. HEART — A proposed method for assessing and reducing human error. 9th Advances in Reliability Technology Symposium proceedings. Bradford, UK, 1986.
5. Snook S. A. Friendly fire: The accidental shootdown of U.S. Black Hawks over Northern Iraq. Princeton : Princeton University Press, 2000. 296 p.
6. United Nations Convention on Negotiable Cargo Documents (Accra Convention) : UN General Assembly resolution. New York : United Nations, 2025. URL: <https://uncitral.un.org/en/ncdconvention>

SOLVING THE PROBLEM OF POLARIZATION SELECTION OF ECHO SIGNALS FROM A NAVIGATION OBJECT IN THE PRESENCE OF SEA-SURFACE WAVES

Korban D.V.

National University «Odessa Maritime Academy»

(Ukraine)

Harbin Engineering University

(China)

Introduction. A rough sea surface and a navigation object located on it constitute a complex object for a ship's radar [2], and the electromagnetic wave reflected from such an object will be partially polarized when it is irradiated by an electromagnetic wave of any polarization. However, ship's radar stations, due to their technical properties, cannot distinguish the echo signal of the navigation object from the echo signal of the complex object [1]. Therefore, ship's radar stations face the problem of performing polarization selection of the echo signals of a navigation object in the presence of a rough sea surface.

Research Relevance. Therefore, solving this problem is relevant and consists in developing ship's radar polarimeters that will make it possible to emit an electromagnetic wave of any polarization and receive a partially polarized echo signal from a complex object. Subsequently, such an echo signal will be represented by the real-valued energy Stokes parameters $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$, $S_4(t)$, which will make it possible to solve the problem of polarization selection of a navigation object.

Problem Statement. To solve the problem of polarization selection of the echo signal of a navigation object, it is necessary to use the total coherence matrix [4] of the partially polarized wave of the complex object.

Research Results. Let us decompose the partially polarized electromagnetic wave reflected from a complex object and specified by the real-valued energy Stokes parameters $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$, $S_4(t)$ [3], into two energy fluxes, one of which is completely polarized and the other completely unpolarized, i.e.:

$$\left[\sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}, S_2, S_3, S_4 \right] \text{ — completely polarized;} \quad (1)$$

$$\left[S_1 - \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}, 0, 0, 0 \right] \text{ — completely unpolarized.} \quad (2)$$

Further division of the fluxes is obtained by considering the unpolarized flux as the sum of two independent oppositely polarized fluxes with intensities:

$$\frac{S_1 - \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}}{2}. \quad (3)$$

Moreover, the polarization of one of the fluxes may be chosen to be the same as the polarization of the completely polarized flux (1), while the polarization of the second flux is orthogonal to it. Then the two identically polarized fluxes form a flux with intensity:

$$\frac{S_1 + \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}}{2}. \quad (4)$$

Based on this, the echo signal of a partially polarized wave of a complex object, characterized by a system of four Stokes parameters, can be considered as the result of adding two independent completely polarized fluxes whose intensities are equal and are represented as:

$$I^1 = \frac{S_1 + \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}}{2}; \quad (5)$$

$$I^2 = \frac{S_1 - \sqrt{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2}}{2} \quad (6)$$

The polarization of the first flux I^1 in the echo signal of the complex object coincides with the polarization of the polarized component of the echo signal that relates to the navigation object in the echo signal of the partially polarized wave, whereas the polarization of the second flux I^2 is orthogonal to it and characterizes the reflective properties of sea waves in the echo signal of the partially polarized wave. In equations (5) and (6), the first Stokes parameter $S_1(t)$ is the total power of the polarized and unpolarized components of the electromagnetic wave reflected from the complex object.

The polarization-related real-valued energy Stokes parameters make it possible to perform radar recognition of a navigation object when it is located on a rough sea surface. With regard to attenuation of the echo signal by the complex object, the real-valued Stokes parameters also compensate for these losses by using the intensities of the orthogonal components of the echo signal from the complex object of the partially polarized wave that enter the Stokes parameters.

As a simulation model that performs polarization selection of navigation objects against the background of reflections from a rough sea surface, the total coherence matrix $R_{k\Sigma}(t)$, whose elements are the real-valued energy Stokes parameters, can be used and represented as:

$$\begin{aligned} R_{k\Sigma}(t) &= R_{kP}(t) + R_{kCP}(t) + R_{kPO}(t) = \\ &= \begin{bmatrix} S_{11P}(t) & S_{12P}(t) & S_{13P}(t) & S_{14P}(t) \\ S_{21P}(t) & S_{22P}(t) & S_{23P}(t) & S_{24P}(t) \\ S_{31P}(t) & S_{32P}(t) & S_{33P}(t) & S_{34P}(t) \\ S_{41P}(t) & S_{42P}(t) & S_{43P}(t) & S_{44P}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S_{11CP}(t) & S_{12CP}(t) & S_{13CP}(t) & S_{14CP}(t) \\ S_{21CP}(t) & S_{22CP}(t) & S_{23CP}(t) & S_{24CP}(t) \\ S_{31CP}(t) & S_{32CP}(t) & S_{33CP}(t) & S_{34CP}(t) \\ S_{41CP}(t) & S_{42CP}(t) & S_{43CP}(t) & S_{44CP}(t) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} S_{11PO}(t) & S_{12PO}(t) & S_{13PO}(t) & S_{14PO}(t) \\ S_{21PO}(t) & S_{22PO}(t) & S_{23PO}(t) & S_{24PO}(t) \\ S_{31PO}(t) & S_{32PO}(t) & S_{33PO}(t) & S_{34PO}(t) \\ S_{41PO}(t) & S_{42PO}(t) & S_{43PO}(t) & S_{44PO}(t) \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (7)$$

Where $R_{kP}(t)$ is the coherence matrix of the polarized component. $R_{kCP}(t)$ and $R_{kPO}(t)$ are the coherence matrices of orthogonal polarizations.

The total coherence matrix $R_{k\Sigma}(t)$ is the sum of the coherence matrices of three completely polarized fluxes that constitute the echo signal of the partially polarized wave of the complex object.

According to Stokes' theorem [5], the partially polarized reflected signal of a complex object can be characterized as consisting of two independent completely polarized fluxes with intensities $I^1(t)$ and $I^2(t)$:

$$I^1(t) = \frac{S_1(t) + \sqrt{S_2^2(t) + S_3^2(t) + S_4^2(t)}}{2}, \quad (8)$$

$$I^2(t) = \frac{S_1(t) - \sqrt{S_2^2(t) + S_3^2(t) + S_4^2(t)}}{2} \quad (9)$$

Taking into account the flux intensities $I^1(t)$ and $I^2(t)$, the coherence matrices of the echo signal of the navigation object $R_{kNO}(t)$ and of the echo signal of the rough sea surface $R_{kRSS}(t)$ are written as:

$$R_{kNO}(t) = \begin{bmatrix} I^1(t) \end{bmatrix}; \quad R_{kRSS}(t) = \begin{bmatrix} I^2(t) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

The coherence matrices of the navigation object and the rough sea surface are defined as linear combinations of four real-valued energy Stokes parameters included in two energy fluxes of the echo signal of the partially polarized wave of the complex object, and make it possible to solve the problem of polarization selection of a navigation object located in the zone of a rough sea surface along the vessel's path.

Conclusions.

1. A simulation polarization model is presented in the form of the total coherence matrix of two energy fluxes of the echo signals of the partially polarized wave of a complex object.

2. The total coherence matrix made it possible to solve the problem of polarization selection of navigation objects located under complex marine environment conditions.

REFERENCES

1. I. I. Obod, O. O. Strelnytskyi, V. A. Andrushevych. Information model of airspace surveillance systems. Kh.: KNURE, 2015. 270 p.
2. D. V. Korban. Reflectivity of a complex object located in the operation zone of a shipborne polarimetric radar complex. Shipping & Navigation. Odesa: NU «OMA», 2025. No. 38. P. 116-127. DOI: 10.31653/2306-5761.38.2025.116-127.
3. X. Li, Y. Wang, J. Zhang. Polarization characteristics and target detection in sea clutter based on Stokes parameters. -Remote Sensing. Basel: MDPI, 2021. Vol. 13, No. 5. P. 890–905. DOI: 10.3390/rs13050890.
4. S. Salhi, M. Ouarzeddine, A. Belhadj-Aissa. Coherence matrix formulation for partially polarized radar wave analysis over sea surface. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. New York: IEEE, 2020. Vol. 17, No. 8. P. 1343–1347. DOI: 10.1109/LGRS.2019.2946083.
5. H. Chen, W. Wang, L. Liu. Modeling and polarization selection of complex marine targets using partially polarized echo signals. IET Radar, Sonar & Navigation. London: IET, 2022. Vol. 16, No. 3. P. 450–462. DOI: 10.1049/rsn2.12195.

ПРОЦЕСУАЛЬНІ АСПЕКТИ РОЗСЛІДУВАННЯ СМЕРТІ ТА ВЧИНЕННЯ ТЯЖКИХ ЗЛОЧИНІВ НА МОРСЬКИХ СУДНАХ

*Котляревський Д.К., Панченко І.М.
Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Сучасне торговельне судноплавство виступає ключовою ланкою світової економічної системи, забезпечуючи стабільність глобальних логістичних ланцюгів. Водночас специфіка морського промислу, що пов'язана з тривалим перебуванням екіпажів у замкненому просторі та віддаленістю від суші, створює особливий правовий контекст для забезпечення безпеки життєдіяльності. У цьому середовищі право на життя та недоторканність особи набувають статусу абсолютних пріоритетів, що вимагає чіткої регламентації дій у разі настання надзвичайних подій, зокрема вчинення кримінальних правопорушень або смерті особи на борту судна [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**].

Актуальність досліджень. Питання процесуального реагування на випадки загибелі людей на суднах у відкритому морі характеризуються складністю через перетин міжнародного та національного права. Актуальність теми зумовлена необхідністю уніфікації дій капітана як органу дізнання, забезпечення належного поведіння з тілом померлого згідно з медико-санітарними вимогами та дотримання юрисдикційних повноважень держав у межах Конвенції про боротьбу з незаконними актами, спрямованими проти безпеки морського судноплавства. З огляду на зростаючі вимоги до соціального захисту моряків (MLC 2006), розробка чітких алгоритмів збереження доказової бази та репатріації останків стає не лише медико-технічним, а й фундаментальним правовим завданням для морської галузі.

Постановка задачі. Метою роботи є системний аналіз правових та організаційних засад розслідування випадків загибелі та вчинення тяжких злочинів на морських суднах. Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання: дослідити стандарти поведінки з тілом померлого та санітарно-гігієнічні вимоги до його зберігання на борту згідно з настановами Міжнародної палати судноплавства; проаналізувати механізми встановлення кримінальної юрисдикції держав-учасниць Конвенції про боротьбу з незаконними актами, спрямованими проти безпеки морського судноплавства у разі вбивства на судні; окреслити обсяг та специфіку доказової бази, що має бути сформована безпосередньо після інциденту для забезпечення ефективного правосуддя.

Результати досліджень. Сучасне судноплавство є невід'ємною частиною світової економіки та міжнародних відносин, що обумовлює перебування на бортах суден значної кількості осіб у тривалих рейсах. За таких умов, вчинення кримінальних правопорушень, хоч й має поодинокий характер, однак вирізняється підвищеною суспільною небезпекою та складністю процесуального реагування. Досліджуючи питання розслідування, слід звернутися до Кодексу міжнародних стандартів та рекомендованої практики розслідування в галузі безпеки морських аварій та інцидентів (далі — Кодекс), відповідно до положень пункту 2.22 якого, значний морський інцидент — це морський інцидент, що передбачає загибель судна, члену екіпажу або серйозну шкоду навколишньому середовищу. Також, Кодексом закріплюється вимога щодо розслідування кожного значного морського інциденту. Відповідно до положень пункту 6.2, за відсутності будь-якої угоди, укладеної відповідно до глави 7, держава прапора судна, залученого до значної морської аварії, несе відповідальність за забезпечення проведення та завершення розслідування з питань морської безпеки відповідно до Кодексу [**Помилка! Джерело посилання не знайдено.**].

Розглядаючи Конвенцію про працю в морському судноплавстві 2006 року, стандартом A4.1 закріплюється обов'язок держави-члена, на території якої настала смерть, або, якщо смерть сталася у відкритому морі, держава, до територіальних вод якої судно

заходить наступною, сприяти репатріації тіла або праху померлого судновласником відповідно до волевиявлення моряка або, за необхідності, його найближчих родичів **[Помилка! Джерело посилання не знайдено.]**.

Міжнародна палата судноплавства визначила покрокову інструкцію, яка застосовується у випадку загибелі на борту судна. Визначаючи персональну гігієну однією з ключових задач, до рекомендацій Міжнародної палати судноплавства входить: запобігання прямого контакту з кров'ю або іншими біологічними рідинами, закриття подряпин водонепроникними пов'язками та обов'язкове використання засобів особистого захисту при контакті з тілом загиблого. Наступним важливим аспектом інструкції є позиціонування та обробка тіла: померлий повинен бути розташований на спині з руками, розміщеними вздовж тіла, ротова порожнина померлого повинна бути очищена та будь-які отвори тіла закриті з метою запобігання витоків біологічних рідин, під голову померлого повинна бути підкладена подушка, а на померлому закріплена ідентифікаційна бирка, яка повинна містити ім'я, дату народження та адресу. Тіло померлого повинно бути завернуте в постільну білизну або простирadlo, за наявності — у герметичний прозорий пластиковий пакет на застібці, щонайменше 150 мікрометрів товщиною **[Помилка! Джерело посилання не знайдено.]**.

Окремі вимоги встановлюються щодо зберігання тіла померлого. Заморожування тіла призводить до зневоднення тканин, що спричиняє зміну кольору та утворення морозильного опіку. Також, швидке заморожування викликає переломи кісток черепа та посмертні ушкодження на тілі. З цією метою, тіло повинно зберігатися в рефрижераторі не більше двох місяців, а температура повинна дорівнювати приблизно 4 градусам Цельсія, але не бути нижче за 2 градуси Цельсія. При цьому тіло повинно знаходитися в захищеному холодильному сховищі, не на полу та з видимою ідентифікаційною биркою.

Розглядаючи проблематику процесуальних питань розслідування вбивств на судні, слід виокремити Конвенцію про боротьбу з незаконними актами, спрямованими проти безпеки морського судноплавства. Відповідний нормативно-правовий акт вносить чіткість в юрисдикційні питання, закріплюючи у статті 6 положення про встановлення юрисдикції державами-учасниками. Так кожна держава-учасниця вживає заходів, необхідних для встановлення своєї юрисдикції над злочинами, вчиненими проти або на борту судна під її прапором, на її території, включаючи територіальне море, а також у випадках, коли суб'єктом правопорушення є громадянин цієї держави. Частина 2 статті 6 закріплює особливі положення встановлення юрисдикцією державами-учасницями Конвенції, так держави-учасниці мають право встановлювати юрисдикцію щодо злочину у таких випадках: його вчинено особою без громадянства, яка проживає у даній державі, під час його вчинення громадянин даної держави був вбитий, або його вчинено при спробі примусити дану державу вчинити якісь дії чи утриматись від них **[Помилка! Джерело посилання не знайдено., Помилка! Джерело посилання не знайдено.]**.

Відповідно до статті 7 Конвенції про боротьбу з незаконними актами, спрямованими проти безпеки морського судноплавства, при першій необхідності держава-учасниця Конвенції, на території якої перебуває злочинець чи підозрюваний, відповідного до свого законодавства має право взяти його під варту або вжити інших заходів для початку досудового розслідування або видачі злочинця. Попереднє розслідування державою повинне проводитися відповідно до свого національного законодавства. Слід виокремити роль капітана судна у процесуальному середовищі, який відповідно до статті 8 має переважне право передати компетентним органам будь-якої іншої держави-учасниці будь-яку особу, щодо якої у нього є розумні підстави вважати, що вона вчинила злочин **[Помилка! Джерело посилання не знайдено.]**.

Доказування у кримінальному процесі є головним елементом, тому що саме завдяки доказуванню забезпечується встановленням істинних фактів у справі та провадиться захист прав учасників. Ключовими матеріалами по справі, що можуть допомогти на стадії розслідування є: дата, час та місцезнаходження судна на момент настання смерті, місце

настання смерті на борту, облік робочого часу померлої особи, детальний опис стану тіла, повні свідчення очевидців, зафіксовані після інциденту, дані щодо наявності ознак сп'яніння, фотографії з фіксацією часу та місця виявлення тіла померлого, а у випадку надання медичної допомоги – вид медичної допомоги та кваліфікація особи, що її надавала [Помилка! Джерело посилання не знайдено.].

Висновки. Розслідування вбивства на судні встановлює низку специфічних процесуальних процедур з метою чіткого та якісного розслідування інциденту. Перш за все, це обумовлено обмеженим простором, автономністю плавання та дією норм як міжнародного, так й національного права. Ефективність розслідування вбивства на судні нерозривно пов'язане з належністю та припустимістю доказів, що було зібрано на момент виявлення тіла померлого.

Завдяки Конвенції про боротьбу з незаконними актами, спрямованими проти безпеки морського судноплавства визначено процесуальні питання щодо визначення юрисдикції та передачі справи правоохоронним органам. Особливої ролі набуває координація між капітаном судна та правоохоронними органами, яка є ключовою гарантією безпеки для інших членів екіпажу та пасажирів. Отже, дотримання всіх процесуальних стандартів є необхідною умовою для проведення чіткого та неупередженого розслідування та встановлення істини по справі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Валуєва Л. В., Бабін Б. В. Юридична відповідальність на морському транспорті : навч. посіб. Одеса, 2014. 184 с. URL: https://library.nlu.edu.ua/POLN_TEXT/POSIBNIKI_2020/Valueva_2014.pdf
2. Casualty Investigation Code : Resolution MSC.255(84) (adopted on 16 May 2008). International Maritime Organization. URL: [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/MSAS/Documents/Res.MSC.255\(84\)CasualtyInvestigationCode.pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/MSAS/Documents/Res.MSC.255(84)CasualtyInvestigationCode.pdf)
3. Maritime Labour Convention, 2006 (MLC, 2006). International Labour Organization. URL: https://normlex.ilo.org/dyn/nrmlx_en/f?p=NORMLEXPUB:91:0:::P91_SECTION:MLCA_AMEND_A4
4. Faith and Burial for Seafarers. International Chamber of Shipping, 2022. URL: https://safety4sea.com/wp-content/uploads/2022/06/ICS-Faith-and-Burial-for-Seafarers-2022_06.pdf
5. Конвенція про боротьбу з незаконними актами, спрямованими проти безпеки морського судноплавства 1988 року. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_220#Text
6. Середа Г.Г. Морська кримінальна юрисдикція: актуальні проблеми теорії та практики. *Актуальні проблеми політики*. 2010. Вип. 39. С. 450-456. URL: http://app.nuoua.od.ua/archive/39_2010/59.pdf
7. What to Do in Case of Death of a Person Onboard Ship? *Marine Insight*. 2023. URL: <https://www.marineinsight.com/maritime-law/what-to-do-in-case-of-death-of-a-person-onboard-ship/>

УДК 629.5.023

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ ЗАГАЛЬНОЇ ПОЗДОВЖНОЇ МІЦНОСТІ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ МАЛИХ СУДЕН ІЗ HDPE

¹Кузнєцов А.І., ²Лисицький І.В.

¹Херсонського ННІ Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова
(Україна)

²Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)

Вступ. Позитивна тенденція щодо зростання кількості суден службово-допоміжного флоту з HDPE передбачає наявність коректної методики розрахунку загальної поздовжньої міцності.

Суттєва залежність загальної поздовжньої міцності малих суден з HDPE від температурних режимів експлуатації, тривалості прикладання та випадків навантажень, співвідношення головних розмірів передбачає наявність окремого підходу до нормування загальної поздовжньої міцності, оскільки вимоги класифікаційних товариств, на даний час, не містять відповідних рекомендацій, з урахуванням необхідності визначення прийнятних розмірів корпусних конструкцій.

Актуальність дослідження. Запропоновано напрями подальших досліджень щодо розрахунку загальної поздовжньої міцності для малих суден із поліетилену високої щільності. З метою оцінки загальної поздовжньої міцності на прикладі малого судна з HDPE з гідродинамічною схемою – тримаран, проведено відповідні розрахунки.

Аналіз результатів дослідження показує, що при розрахунках загальної поздовжньої міцності малих суден з конструкціями із HDPE неможливо отримати коректні результати без урахування екстремальних температурних режимів експлуатації конструкцій.

Також у випадку зберігання судна на кільблоках необхідно враховувати тривалість зберігання та можливі температурні умови зберігання (ангар, відкритий майданчик).

Постановка задачі Задачею дослідження є визначення особливостей розрахунків загальної поздовжньої міцності при проєктуванні конструкцій малих суден із HDPE.

Результати досліджень. Особливості механічних характеристик матеріалу та механізмів руйнування.

Поліетилен високої щільності (HDPE) — високов'язкопружний матеріал, що під дією постійного напруження спочатку пружно деформується, потім повільно тече (повзе), а після певного часу руйнується, навіть якщо напруження, що виникають, менші за миттєву межу міцності. Механічні властивості HDPE наведено у [3, с. 19; 4; 5].

Беручи до уваги зазначене, можна зауважити, що руйнуючі навантаження з часом зменшуються.

При цьому під дією постійного напруження руйнація відбувається через певний час. Чим менше напруження, тим довше матеріал витримує навантаження.

Заслуговує на увагу характерний механізм руйнування, що дозволяє розрізнити три області довговічності:

1. Короткочасна область з характерними для неї великими напруженнями, пластичним характером руйнування, що відбувається за період секунди – хвилини.

2. Область в'язкопружної повзучості з повільним накопиченням деформації та періодом руйнування години – місяці.

3. Область повільного зростання тріщин (SCG – Slow Crack Growth), під час якої відбувається утворення мікротріщин та крихке руйнування протягом періоду років — десятиліть.

Більш докладно з особливостями механізму в'язкопружної поведінки матеріалу

можливо ознайомитись у [3, с. 87; 6, с. 75, с. 82].

Наведений механізм руйнування у контексті даного дослідження може призвести до втрати стійкості елементів корпусних конструкцій [6, с. 287].

Втрата стійкості виникає у загальному випадку, коли у елементі конструкції виникають напруження, що перевищують допустимі. Необхідно взяти до уваги відносно низький модуль пружності. HDPE має модуль пружності приблизно 680–750 (при згинанні), 610–1600 (при розтягуванні) МПа, що в десятки разів нижче, ніж у сталі, що суттєво знижується у разі підвищення температури конструкції та призводить до зниження рівня критичних навантажень.

Доцільно розглянути механізм короточасної втрати стійкості, оскільки більшість експлуатаційних навантажень виникає саме у цьому діапазоні.

Короточасна втрата стійкості пластин з HDPE — це тимчасове випучування або деформація пластини під дією навантаження, яке зникає після зняття навантаження або його зменшення через їх низький модуль пружності і високу повзучість.

Особливості впливу довкілля (температурні впливу на механічні характеристики матеріалу)

Міцність HDPE значно залежить від температури навколишнього середовища, оскільки цей матеріал є термопластом, і його механічні властивості чутливі до нагрівання та охолодження.

При низьких температурах (нижче 0 °C) матеріал стає жорсткішим і крихким, ударна в'язкість різко падає через зниження рухливості молекулярних ланцюгів, що призводить до втрати здатності пластично деформуватися. Наприклад, при —50 °C HDPE може тріснути під час удару, хоча за +20 °C він витримав би таке ж навантаження без пошкоджень. Хоча, при цьому, міцність на розтяг трохи зростає (приблизно на 10–15%), ударна міцність та відносне подовження при розриві різко падають.

Оптимальний режим експлуатації матеріалу знаходиться у діапазоні температур 20–25 °C. При цьому, механічні характеристики становлять:

- міцність на розтяг: 20–37 МПа (залежно від марки).
- модуль пружності: 700–1400 МПа.
- ударна в'язкість: висока.

Матеріал зберігає баланс між жорсткістю та пластичністю. При підвищених температурах (40–80 °C) міцність та жорсткість знижуються.

При 60 °C міцність на розтяг може знизитися до 40 % від номіналу при 23 °C.

Повзучість (довготривала деформація під навантаженням) різко зростає у зв'язку зі збільшенням рухливості макромолекул та ослабленням міжмолекулярних зв'язків.

Залежність механічних властивостей матеріалу від температури показано на рис.1.

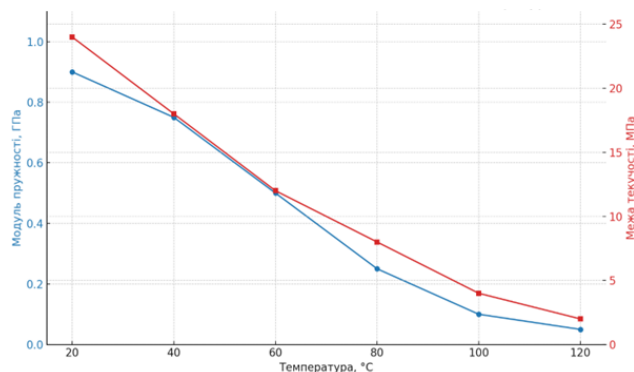


Рисунок 1 — Залежність механічних властивостей матеріалу від температури

Особливості коригування стандартної схеми розрахунку загальної поздовжньої міцності даного матеріалу

Розрахунок загальної поздовжньої міцності для малих суден може бути необхідним

за певних умов експлуатації. При цьому різні випадки дії навантажень у поздовжній вертикальній площині можуть істотно відрізнятися за критеріями міцності (насамперед за величиною розрахункових напружень, що допускаються). Розглянемо основні розрахункові випадки:

Динамічний вплив загальних навантажень у процесі руху швидкісного судна на зустрічному хвилюванні (основний випадок, що розглядається Регістром). У цьому випадку зовнішні знакозмінні навантаження є короткочасними у відповідних межах.

Величини допустимих напружень згідно з табл.2.

Таблиця 2 — Допустиме напруження

Матеріал	HDPE
σ_y, MPa	25
σ_d, MPa	12,5

У цьому випадку напруження, що досягають межі плинності, не є критичними. Звісно, необхідно мати належний коефіцієнт запасу міцності.

У той же час, конструкції корпусу можуть перебувати в різних температурних умовах. Наприклад, у літніх умовах у зонах апвелінгу температура палубних конструкцій може досягати 60 °С, температура днищових та бортових конструкцій може бути близько 12 °С. Значний градієнт (48 °С) здатний суттєво змінити характеристики еквівалентного бруса і, відповідно, розподіл нормальних напружень у поздовжніх в'язях корпусу.

Це відбувається за рахунок зміни міцності поздовжніх в'язей на тлі температурного режиму. У цьому випадку необхідно враховувати зміну характеристик еквівалентного бруса з урахуванням редукування поздовжніх в'язей з урахуванням коригування міцності і модуля пружності в'язей залежно від температурного режиму.

Загальна схема коригування параметрів еквівалентного бруса стосовно особливостей використовуваного матеріалу та результати коригування

Якщо розглянути перший варіант руху судна в літній період в умовах апвелінгу, можна відзначити, що різні райони корпусних конструкцій знаходяться в різних температурних умовах. Температура води може бути в діапазоні 10–13 градусів. Палуба у разі під впливом сонячного випромінювання нагрівається до температури 50–60 °С.

Це дані щодо Гвінейської затоки. У Чорному морі в північно-західній частині апвелінг відбувається регулярно. Температурний градієнт між днищовими та палубними конструкціями близько 40 градусів. Особливості аналізованого матеріалу корпусних конструкцій полягають у кольорі матеріалу. Чорні конструкції нагріваються значно більше. Різницю властивостей міцності матеріалів різних перекриттів судна необхідно дослідити. Характеристики головного центрального моменту інерції, положення нейтральної осі та, відповідно, моментів опору палуби та днища можуть залежати від температурних режимів експлуатації.

Для дослідження впливу температурних ефектів прийнято мале судно з гідродинамічною схемою – тримаран з наступними характеристиками, які представлені у таблиці 3:

Таблиця 3 — Характеристики малого судна з гідродинамічною схемою-тримаран

Вантажна водотоннажність судна при осаді за літньою вантажною ватерлінією (маса судна в повному вантажі), кг:	$m_{LDC} = 5.277 \times 10^3$
Занурення по КВЛ корпусом, м:	$d = 0.575$
Висота борту на міделі, м	$D = 1.296$
Ширина, м:	$B = 3.472$
Найбільша ширина судна, м:	$B_H = 3.511$
Довжина найбільша, м:	$L_H = 14.000$

Довжина по КВЛ, м:

 $L_{WL} = 13.968$

У випадку, що розглядається, корпусні конструкції судна можна розділити на 3 групи залежно від температурного режиму. Перша група — палубні конструкції, що нагріваються під впливом сонячної радіації до температури близько 60 °С. Друга група — конструкції бортів, що періодично замиваються забортною водою (передбачається, що в цьому випадку температура конструкцій буде близько 20 °С). Третя група — конструкції, що безпосередньо контактують із забортною водою — 12 °С. Також, з метою імітації поздовжнього прогину корпусу малого судна на гранях обраного відсіку корпусу було прикладено згинальні моменти 135 кН та 139 кН. Результати моделювання наведено на рис. 2, 3.

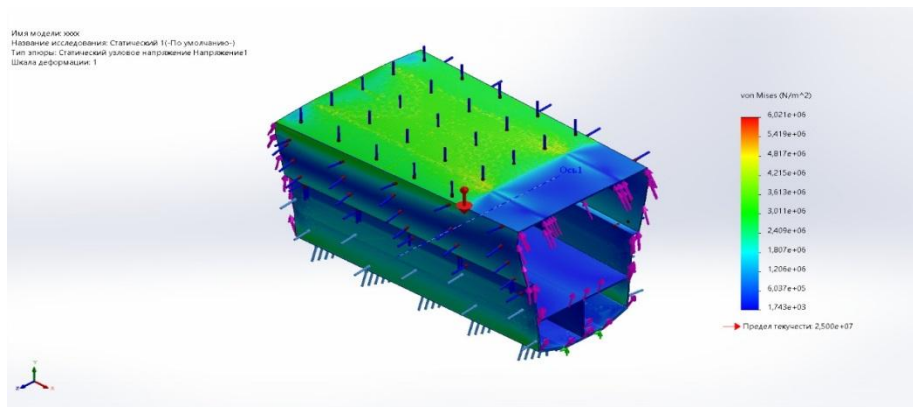


Рисунок 2 — Напруження, що виникають у конструкції

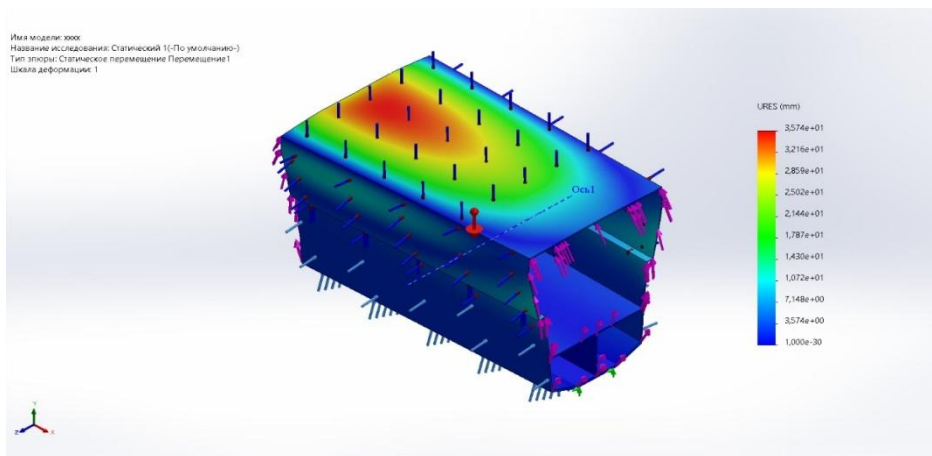


Рисунок 3 — Переміщення, що виникають у конструкції

Результати моделювання демонструють наявність двократного запасу міцності (максимальне напруження, що виникає у конструкції, — 6 мПа при допустимому напруженні 12,5 мПа). Максимальне переміщення складає 35,74 мм.

Висновки.

1. Аналіз результатів дослідження показує, що при розрахунках загальної поздовжньої міцності малих суден з конструкціями із HDPE неможливо отримати коректні результати без урахування екстремальних температурних режимів експлуатації конструкцій.

4. Необхідний окремий підхід до нормування загальної поздовжньої міцності малих суден з конструкціями з матеріалу, що розглядається, що повинен містити дослідження стійкості панелей перекриттів.

6. Є необхідність в окремій схемі нормування загальної поздовжньої міцності суден з конструкціями з матеріалу, що розглядається.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грабенко, А. А. Кузнецов, А. І. Особливості застосування поліетилену низького тиску в якості матеріалу корпусних конструкцій малих суден. Збірник наукових праць НУК. № 2. 2021. С. 3–7. [https://doi.org/10.15589/znp2021.2\(485\).1](https://doi.org/10.15589/znp2021.2(485).1)
2. Turk Lloyd. Tentative Rules for polyethylene crafts. 2002. 9 p.
3. Ward I. M., Sweeney J. (2013). Mechanical Properties of Solid Polymers. 3rd ed. Chichester : John Wiley & Sons. 475 p.
4. Технічні специфікації поліолефінових матеріалів компанії LyondellBasell. Режим доступу: <https://www.lyondellbasell.com>.
5. Технічні специфікації полімерних матеріалів компанії Borealis. Режим доступу: <https://www.borealisgroup.com>.
6. Brinson H. F., Brinson L. C. (2015). Polymer Engineering Science and Viscoelasticity. New York : Springer, 2015. 489 p.

УДК 621.396.932

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ РЛС Х-ДІАПАЗОНУ ЗА КРИТЕРІЄМ СПІВВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ/ШУМ

Купровський В.І.

*Національний університет «Одеська морська академія»
(Україна)*

Вступ. Одним з основних показників ефективності навігаційних РЛС є необхідне співвідношення сигнал/шум, яке забезпечує потрібні характеристики виявлення із заданими ймовірностями правильного виявлення D та помилкової тривоги F . Для оцінки даного параметра застосовують різні алгоритми, складність та ефективність яких залежить від технічних характеристик РЛС, умов її роботи та характеристик цілей. Сучасні морські навігаційні РЛС (НРЛС) Х-діапазону забезпечують ефективне і надійне виявлення і визначення координат морських цілей на основі обробки первинної радіолокаційної інформації (РЛІ). Виявлення цілей з заданою ймовірністю забезпечується технічними та експлуатаційними характеристиками НРЛС [1, 2]. Більшість морських НРЛС завдяки їх конструктивним особливостям реалізують не оптимальну обробку первинної РЛІ і працюють з фіксованим періодом повторення некогерентних зондуючих імпульсів. В цих умовах одним із важливих показників для оцінки якості їх роботи стає необхідне співвідношення сигнал/шум (SNR — Signal-to-Noise Ratio).

Актуальність досліджень. У найбільш загальному випадку якість виявлення цілі залежить від величини перевищення корисного сигналу над рівнем шуму (перешкоди). При вирішенні задачі виявлення із заданими ймовірностями правильного виявлення та помилкової тривоги необхідне співвідношення сигнал/шум q бажано мати мінімальним. Найкращі якісні показники виявлення можуть бути отримані лише за допомогою оптимальної обробки сигналів. Зважаючи на те, що сучасні морські радары реалізують не оптимальну обробку радіолокаційної інформації, значення їх q перевищують аналогічний показник для систем з оптимальною обробкою. Однак завдяки впровадженню високоефективних технологій обробки РЛІ, гнучких алгоритмів формування зондуючих сигналів вдається отримати значення q досить близькі до систем з оптимальною обробкою. [3–6].

Аналіз технічної документації морських НРЛС різних виробників [7–10] дає можливість отримати мінімальний перелік їх технічних і експлуатаційних характеристик і оцінити в першому наближенні можливості станцій щодо вирішення навігаційних задач. Однак серед наведених даних як правило відсутні такі важливі параметри, як:

- чутливість і діапазон її змінення для різних умов роботи;
- ймовірність виявлення цілей на різних дальностях і різних режимах роботи;
- характеристики виявлення цілей для різних співвідношень між D та F ;
- необхідне співвідношення сигнал/шум для виявлення цілей з заданими ймовірностями.

Відсутність перелічених даних обумовлена об'єктивною неможливістю надати їх однозначну оцінку. Але, з іншого боку, для повноцінного отримання характеристик НРЛС, досконалого аналізу їх можливостей, — знання цих параметрів необхідне. Важливе місце в цьому переліку займає необхідне співвідношення сигнал/шум для виявлення цілей з заданими ймовірностями. Будь яке дослідження ефективності радарів незалежно від їх типів і призначення супроводжується оцінкою цього параметра і впровадженням умов для його покращення.

У роботі авторів F. Harris та C. Dick [11] підкреслено, що SNR визначає якість сигналу, що дозволяє оцінити надійність реалізованих алгоритмів його обробки. Запропоновано два методи оцінки, які забезпечують високу точність для мінімальних значень SNR: метод коригованої оцінки (Corrected SNR Estimator) та метод оцінки на основі

швидкого перетворення Фур'є (FFT Based Estimator).

У роботі [12] розглянуто проблеми виявлення малорозмірних цілей морськими радарними та алгоритми оптимізації відношення сигнал/шум при узгодженій фільтрації. Один із перспективних напрямів застосування радарів розглянуто у роботі [13]. Запропоновано новий метод періодичної фільтрації, який дозволяє, зокрема, покращити співвідношення сигнал/шум у (4–5) разів. У роботі [14] розглянуто складні алгоритми оцінки SNR, засновані на класифікації та регресії глибокого навчання. Для зниження обчислювальної складності використовується вхідний спектр потужності сигналу. Описані методи мають високу точність оцінки, особливо в каналах з різним рівнем шумів та в умовах багатопроменевого поширення радіохвиль. Автори роботи [15], аналізуючи обробку сигналу радара з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ), з метою поліпшення відношення сигнал/шум пропонують алгоритм інтерполяційного полінома Лежандра та обробку кадру даних за допомогою вікна Гауса.

Таким чином, розглянуті наукові публікації свідчать про високу актуальність оцінки і покращення співвідношення сигнал/шум. Методика оцінки і її складність залежить від специфіки умов роботи НРЛС, способу обробки РЛІ, характеристик сигналів та цілей. Алгоритми, які для цього використовують, визначаються низкою суперечливих факторів і можуть бути достатньо складними.

У зв'язку з цим виникає потреба в розробці спрощених методик для аналітичних або графічних розрахунків низки найбільш критичних параметрів, які дозволять отримати всеосяжне уявлення о можливостях конкретної НРЛС. В основу таких методик може бути покладений матеріал з класичних видань [3,4,5,16], адаптований до морських навігаційних РЛС з урахуванням специфічних умов їх використання і характеристик морських цілей.

Постановка задачі. У статті розглянуто спрощену методику визначення необхідного співвідношення сигнал/шум при обробці некогерентної пачки імпульсів для суднових НРЛС Х-діапазону. В її основі — оцінка інтервалу кореляції пачки відбитих від цілі сигналів та порівняння його з періодом зондуючих імпульсів під час роботи на різних шкалах дальностей. Як приклад вибрано чотири станції різних виробників, що мають близькі характеристики [5,6,7,8]: FURUNO FR-8122, Bridge Master E, JRC JMA-7110-6XA, KODEN MDC-5212. Результати дослідження, представлені у вигляді графіків та таблиць, дають можливість оцінити необхідний рівень співвідношення сигнал/шум для НРЛС різних виробників, виявити особливості його змінення та сформулювати шляхи покращення цього важливого параметра.

Результати досліджень. Виявлення цілей проводиться в області простору, обмеженої заданим тілесним кутом ψ та діапазоном дальностей від R_{min} до R_{max} . Для суднових НРЛС $\psi = 360^\circ$ та число кутових елементів огляду n в горизонтальній площині дорівнює $n = \frac{\psi}{\theta}$, де θ — ширина спрямованості антени (ДСА) в горизонтальній площині. Якщо час періоду огляду позначити $T_{огл}$, то час знаходження цілі в межах ДСА в горизонтальній площині дорівнює

$$t_0 = \frac{T_{огл}\theta}{\psi} \quad (1)$$

Сукупність імпульсів в інтервалі t_0 — пачка імпульсів, N — число імпульсів в пачці

$$N = t_0 \cdot F_{\Pi} = \frac{T_{огл}\theta F_{\Pi}}{\psi}, \quad (2)$$

де F_{Π} — частота повторення зондуючих імпульсів ($T_{\Pi} = \frac{1}{F_{\Pi}}$ — період повторення).

Більшість морських цілей можна подати у вигляді моделі, що складається з сукупності блискучих точок. Зі зміною ракурсу цілі змінюються амплітуда, фаза, частота, а також положення радіолокаційного центру. Динаміку зміни зазначених параметрів характеризують спектром або кореляційною функцією флуктуацій. Найбільш простою

оцінкою швидкості флуктуацій є їх інтервал кореляції τ_k . Зазвичай вважають, що на відрізок рівному або менше τ_k , значення сигналу повністю корелювані, а значення, розділені інтервалом більше τ_k — не корелювані (незалежні при гаусових флуктуаціях). Відповідно до цього вводять число незалежних значень сигналу N_H за час t_0

$$N_H = 1 + \frac{t_0}{\tau_k} \quad (3)$$

Для наближеної оцінки τ_k можна використовувати формулу [3]

$$\tau_k \approx \frac{\lambda}{4L_{\text{ц}}\Omega_{\text{ц}}}, \quad (4)$$

де $L_{\text{ц}}$ — лінійний розмір цілі, м; $\Omega_{\text{ц}}$ — швидкість змінення ракурсу цілі, рад/с; λ — довжина хвилі, м.

Залежно від співвідношення τ_k , t_0 та $T_{\text{п}}$, виділяють кілька типів флуктуацій пачок сигналів [4]. Так при $T_{\text{п}} \geq \tau_k$ ($N_H = N$) — швидко флуктуючий сигнал; при $T_{\text{п}} < \tau_k < t_0$ ($N_H < N$) — сигнал із флуктуацією змішаного типу.

Чим менше інтервал кореляції τ_k , тим більше виражені швидкі флуктуації і навпаки, чим інтервал кореляції більше (відбиття від малорозмірної цілі), тим більше флуктуації змішаного типу.

Розрахунок необхідного відношення потужностей сигналу та шуму q з достатньою для практики точністю найпростіше виконувати за формулою Бартон [3]. При цьому були прийняті такі значення необхідних параметрів: ймовірність правильного виявлення $D = 0,95$, ймовірність помилкової тривоги $F = 10^{-6}$; $L_{\text{ц}} = 100$ м; $\Omega_{\text{ц}} = 0,1$ рад/с; $\tau_k = 0,75$ мс; $\lambda = 3$ см.

$$q = q_1(D, F) - 10 \lg N + L_i(q_1, N) + L_f(D, F, N_H), \quad (5)$$

де $q_1(D, F)$ — відношення сигнал/шум для виявлення одного імпульсу, дБ;

$L_i(q_1, N)$ — втрати при некогерентному накопиченні, дБ;

$L_f(D, F, N_H)$ — флуктуаційні втрати при N_H імпульсах в пачці, дБ.

Результати розрахунку за формулою (5) наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 — Розрахункові значення основних параметрів суднових НРЛС Х-діапазону

Шкала дальності, nm	t_0 , мс	T_{Π} , мс	N , імп.	N_H , імп.	q , дБ	Примітки
FURUNO FR-8122						
1: 0,125 – 1,5	6,6	0,5	14	11	5,45	$T_{\Pi} < \tau_K < t_0$ ($N_H < N$)
2: 1,5 – 3,0	8,8	0,8	11	11	6,75	
3: 3,0 – 72,0	13,0	2,0	8	8	7,71	
BridgeMaster E						
1: 0,125 – 0,5	7,4	0,3	23	11	4,11	$T_{\Pi} < \tau_K < t_0$ ($N_H < N$)
2: 0,5 – 3,0	14,0	0,6	22	18	4,30	
3: 3,0 – 72,0	14,0	1,3	11	11	6,35	$T_{\Pi} \geq \tau_K$ ($N_H = N$)
JRC JMA-7110-6XA						
1: 0,125 – 0,5	12,5	0,44	28	18	3,48	$T_{\Pi} < \tau_K < t_0$ ($N_H < N$)
2: 0,5 – 0,75		0,6	22	18	4,18	
3: 0,75 – 3,0		0,8	15	15	5,20	$T_{\Pi} \geq \tau_K$ ($N_H = N$)
4: 3,0 – 24,0		1,3	0	10	6,75	
5: 24,0 – 72,0		1,5	9	9	7,37	

Продовження таблиці 1

KODEN MDC-5212						
1: 0,125 – 0,5	12,5	0,38	33	18	2,88	$T_{\text{п}} < \tau_{\text{к}} < t_0$ ($N_{\text{н}} < N$)
2: 0,5 – 1,5		0,38	33	18	2,94	
3: 1,5 – 6,0		0,42	30	18	3,08	
4: 1,5 – 12,0		0,5	25	18	3,38	
5: 3,0 – 12,0		0,7	18	18	4,78	
6: 3,0 – 24,0		1,0	13	13	5,90	$T_{\text{п}} \geq \tau_{\text{к}}$ ($N_{\text{н}} = N$)
7: 6,0 – 64,0		1,7	8	8	8,01	

З аналізу таблиці випливає, що для всіх розглянутих НРЛС при роботі на шкалах дальності до (3–6) пм некогерентний сигнал має флуктуації змішаного типу, а на шкалах більше (3–6) пм — пачка, що швидко флюктує, і, відповідно, виявляється більше необхідне співвідношення сигнал/шум. Зі зростанням $\tau_{\text{к}}$ (малорозмірна ціль) сигнали з флуктуаціями змішаного типу приймаються у більшому діапазоні дальностей ($N_{\text{н}} < N$) і, як наслідок, зростає необхідне значення q .

Зі зростанням D і зменшенням F збільшується складова $q_1(D, F)$ у формулі (5), що призводить до зростання q . Збільшення F дозволяє знизити q , проте для цього необхідно значне підвищення чутливості приймача. Зі збільшенням N зростає $L_i(q_1, N)$, але його зростання значно менше величини $10 \lg N$, що в кінцевому підсумку призводить до зниження q .

На рис.1,2 представлені графіки залежності співвідношення сигнал/шум q для різних шкал дальностей розглянутих НРЛС: FURUNO FR-8122, Bridge Master E, JRC JMA-7110-6XA, KODEN MDC-5212. Номери шкал дальностей співпадають з даними таблиці 1.

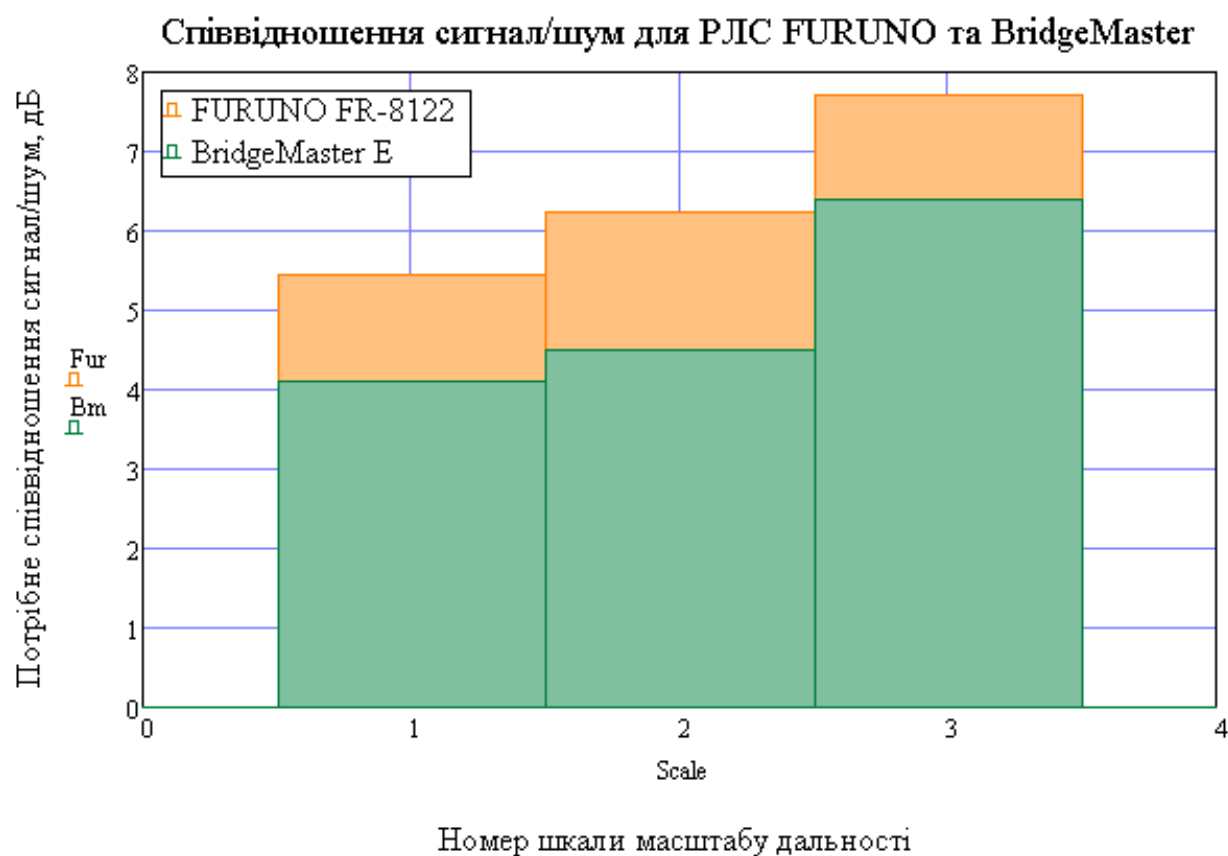


Рисунок 1 — Необхідне співвідношення сигнал/шум для різних шкал дальностей НРЛС FR-8122 та Bridge Master E

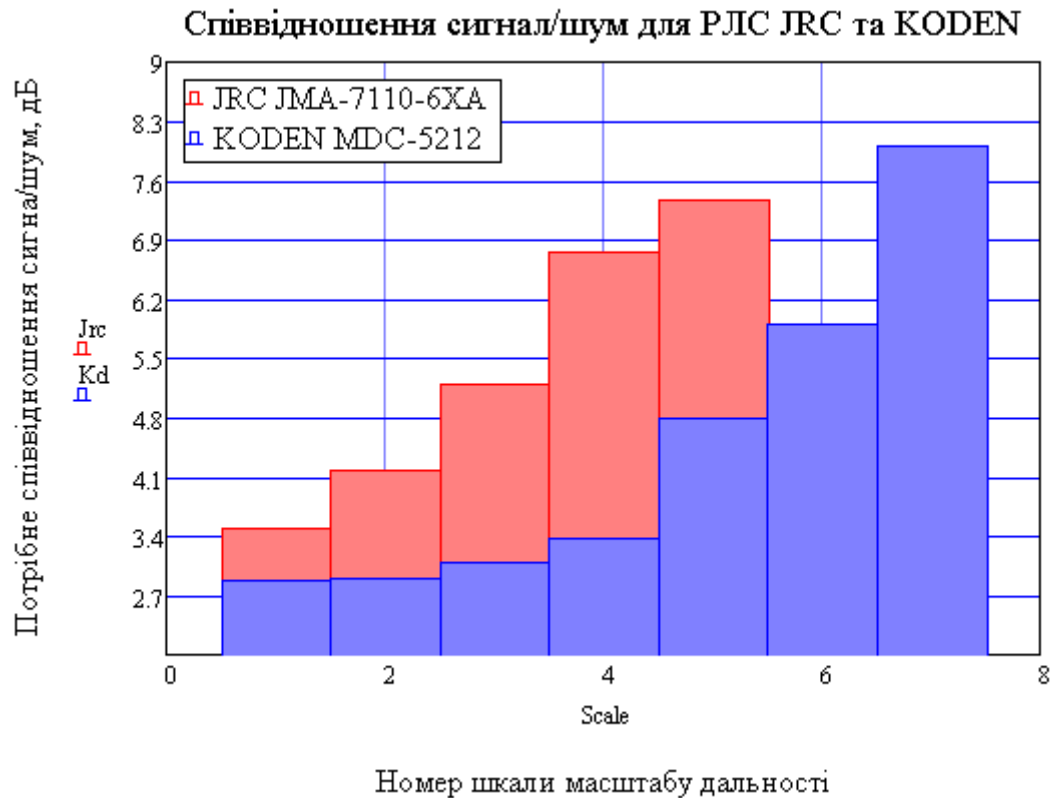


Рисунок 2 — Необхідне співвідношення сигнал/шум для різних шкал дальностей НРЛС JMA-7110-6XA та MDC-5212

З їхнього аналізу випливає, що для НРЛС FR-8122 та Bridge Master E необхідне співвідношення сигнал/шум q у середньому більше, ніж для JMA-7110-6XA та MDC-5212. Однак різниця значень q для всіх шкал дальностей для FR-8122 та Bridge Master E не більше 2,3 дБ, тоді як для JMA-7110-6XA та MDC-5212 вона майже вдвічі більше і складає (4–5) дБ.

Висновки.

1. Порівняння необхідного співвідношення сигнал/шум q для розглянутих типів НРЛС свідчить про різний рівень їх чутливості, а з іншого боку – про можливість обробки і виявлення сигналів від цілей з заданою ймовірністю. Це особливо критично під час роботи на малих шкалах дальностей (0,125–3,0 nm). Так, найбільш стабільні показники за рівнем q мають НРЛС FR-8122 та Bridge Master E. Проте JMA-7110-6XA та MDC-5212 забезпечують в 1,5–2 рази менше співвідношення сигнал/шум на відстанях до 3 nm.

2. Зменшити потрібне значення співвідношення сигнал/шум q в некогерентних НРЛС імпульсного типу можна за рахунок зниження $T_{\text{п}}$, тобто забезпечення переважно використання некогерентного сигналу з флуктуаціями змішаного типу, коли виконується співвідношення $T_{\text{п}} < \tau_{\text{к}} < t_0$. Однак треба враховувати, що в НРЛС з фіксованим періодом повторення $T_{\text{п}}$ зонduючих імпульсів при його зниженні підвищується ймовірність появи вторинних ехо-сигналів, особливо на шкалах дальностей (0,125–3,0) nm.

3. Потрібне співвідношення сигнал/шум значною мірою визначається флуктуаційними втратами, які можна зменшити, використовуючи:

- формування зонduючого сигналу на декількох частотах;
- використання швидкої перебудови частоти зонduючого сигналу;
- використання режиму вобуляції (гнучкої зміни періоду повторення зонduючих імпульсів $T_{\text{п}}$).

4. Використання когерентної пачки імпульсів при даних умовах дає енергетичний вииграш в межах (2–4) дБ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Resolution MSC.192(79) (adopted on 6 December 2004): ADOPTION OF THE REVISED PERFORMANCE STANDARDS FOR RADAR EQUIPMENT
2. Recommendation ITU-R M.1313: TECHNICAL CHARACTERISTICS OF MARITIME RADIONAVIGATION RADARS
3. D.K. Barton. Radar Equations for Modern Radar. – ARTECH HOUSE, Norwood: 2013. 448p.
4. St. Rostoniec. Fundamentals of the Radiolocation and Radionavigation: Springer International Publishing AG. 2023. 492 p.
5. D.K. Barton. Radar System Analysis and Modeling. ARTECH HOUSE, Radar Library, Norwood: 2004. 566p.
6. M.A. Richards. Fundamentals of Radar Signal Processing. 3rd Edition. McGraw Hill Education: 2022. 736p.
7. Bridge Masrer E Radar. Ship's Manual: Northrop Grumman Sperry Marine B.V., 2005. 526p.
8. KODEN. Operation Manual MDC-5200/MDC-5500 series.: O.M.E. 0093155002-00, 2016. – 182p.
9. JMA-7110-6XA/6XAH. Instruction Manual: Japan Radio Co., Ltd. 2008. 512p.
10. FURUNO. Operator's Manual. Marine Radar, model FR-8062, FR-8122, FR-8252: Furuno Electronic CO., LTD, 2009. 123 p.
11. Harris F., Dick C. SNR Estimation Techniques for Low SNR Signals/ Conference: Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC):Taiwan. 2015. URL: <https://www.researchgate.net/publication/261084744> - 2015-pdf-e.pdf
12. Islam M.S., Hana H., Jae-II Lee, Jung M.G, Chong U. Small Target Detection and Noise Reduction in Marine Radar Systems: 2013 International Conference on Electronic Engineering and Computer Science, IERI Procedia 4 (2013). 2013. P. 168–173. DOI:10.1016/j.ieri.2013.11.024
13. Lin, Y.; Zhang, L.; Han, H.; Li, Y.; Shen,W.;Wang, Y. Periodic-Filtering Method for Low-SNR Vibration Radar Signal. Remote Sens. 2023, 15, 3461. <https://doi.org/10.3390/rs15143461>
14. Zheng S., Chen S., Yang Z., Yang X. Deep Learning-Based SNR Estimation: IEEE Open Journal of the Communications Society PP(99):1-1. 2024. DOI:10.1109/OJCOMS.2024.3436640
15. Tan G-Z., Hong-Wei LI1, Fan C-Z. Method for Estimating the Parameters of LFM Radar Signal: ITM Web of Conferences 11, IST2017. DOI: 10.1051/itmconf/20171108004
16. A. Bole, A. Wall, A. Norris. Radar and ARPA Manual. 3rd Edition. Elsevier Butter Worth Heinemann. 2014. 533p.

БЕЗПІЛОТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА

Лаврич Ю.М., Підчасов А.Ю.

*Інститут транспортних систем і технологій НАН
(України)*

Вступ. Безпека на транспорті є найвищим пріоритетом, забезпечення безпеки судноплавства завжди було одним з актуальних питань, якому завжди приділялась підвищена увага. Судноплавство є галуззю, на яку мають безпосередній вплив ризики різноманітного характеру, які обумовлені складністю техніко-технологічних систем судна та з впливом факторів зовнішнього середовища і природно-кліматичних ризиків у процесі експлуатації судна, беззаперечно пов'язані з рівнем безпеки судноплавства.

Кожне покоління технологічного розвитку надавало пріоритет безпеки на морі, сприяючи покращенню її стандартів та наголошуючи на важливості постійного розвитку теоретичної бази. Забезпечення безпеки завжди реалізувалося шляхом використання технічних засобів, що відповідають сучасним вимогам безпеки з урахуванням характеристик нового покоління суден та останніх науково-технічних досягнень у галузі безпеки судноплавства. Збільшення частки морського та річкового транспорту в обсягах міжнародних вантажних перевезень та пасажиропотоків, призводить до необхідності зростання вимог до безпеки на морі в тому числі через технічне переоснащення морського транспорту.

Це вплинуло на безпеку їх експлуатації, як з точки зору навігаційних факторів, умов судноплавства, характеристик вантажу, так і впливом людського фактору, який займає місце серед причин аварій та безпосередньо впливає на статистику аварій світового флоту, тому дослідження питань забезпечення безпеки морських суден серед актуальних та надважливих завдань.

Початок ХХІ століття ознаменувався активним будівництвом великогабаритних суден, водотоннажністю у сотні тисяч тонн, довжиною до 400 м, шириною до 65 м та осадкою до 23 м, які мають інші, по своєму особливі, маневрові характеристики та параметри керованості, в порівнянні із суднами традиційних розмірів. Одночасно з цим зросла й висота надводного борту, що досягає десятків метрів, що призвело до значного збільшення парусності, особливо для контейнеровозів і пасажирських суперлайнерів.

За сукупного впливу всіх вищезгаданих несприятливих для визначення місцезнаходження судна факторів, під час плавання в прибережній зоні, судно може опинитися в умовах коли уточнення його поточних координат і контроль за місцезнаходженням на розрахунковій траєкторії руху буде неможливо [1].

Відповідно до вимог Міжнародної морської організації ІМО, викладених у міжнародній конвенції SOLAS-74 та інших керівних документах щодо планування рейсу судна, для надійного забезпечення безпеки мореплавства місцезнаходження судна необхідно визначати щонайменше двома різнорідними методами.

Це зумовлює нагальну необхідність технічної розробки та впровадження у практику судноводіння засобів підводної навігаційної системи (ПНС) забезпечення на базі підводних гідроакустичних систем з елементами штучного інтелекту [2].

Цілодобовий і всепогодний моніторинг водної поверхні в інтересах забезпечення безпеки судноплавства можуть забезпечити радіолокаційні станції (РЛС)[3].

Однак є чимало факторів, що обмежують використання РЛС або значно знижують точність її показань. РЛС не завжди може забезпечити безпеку плавання при малій ширині берегового фарватеру, дії течії, сильного хвилювання, несприятливі гідрометеорологічні умови (грозові хмари, вітер, дощ), що не дозволяють повністю використовувати РЛС для навігації. Користуючись радіолокатором, важко вимірювати відстань до ділянки берегової лінії у тих місцях, де вона вдається у бік суші, в повному обсязі об'єкти доступні для

радіолокаційного спостереження. Хвилі часто унеможливають своєчасно розрізнити навіть такий об'єкт, як зустрічне судно, крім того, дуже ймовірні помилки в упізнанні об'єкта, що спостерігається. Дальність виявлення РЛС обмежена дальністю прямої видимості та залежить від висот розміщення антени РЛС та об'єкта спостереження. Розміщення на борту судна РЛС не дозволяє використання більших рівнів потужності передавача, що має відповідати встановленим санітарним нормам [4].

З урахуванням особливостей застосовуваної типової технології радіолокації, застосування частотного діапазону, характеристик зондувальних сигналів та ін., РЛС судна не завжди може забезпечити вимірювання малих відстаней до місця причалювання, залишаючи необхідність суб'єктивної оцінки ситуації.

Останнім часом найактуальнішою темою в технічній сфері стали безпілотні літальні апарати (БЛА), які розвиваються у всіх стихіях нашої планети — у повітрі, на землі та на морі. Зростання вартості експлуатації пілотованих літаків і гелікоптерів поряд із потребою в систематичному спостереженні за обстановкою на океанських та морських районах плавання, активізувала інтерес до створення та застосування БЛА корабельного базування. Провідними країнами у галузі розробки БЛА є США, КНР, Ізраїль, Україна. Незважаючи на те, що апарати в основному проектується для військового застосування, багато розробників розглядають можливість адаптації існуючих платформ та створення спеціалізованих БЛА, призначених для виконання завдань на користь безпеки судноплавства.

Сучасні БЛА літакового типу мають великі дальність дії та тривалість виконання завдання, а також здатні нести різні засоби контролю морської поверхні.

Але, з урахуванням масогабаритних характеристик, вимог до злітно-посадкової смуги та ін., цілком очевидно, що для застосування на судні літакового БЛА неможливо, необхідні БЛА вертикального зльоту та посадки (вертолітного типу).

У міру того, як безпілотні літальні апарати виконують все більше різних завдань, збільшується і їхнє корисне навантаження, що призводить до появи великих розмірів БЛА. Але зростаючий розмір створює проблеми розміщення БЛА на обмеженому просторі палуби судна, що впливає на паркування та злітно-посадкові дії. Більшості середніх і великих БЛА в даний час потрібні особливі умови для зльоту та посадки, а деяким навіть потрібне допоміжне обладнання для виконання цих завдань.

Нездатність вирішити проблеми паркування та зльоту-посадки може значно обмежити сферу використання БЛА. Ще в 60-х роках США розробили перший палубний вертоліт безпілотного QH-50, розпочавши епоху морських безпілотних літальних апаратів палубного базування.

Оцінюючи можливості використання БЛА для підвищення безпеки судноплавства, постало питання судноплавних компаній про необхідність БЛА з вертикальним зльотом, який далі летить літаком, здійснюючи аерофотозйомку та моніторинг, при цьому він повинен сідати також вертолітним, тому що на кораблях і судах обмежений простір.

У 2009 році компаніями «TeledyneRyan» та «SchweizerAircraft» розроблено морський безпілотний літальний апарат вертолітного типу MQ-8B FireScout на основі пілотованого вертольота Schweizer 330SP, радіус його дії обмежений 240 км.

У 2013 році компанія «NorthropGrumman» розробила безпілотний літальний апарат MQ-8C на основі гелікоптера Bell 407, здатного виконувати завдання розвідки та моніторингу обстановки, за межами візуальної видимості.

У 2024 році DARPA оголосило, що проект «Advanced No-Ground Facility Launch and Recovery Unmanned Aerial Vehicle» (ANCILLARY) завершений, в ході якого розроблений новий тип безпілотних літальних апаратів вертикального зльоту, що не вимагає допоміжного обладнання для використання у водах.

Таким чином, можливість застосування нового засобу забезпечення безпеки судноплавства можливе лише на основі БЛА з вертикальним зльотом та посадки, розміщеного на борту судна. Вертикальний зліт і посадка може бути досягнуто різними

способами. Наприклад, конструкція Sikorsky з батареїним живленням спирається на хвостове оперення на землі і злітає як вертоліт з гвинтами, спрямованими вгору, а потім нахиляється вперед, щоб летіти в повітрі горизонтально, як літак.

Вибір виду джерела енергії зльоту-посадки БЛА визначає характеристики його цільового використання, насамперед, дальність, швидкість, час моніторингу.

Доцільно для горизонтального польоту застосування інших джерел енергії, у тому числі й відновлюваних, а підйом із використанням енергії стисненого повітря. Для цього перелік обладнання, необхідного для зльоту-посадки БЛА, доцільно мати гібридний накопичувач енергії, розміщеного на палубі судна, що дозволить багаторазове використання БЛА та забезпечити підвищення безпеки судноплавства.

Конструктивно-технологічна основа, яка використовується в існуючих різновидах сучасних БЛА, дозволяє БЛА, що розміщується на самому судні, створення нового типу високоінформативного засобу як елемента загальної системи забезпечення безпеки судна (СБС). Використання інформаційних джерел про поточну обстановку, що ґрунтуються на різних принципах отримання інформації, дозволяє забезпечити багатофункціональність нової СБС. БЛА являє собою одну з основних складових частин СБС, що складається з власне з БЛА, його бортового та суднового обладнання, а також засобів перед та післяпольотного обслуговування. Функціональна взаємодія широкого кола користувачів з БЛА наземного базування, у тому числі велику тривалість польоту, добре відпрацьована і не вимагає пошуку оптимальних схем, але необхідно врахувати специфіку виконання завдань при розміщенні на судні. Однак це не означає, що вони повинні проектуватися без урахування особливостей застосування, особливо щодо можливостей цільової апаратури з пошуку та виявлення морських об'єктів і каналів трансляції інформації на судно. Як правило, для побудови комплексу СБС з БЛА, завдання полягає у виборі з існуючих випробуваних платформ з оптимальними льотними характеристиками та встановленням на БЛА спеціалізованого бортового обладнання (радіоелектронних та оптичних засобів моніторингу морської поверхні).

Але, враховуючи, що сучасні БЛА є програмно-апаратним засобом, створення якого неможливе без розробки вітчизняного спеціального програмного продукту (СПП). Сучасне СПП дозволяє створення самонавчання системи штучного інтелекту БЛА, що передбачає можливість виконання БЛА судна не тільки злітати з палуби судна, а й здійснювати посадку на носій, що рухається, після виконання поставленого завдання. Цей варіант найбільше відповідає вимогам автономності судна і дозволяє багаторазово застосовувати БЛА для вирішення необхідних завдань. На інформаційно-керівному пункті (ІУП) судна має бути розміщене обладнання для обробки та візуалізації інформації, що надходить із БЛА у процесі моніторингу.

Створення системи безпеки з БЛА судна пов'язане з необхідністю вирішення низки технічних завдань, які виникають розробки зразків наземного (аеродромного) базування. Це зумовлено специфікою розміщення та експлуатації БЛА на судні, і тому при побудові комплексу вертолітного типу необхідно враховувати низку особливостей, до основних з яких можна віднести:

- вести розвідку під час руху судна, що обумовлює низку вимог до технічних параметрів системи керування щодо рішення навігаційних та цільових завдань;
- розвідка може вестись у призначених та нових районах, межі яких щодо БЛА та судна визначаються дальністю та пеленгом (курсним кутом щодо курсу корабля);
- планування застосування та управління БЛА при зльоті та посадці здійснюється автоматично або оператор ІУН судна.

Інформація, що надходить від зовнішніх джерел, БЛА та від РЛС судна (насамперед), ПНС повинна оброблятися спільно. Розміщення на складному, технічно насиченому судні БЛА, систем запуску, управління та ін., пред'являє низку обмежень забезпечення надійного функціонування системи при впливі динамічних навантажень в умовах морської хитавиці, засобів передстартової підготовки БЛА та злітно-посадкового

обладнання, забезпечення вибухопожежної безпеки на злітно-посадковій площі. Функціонування СБС має забезпечити електромагнітну сумісність усіх радіоелектронних засобів самої системи та судна, надійне функціонування радіолінії «БЛА-ІУП» та стійкість передачі даних в умовах перешкод. Дуже важливим є вибір виду конструктивно-технологічного виконання СБС з огляду на експлуатацію в умовах впливу морського середовища. Ступінь захисту системи повинен забезпечити пиловологозахист від впливу морського середовища, яка має відповідати ступеню IP67.

Висновки. Безпека судноплавства завжди була пріоритетним завданням, забезпечення якого реалізовувалася на основі останніх науково-технічних досягнень. Сучасний рівень науково-технічних досягнень дозволив появу нових технічних засобів та перспективних гнучких технологій багатоцільового застосування, що дозволяє суттєво підвищити ступінь безпеки судноплавства шляхом використання безпілотних літальних апаратів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мельник О.М., Онищенко С.П., Логінов О.В., Окулов В.І., Пуляєв І.О. Актуальні проблеми морської безпеки та сучасні шляхи забезпечення охорони судна. Х.: Комунальне господарство міст, 2021, том 6, випуск 166. С. 204–210. DOI 10.33042/2522-1809-2021-6-166-204-210
2. Давидов В.С., Ляшко О.В., Любарець І.О. Підвищення ефективності та надійності навігаційного забезпечення безпеки плавання великогабаритних морських суден в прибережній зоні за допомогою гідроакустичних систем. К.: Збірник наукових праць Національного транспортного університету. Водний транспорт, 2025, № 3 (44). С. 34–46. doi.org/10.33298/2226-8553.2025.3.44.04
3. Зубков А.М., Красник Я.В., Мартиненко С.А., Пицик М.В. Радіолокаційна станція міліметрового діапазону для забезпечення безпеки судноплавства: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2021». Херсон: Херсонська державна морська академія, 2021. С.110–113.
4. ДСанПіН 3.3.6-2002 Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами елект-ромагнітних полів.

MONITORING AND EVALUATION FRAMEWORK FOR PROJECT BUILDING RESPONSE FRAMEWORKS UNDER EXISTING & NEW MARINE POLLUTION CHALLENGES IN THE BLACK SEA

Rubel O., Snigirova A.

*Black Sea Branch of Ukrainian Environmental Academy of Science
(Ukraine)*

Project monitoring and evaluation (M&E) is an essential aspect of project management that helps partners and stakeholders assess the effectiveness and progress of project's initiatives. Here we would like to provide some key components to understand how M&E works, which is crucial for achieving the project goals (reference).

Project monitoring and evaluation are systematic processes that involve collecting, analysing, and using data based on developed indicators to track a project's progress, assess its performance, and determine its impact. These processes help project managers ensure that their initiatives are on track, identify areas for improvement, and demonstrate accountability to stakeholders, including funders, donors, and the community.

Monitoring is the systematic and routine collection of information from projects and programmes. The M&E framework underpin four main purposes:

- 1) to learn from experiences to improve practices and activities in the future;
- 2) to have internal and external accountability of the resources used and the results obtained;
- 3) to take informed decisions on the project future impacts;
- 4) to promote empowerment of beneficiaries of the project.

Monitoring is a periodically recurring task already beginning in the planning stage of a project or programme. Monitoring allows results, processes and experiences to be documented and used as a basis to steer decision-making and learning processes. Monitoring implied the development of various types of indicators, such as outcomes indicators, indicators of achievements, impacts indicators, etc. Based on collected data monitoring provides the foundation for the project progress` check. The data acquired through monitoring is used to evaluate the efficiency of the project.

Evaluation is assessing, as systematically and objectively as possible, a completed project (or a phase of an ongoing project or programme that has been completed). Evaluations appraise data and information that inform strategic decisions, thus improving the project or programme in the future.

Evaluations should help to draw conclusions about five main aspects of the project:

- relevance
- effectiveness
- efficiency
- impact
- sustainability

Information gathered in relation to these aspects during the monitoring process provides the basis for the evaluative analysis.

M&E is an embedded concept and constitutive part of every project or programme design («must be»). M&E is not an imposed control instrument by the donor or an optional accessory («nice to have») of any project or programme. M&E is ideally understood as dialogue on development and its progress between all stakeholders.

Setting Clear Objectives and Indicators: The first step in M&E is establishing clear project objectives and defining specific, measurable, and time-bound indicators. These indicators act as benchmarks to measure progress and success.

Data Collection: Data is the backbone of M&E. During project implementation, data is collected through various methods, such as surveys, interviews, focus groups, observations, and

document reviews. This data includes both quantitative (numbers) and qualitative (descriptive) information.

Data Analysis: Once data is collected, it's analysed to assess the project's performance and impact. Data analysis can involve statistical techniques, qualitative coding, and comparative assessments.

Reporting and Feedback: The results of the data analysis are used to create M&E reports. These reports provide insights into what's working and what isn't. Feedback from M&E reports can inform decision-making and future project adjustments.

Learning and Adaptation: M&E isn't just about assessing past performance but also about using that knowledge to make improvements. Project managers and stakeholders should be ready to adapt their strategies based on M&E findings.

The present M&E Framework aims to:

1. develop and apply an integrated framework for effectively identifying, monitoring and assessing the performance of existing and new training curricula to adequately respond to marine pollution sources, including those of armed conflicts;
2. define evaluation tools and to provide an adapted data management plan, developed as a decision support system.

The response project (Building Response Frameworks under existing & new Marine Pollution Challenges in the Black Sea), supported by the European Union EMFAF, under Grant Agreement no 101124661 has duration of 36 months, starting from 01.10.2023. The project consortium involves six partners from five different countries: Greece, Bulgaria, Romania, Ukraine and Georgia. Five of the participants are based in countries bordering on the Black Sea, and the lead beneficiary, the Aristotle University of Thessaloniki (AUTH), has a long history of working with the region and with members of the consortium. The partnership includes one university, two research institutes and three environmental NGOs: the Black Sea NGO Network (BSNN) regional NGO network based in Varna, Bulgaria; the National Institute of Marine Research and Development (NIMRD), based in Constanta, Romania, leading research institute for the Black Sea; the Institute of Market Problems and Economic-Ecological Research (IMPEER), Odesa, a public institution, part of the National Academy of Sciences of Ukraine; the Black Sea Branch of Ukrainian Environmental Academy of Sciences (BSB UEAS) is Odesa-based NGO with a team of professional researchers; and the Greens Movement of Georgia / Friends of the Earth (GMG/FoE) — Georgia, an NGO, part of the international environmental network. All three beneficiaries from EU Member States have extensive experience in marine pollution projects under the Horizon 2020 and Horizon Europe programmes.

Response aims to identify and promote the development and establishment of new-generation advanced training schemes and curricula to support early warning, region-wide mechanisms for monitoring natural and man-made disasters. Various training programs, platforms and curriculum have been implemented to monitor marine pollution and ensure knowledge integration and dissemination. Still, training material, best practices, standards and protocols often differ among platforms and programs, hindering progress towards implementing an integrated, transdisciplinary and multidisciplinary marine pollution training system. Peculiar events, such as armed conflicts, create new environmental and societal challenges that call for international, coordinated responses.

Response acknowledges the importance of deeper understanding of marine ecosystems and river-delta-sea connections, the need for development of harmonized procedures, standards and methodologies in marine monitoring across the Black Sea countries to support healthy and resilient seas and foster integrated marine governance. The sustainable changes that are required for the establishment of efficient, advanced training schemes that would be integrated with the challenges, goals and specificities of the scientific and social context and make the most of the untapped capacity of stakeholders to promote regional awareness in the field.

This work outlines a comprehensive framework for the task of develop the framework to monitor, evaluate and assess the progress performed during the project towards grounding

advanced training courses for marine pollution in the BS region.

Project monitoring and evaluation (M&E) is an essential aspect of project management that helps organizations and stakeholders assess the effectiveness and progress of their initiatives. Whether you're working on a community development project, a business expansion, or a non-profit program, understanding how M&E works is crucial for achieving your project goals.

The co-designed framework will measure the reliability, accuracy and continuity, through the contribution to achievement of the relevant goals. M&I framework aims to develop and apply an integrated framework for effectively identifying, monitoring and assessing the performance of existing and new training curricula. It contributes to adequately response to marine pollution sources, including those of armed conflicts. M&E framework defines evaluation tools and provides an adapted data management plan, developed as a decision support system.

A set of outcome indicators was co-developed with a help of partners` and stakeholders` feedback during interactive sessions. Overall, at least 20-30 participants were introduced to our ideas and concepts and along with them we co-created and concluded on the indicators, considering a set of criteria such as Stakeholder confidence, institutional integration, relevance, collaboration, guidelines adoption and improvement, community empowerment and awareness, regional networking and cross-border collaboration. The developed outcome and impact indicators for the new training courses and curriculum will provide a common scientific ground for standardized, joint, compatible training ecosystems, data and information towards addressing marine pollution threats including those induced from accidental, peculiar origins such as armed conflicts.

The assessment methodology for the response project is a comprehensive, three-tiered framework designed to systematically measure progress, short-term success, and long-term societal and scientific change. The first tier, Achievement Indicators, directly reflects the project's implementation phase. These indicators are practical measures linked to specific Work Packages and their corresponding Deliverables. The Achievement Indicators and their Sub-Achievement Indicators use quantitative metrics (e.g., number of organizations analyzed, number of co-created training curricula) with defined baselines and targets to track whether tasks and outputs have been completed as planned. This framework ensures that immediate project accomplishments are systematically verified and reported, forming the essential groundwork for evaluating deeper impacts later on.

The second tier focuses on Outcome Indicators, which measure the more immediate effects on the stakeholders involved, aligning with the project's overarching objectives. The eight suggested Outcome Indicators, developed according to the SMART concept, cover critical aspects like improved stakeholder knowledge, successful co-development of the training framework, and digital tool use. Other outcomes measure collaboration, training satisfaction, and the refinement of operational plans. The ultimate goal of this tier is to assess the participants' capacity to design and implement their own training programs and formulate policy recommendations.

Finally, the third tier consists of Impact Indicators, designed to capture the broader, long-term changes that extend beyond the project's duration and scope. These impacts are categorized across short-term (1–2 years), medium-term (2–5 years), and long-term (5–10 years) timeframes in scientific, societal, and technological/economic domains.

REFERENCES

1. Guida all'Europrogettazione. (2025). Handbook: The basics, the structure, the method for working on European projects. Retrieved August 15, 2025, from <https://www.guidaeuroprogettazione.eu/en/handbook/>
2. Developing a monitoring and evaluation framework. 2019. NCVO. <https://www.ncvo.org.uk/help-and-guidance/strategy-and-impact/impact-evaluation/planning-your-impact-and-evaluation/monitoring-and-evaluation-frameworks/developing-a-monitoring-and-evaluation-framework/>
3. Guida Europrogettazione. (n.d.). Handbook: The basics, the structure, the method for

working on European projects. Retrieved on 18.09.2025, from <https://www.guidaeuroprogettazione.eu/en/handbook/>

4. Luli, F. (2025). SMART indicators in monitoring and evaluation (M&E). EvalCommunity. <https://www.evalcommunity.com/career-center/smart-indicators/>

ПРАВОВИЙ РЕЖИМ МІЖНАРОДНИХ ПРОТОК В УМОВАХ ЗБРОЙНИХ КОНФЛІКТІВ: НА ПРИКЛАДІ КРИЗИ В ОРМУЗЬКІЙ ПРОТОЦІ

Панченко І.М.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Динаміка сучасних міжнародних відносин характеризується зростанням напруженості у стратегічно важливих вузлах світових морських комунікацій. Ормузька протока, що забезпечує транзит значної частки світових енергоресурсів, традиційно залишається зоною перетину інтересів ключових геополітичних гравців. У 2026 році правовий режим цієї водної артерії зазнав суттєвої трансформації, перетворившись із суто регуляторного механізму на інструмент гібридного протистояння. Ситуація, що склалася навколо вільного судноплавства в регіоні, демонструє глибоку розбіжність у тлумаченні фундаментальних норм морського права різними суб'єктами міжнародних відносин.

Актуальність досліджень. Актуальність обраної теми зумовлена безпрецедентним загостренням кризи в Ормузькій протоці станом на 2026 рік, що поставило під загрозу стабільність світової економіки та цілісність міжнародного морського правопорядку. Повернення до влади адміністрації Дональда Трампа у США призвело до впровадження політики «силового забезпечення права», що вступила у пряму колізію з іранською доктриною «превентивної самооборони». Необхідність аналізу цих подій диктується потребою переосмислення класичних категорій морського права, таких як «транзитний прохід» та «мирний прохід», в умовах збройних конфліктів нового типу. Дослідження правових позицій США, Ірану та держав ЄС дозволяє виявити прогалини у чинній системі міжнародної безпеки мореплавства та знайти шляхи запобігання остаточній заміні сили права правом сильного.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є проведення комплексного аналізу трансформації правового режиму міжнародних проток в умовах збройного протистояння на прикладі кризи в Ормузькій протоці 2026 року. У межах роботи передбачається детальне дослідження юридичної природи конфлікту між концепціями транзитного та мирного проходу, що виникає внаслідок претензій прибережної держави на призупинення навігації. Особлива увага приділяється аналізу правомірності застосування військової сили та тактики силового конвоювання з боку США як засобу забезпечення свободи судноплавства у стратегічно важливих акваторіях.

Крім того, завдання дослідження охоплюють визначення ролі та ефективності європейських дипломатично-військових ініціатив, зокрема місії EMASOH, у стабілізації правового режиму протоки. Важливим аспектом роботи є виявлення правових складнощів, що виникають при розподілі юридичної відповідальності між державами прапора, державами супроводу та безпосереднім агресором у разі виникнення збройних інцидентів.

Результати досліджень. Трансформація правового режиму Ормузької протоки у 2026 році стала наочним прикладом того, як норми міжнародного морського права можуть бути інтерпретовані як інструменти гібридної війни. Центральним конфліктом є суперечка щодо обсягу прав прибережної держави. Іран, не будучи учасником Конвенції ООН з морського права (далі — UNCLOS) 1982 року [Помилка! Джерело посилання не знайдено.], офіційно заперечує право «транзитного проходу» для суден держав, які він класифікує як «ворожі». Юридичним обґрунтуванням перекриття протоки з боку Тегерана виступає концепція «превентивної самооборони» згідно зі статтею 51 Статуту ООН [2]. Іранська сторона стверджує, що присутність іноземних військово-морських сил та прохід суден країн, які запровадили проти нього санкції, загрожує його суверенітету, що дає йому право призупиняти «мирний прохід» у своїх територіальних водах під приводом воєнної необхідності.

Адміністрація президента США Дональда Трампа у 2026 році зайняла безкомпромісну позицію, кваліфікувавши дії Ірану як незаконну блокаду міжнародної протоки. Юридична доктрина США базується на тому, що право транзитного проходу є звичаєвою нормою міжнародного права, яка діє незалежно від ратифікації конвенцій конкретними державами. Вашингтон розглядає будь-яке обмеження свободи навігації як загрозу світовому правопорядку. Це призвело до впровадження тактики «силового забезпечення права», коли ВМС США здійснюють активне конвоювання танкерів, ігноруючи вимоги берегової охорони Ірану щодо ідентифікації чи зміни курсу. З точки зору морського права, це створює небезпечний прецедент, де військовий супровід стає фактичним гарантом виконання міжнародних норм у зоні, де правові механізми перестали функціонувати [3].

Роль європейських держав у кризі 2026 року є менш радикальною, але стратегічно важливою. На відміну від прямолінійного силового підходу США, Європа намагається діяти в межах розширеної дипломатично-військової місії EMASOH (European Maritime Awareness in the Strait of Hormuz) [4]. Європейські країни, зокрема Франція, Німеччина та Італія, зосереджені на забезпеченні «морської обізнаності» та деескалації. Юридична позиція Європи полягає у дотриманні формальних процедур UNCLOS та закликах до міжнародного арбітражу. Хоча європейські військові кораблі присутні в регіоні, вони часто уникають прямої конфронтації з іранськими силами, намагаючись виконувати роль нейтральних спостерігачів, що мають гарантувати безпеку цивільного судноплавства без активного вступу у конфлікт.

Проте така багаторівнева міжнародна відповідь створює додаткові правові складнощі, що межують із правовим вакуумом. Відсутність єдиного командування та неузгодженість правил застосування сили між США та європейськими контингентами призводить до небезпечної юридичної розмитості відповідальності у разі інциденту. Це створює ситуацію дифузії юридичної приналежності: якщо європейське судно під супроводом ВМС США потрапляє під обстріл або затримується іранськими силами, виникає складне питання атрибуції правопорушення та визначення юрисдикції. Зокрема, стає незрозумілим, яка саме держава – держава прапора судна, держава фактичного військового супроводу чи держава-агресор – несе повну цивільно-правову та міжнародно-правову відповідальність за майнові збитки, екологічну шкоду у разі розливу нафти та, що найважливіше, за життя екіпажу.

Більше того, така роздробленість сил дозволяє Ірану використовувати тактику юридичного опортунізму, маніпулюючи різницею у статусах учасників конфлікту: апелювати до дипломатичного імунітету у відносинах з європейськими місіями та одночасно застосовувати концепцію воєнної необхідності проти американських сил. Ситуація ускладнюється тим, що чинні правові механізми, як-от Міжнародний трибунал з морського права, виявляються фактично заблокованими через політизацію суперечки. Таким чином, події 2026 року в Ормузькій протоці демонструють глибоку кризу міжнародного інституційного контролю та ерозію багатосторонніх угод. У регіоні, де право сильного дедалі частіше замінює силу права, безпека мореплавства перестає бути гарантованою нормою і стає результатом хиткого балансу військового стримування.

Висновки. Таким чином, підбиваючи підсумки аналізу трансформації правового режиму Ормузької протоки у 2026 році, можна констатувати глибоку кризу традиційних інструментів міжнародного морського права. Сучасне протистояння в регіоні продемонструвало, що норми Конвенції UNCLOS 1982 року стають об'єктом селективної інтерпретації, де концепції превентивної самооборони та мирного проходу використовуються прибережними державами як правове прикриття для фактичного блокування стратегічних морських артерій. Юридична позиція Ірану, що базується на запереченні права транзитного проходу для ворожих держав, створює прецедент дефрагментації морського правопорядку, перетворюючи міжнародні протоки на зони виключного національного контролю.

Водночас жорстка відповідь адміністрації Дональда Трампа та перехід до тактики силового забезпечення права змінили парадигму морської безпеки. Використання військового конвоювання як гаранта виконання звичаєвих норм міжнародного права свідчить про неспроможність чинних правових інститутів забезпечити стабільність судноплавства без залучення воєнного ресурсу. Ситуація 2026 року вказує на виникнення небезпечної тенденції, де реальним джерелом правопорядку стає не міжнародний договір, а військова присутність держави прапора або держави супроводу, що фактично замінює силу права правом сильного.

Окрему складність становить неоднорідність міжнародної реакції, зокрема різниця в підходах США та європейських держав (місія EMASOH). Відсутність єдиного правового стандарту застосування сили та координації між різними військовими контингентами призводить до юридичної розмитості відповідальності у разі збройних інцидентів. Це ставить під загрозу безпеку цивільних екіпажів та створює умови для подальшої ескалації конфлікту. Криза в Ормузькій протоці є тривожним сигналом про необхідність термінового оновлення міжнародних механізмів захисту вільного мореплавства, здатних протистояти викликам гібридної війни та захистити цілісність світової економіки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Конвенція Організації Об'єднаних Націй з морського права. 1982. URL: <http://consultant.parus.ua/?doc=0005WDC64C>
2. United Nations Charter (full text). United Nations : official website. URL: <https://www.un.org/en/about-us/un-charter/full-text>
3. Литонинский В. Проект Свобода. Як Трамп хоче розблокувати Ормуз. Кореспондент.net. 2026. URL: <https://ua.korrespondent.net/ukraine/4876438-proekt-svoboda-yak-tramp-khoche-rozblokovaty-ormuz>
4. Koch C. Europe's Response to the Closure of the Strait of Hormuz Risks Falling Short. Gulf Research Center. 2026. URL: <https://www.grc.net/single-commentary/361>

ТРАНСФОРМАЦІЯ МІЖНАРОДНО-ПРАВОВОГО СТАТУСУ АЗОВСЬКОГО МОРЯ ТА КЕРЧЕНСЬКОЇ ПРОТОКИ В УМОВАХ ЗБРОЙНОГО КОНФЛІКТУ

Панченко І.М.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Проблема правового статусу Азовського моря та Керченської протоки у 2026 році є однією з найбільш гострих у сучасному міжнародному морському праві. Тривалий час цей регіон функціонував у межах специфічного режиму внутрішніх вод двох держав, проте повномасштабна збройна агресія та анексія прибережних територій України радикально змінили правовий ландшафт. Сьогодні ця акваторія є зоною відкритого міжнародного конфлікту, де зіткнулися дві протилежні доктрини: територіальна експансія під прикриттям внутрішнього законодавства Російської Федерації (далі — РФ) та універсальний правопорядок, заснований на Конвенції ООН з морського права 1982 року (далі — UNCLOS).

Актуальність досліджень. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю юридичної деконструкції претензій РФ на виключний суверенітет над Азовським морем, які вона висунула у 2022 році. В умовах, коли держава-агресор намагається перетворити міжнародну протоку на закриту національну зону, особливого значення набуває аналіз рішень міжнародних трибуналів. Саме міжнародна юстиція залишається єдиним інструментом, що забезпечує правову фіксацію порушень свободи навігації та заперечує легітимність спроб зміни статусу вод через окупацію суходолу. Дослідження цієї трансформації є необхідним для розробки механізмів відновлення міжнародного правопорядку та захисту прав суб'єктів торговельного мореплавства.

Постановка задачі. Метою даної роботи є проведення комплексного аналізу правової трансформації режиму Азовського моря та Керченської протоки в умовах воєнного конфлікту станом на 2026 рік, спираючись на висновки та рішення міжнародних судових інстанцій. У межах дослідження передбачається дослідити еволюцію статусу акваторії, простеживши шлях від режиму спільних внутрішніх вод до ситуації гострого правового протистояння, що виникло внаслідок спроб односторонньої зміни міжнародно-правового статусу регіону. Особливу увагу приділено критичному аналізу правових аргументів РФ щодо встановлення одноосібного контролю над морем та протокою.

Результати досліджень. Еволюція правового статусу Азовського моря та Керченської протоки пройшла шлях від радянського спадку до повного руйнування міжнародного правопорядку. До 2022 року юридична база регіону трималася на крихкому компромісі — Договорі між Україною та РФ 2003 року [Помилка! Джерело посилання не знайдено.]. Цей документ, посилаючись на «історичну єдність», визначав акваторію як внутрішні води двох держав. Така правова конструкція була аномальною з точки зору UNCLOS 1982 року, оскільки вона фактично виводила величезну морську зону з-під дії універсальних норм про територіальне море та виключну економічну зону. Проте, станом на 2026 рік, ми констатуємо, що РФ остаточно відмовилася від «двосторонньої» моделі на користь агресивного моноцентризму.

Юридична позиція Російської Федерації трансформувалася у концепцію «виключного внутрішнього моря РФ» [2]. Це обґрунтовується агресором через анексію Криму, Херсонської та Запорізької областей. Москва стверджує, що оскільки вона де-факто контролює весь периметр азовського узбережжя, норми міжнародного морського права (зокрема право транзитного проходу та свобода навігації) тут більше не діють. Це створює небезпечний прецедент «юридичного поглинання» цілого моря. РФ намагається довести світу, що внутрішнє законодавство держави-окупанта може мати пріоритет над міжнародними зобов'язаннями. У цій логіці Керченська протока розглядається не як

міжнародна артерія, а як «в'їзна брама» до закритої національної акваторії, де режим доступу визначається виключно політичною волею Кремля.

Юридична деконструкція претензій держави-агресора станом на 2026 рік базується на системних рішеннях міжнародних судових інстанцій, які сформували стійку правову рамку щодо статусу регіону. Ключове значення має Наказ Міжнародного трибуналу з морського права від 25 травня 2019 року у справі про затримання українських військово-морських суден (Україна проти РФ), де було чітко встановлено пріоритет суверенних імунітетів над кримінальною юрисдикцією прибережної держави [3]. Паралельно з цим, у межах провадження в Постійній палаті третейського суду (Справа про права прибережної держави в Чорному та Азовському морях і Керченській протоці), було доведено, що статус «внутрішніх вод» не може бути правовою ширмою для ігнорування положень UNCLOS 1982 року [4]. Ці судові прецеденти у своїй сукупності підтверджують, що ані фізичне захоплення узбережжя, ані односторонні конституційні акти РФ не здатні анулювати міжнародно-правовий статус Керченської протоки як міжнародної артерії, а Азовського моря — як акваторії, що підпадає під дію універсальних норм морського права.

Вказані висновки трибуналів стали фундаментом для формування консолідованої міжнародної позиції: будь-які зміни в адміністративному чи конституційному устрої окупованих територій не впливають на правовий статус моря. Для міжнародної юстиції Азовське море залишається територією, де діє режим UNCLOS, а Керченська протока – міжнародною протокою, транзит через яку не може бути призупинений за жодних обставин. Це означає, що спроби РФ трактувати протоку як внутрішній шлях суперечать зобов'язанням перед усією міжнародною спільнотою, оскільки право транзитного проходу є невід'ємним елементом глобальної навігаційної системи.

Важливим аспектом є розрив між «правом сили» та «силою права» у питанні будівництва та експлуатації Керченського мосту. З точки зору міжнародних арбітражів, створення фізичних перешкод для навігації без узгодження з іншою прибережною державою (Україною) є грубим порушенням статей 43 та 44 Конвенції UNCLOS 1982 року [5]. Використання військової сили та зведення фізичних перешкод призвели до фактичної трансформації морської артерії на зону силового забезпечення права, що підміняє собою встановлені міжнародні норми. РФ використовує міст не лише як логістичний об'єкт, а й як юридичний фільтр для дискримінації суден за прапором чи пунктом призначення. Це трансформує протоку з транспортного коридору на інструмент гібридної війни.

Окрему увагу трибунали приділяють питанню «історичних вод». У 2026 році стає очевидним, що російська інтерпретація історії є маніпулятивною. Міжнародне право вимагає, щоб статус історичних вод визнавався іншими державами протягом тривалого часу. Проте Україна та світова спільнота послідовно заперечують претензії РФ на виключний контроль. Таким чином, ситуація в Азовському морі демонструє глибоку кризу міжнародних інститутів. Поки трибунали виносять рішення на користь вільного мореплавства, держава-агресор створює на воді режим закритої зони. Це ставить перед світовою спільнотою виклик: як забезпечити виконання рішень трибуналів у регіоні, де правові норми ігноруються на користь воєнної доцільності.

Трансформація статусу Азовського моря та Керченської протоки свідчить про повний перехід від епохи договірного співробітництва до епохи юридичної війни. Азовське море сьогодні – це не просто географічний об'єкт, а глобальний правовий фронт. Рішення міжнародних судів тут виступають єдиним запобіжником проти легітимізації анексії морських акваторій, підтверджуючи, що тимчасовий фізичний контроль не може бути підставою для набуття законних прав на ці акваторії, що мають міжнародно-правовий статус.

Висновки. Проведений аналіз трансформації правового статусу Азовського моря та Керченської протоки станом на 2026 рік дозволяє констатувати повну руйнацію колишнього режиму внутрішніх вод, що базувався на двосторонніх домовленостях. Сучасний стан акваторії є прикладом глибокої кризи міжнародного інституційного

контролю, де РФ намагається замінити універсальні норми Конвенції UNCLOS 1982 року інструментами гібридної війни та актами власного національного законодавства. Спроба легітимізації анексії прибережних територій та оголошення моря виключно внутрішньою російською акваторією є юридично нікчемною, оскільки вона прямо суперечить імперативним принципам територіальної цілісності та непорушності кордонів.

Ключову роль у деконструкції російських правових міфів відіграють рішення міжнародних судових інстанцій. Ці рішення чітко зафіксували, що Керченська протока зберігає статус міжнародної, а права прибережної держави не можуть використовуватися як привід для призупинення транзитного проходу або порушення суверенних імунітетів суден. Юридична позиція міжнародної спільноти, зафіксована у судових прецедентах, виступає головним запобіжником проти створення правового вакууму в регіоні та слугує основою для майбутнього відновлення законного статусу цих вод.

Використання військової сили та зведення фізичних перешкод, таких як Керченський міст, перетворили морську артерію на зону силового забезпечення права. Це створює небезпечний прецедент дефрагментації світового морського правопорядку, де ціле море намагаються вивести з-під дії міжнародних конвенцій. Виникнення багаторівневої міжнародної відповіді та відсутність дієвих механізмів примусу до виконання судових рішень вказують на необхідність реформування інструментів захисту вільного мореплавства. Тільки повернення до неухильного дотримання норм міжнародного права та відмова від маніпуляцій концепцією внутрішніх вод на користь універсальних прав усіх держав може гарантувати відновлення законного статусу Азовського моря та безпеку судноплавства у Керченській протоці як стратегічно важливій міжнародній водній артерії.

ЛІТЕРАТУРА

1. Договір між Україною та Російською Федерацією про співробітництво у використанні Азовського моря і Керченської протоки : від 24 груд. 2003 р. (втратив чинність 25.03.2023р.). База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/643_205
2. Путін оголосив, що Азовське море стало внутрішнім морем росії. *Новий формат* : інтернет-видання. URL: <https://newformat.info/news/putin-oholosyv-shcho-azovske-more-stalo-vnutrishnim-morem-rosii/>
3. Case concerning the detention of three Ukrainian naval vessels (Ukraine v. Russian Federation), Provisional Measures. International Tribunal for the Law of the Sea : official website. URL: <https://www.itlos.org/en/main/cases/list-of-cases/case-concerning-the-detention-of-three-ukrainian-naval-vessels-ukraine-v-russian-federation-provisional-measures/>
4. Коваленко О., Гусев Г. Україна доводить у Гаазі, що Росія незаконно побудувала Керченський міст. Суть справи пояснює посол з особливих доручень МЗС Антон Кориневич. *Бабель* : вебсайт. 2024. URL: <https://babel.ua/texts/111573-ukrajina-dovodit-u-gaazi-shcho-rosiya-nezakonno-pobuduvala-kerchenskiy-mist-sut-spravi-poyasnyuye-posol-z-osoblivih-doruchen-mzs-anton-korinevich>
5. Конвенція Організації Об'єднаних Націй з морського права. 1982. URL: <http://consultant.parus.ua/?doc=0005WDC64C>

ОСОБЛИВОСТІ ЗАПОБІГАННЯ ГІРДІНГУ І ПОЛОЖЕННЯ «В ЛЕЩАТАХ» ПРИ БУКСИРУВАННІ ВРАХОВУЮЧИ НОВУ КОНЦЕПЦІЮ ПОВОРОТУ СУДНА

Товстокорий О.М.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Буксирування — операція, яка досить часто трапляється в морській практиці. Знання закономірностей руху суден буксирного каравану підвищує точність вирахування і нанесення на карту маршруту буксирного каравану, що в свою чергу, підвищує безпеку буксирного каравану. Крім того, при виконанні операції буксирування можуть трапитись небезпечні явища, які загрожуватимуть судну. Їх також потрібно знати, розглянути, проаналізувати і зробити висновки, як їх можна уникнути.

Використовуючи новий погляд на поворот судна, змістовну модель повороту судна, потрібно використати їх для розгляду процесу буксирування. Це зможе оцінити процес буксирування з точки зору врахування новітніх досягнень і, можливо, виявити якісь сторони цього процесу, які не враховувалися раніше і можуть бути небезпечними, якщо їх не прийняти до уваги зараз. Наприклад, явище гірдингу

Актуальність досліджень. Останнім часом в світі сталося декілька аварій з суднами при проведенні буксирувальних операцій. За виконання операцій судів на шельфі нерідкі аварійні випадки. Так, згідно з [1] розслідувано випадок з перекиданням та затопленням буксиру «STEVNS POWER» під час операцій із завезення якорів судна-трубоукладача «CASTORO OTTO» 19.10.2003 біля узбережжя Нігерії. У [2] розслідувано аварійний випадок з перекиданням та затопленням буксиру «BOURBON DOLPHIN» під час операцій із завезення якорів для напівзануреної бурової вежі «TRANSOCEAN RATHER» 12.04.2007 на захід від Шетландських островів. Згідно з [3] розслідувано випадок з перекиданням та затопленням буксиру «NORTH ARM VENTURE» під час буксирування баржі «NORTH ARM EXPRESS» 02.07.2009 з Toba Inlet до Sechelt Inlet (Канада). У [4] повідомляється про випадок перекидання та затоплення буксиру «ІСІК-КУЛЬ» під час відшвартування т/г «NOMADE EAGLE» 05.02.2013 від причалу №2 ССР «Океан» (Миколаїв). У [5] відзначається випадок з перекиданням та затопленням буксиру для завезення якорів «JASCON 4» під час буксирувальних операцій з утримання танкера під час вантажних операцій біля вантажного бую у відкритому морі 26.05.2013 біля узбережжя Нігерії. В роботах [6](Рис.1), [7](Рис 2.) та [8] Рис.3) показані приклади утворення «гірдингу». Всі ці аварії призвели до перекидання буксирів і в багатьох з цих випадків загибелі людей. Тому ця проблема є актуальною.

Що таке «гірдинг»? Це ситуація, коли судно, зазвичай буксир, буксирується лагом до буксирної лінії і не може вийти з цього положення.

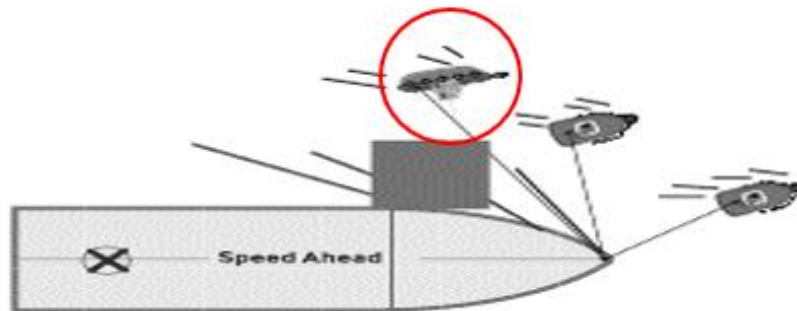


Рисунок1 — Приклад гірдингу, коли в таку ситуацію потрапляє буксир закріплений на носу судна [6]

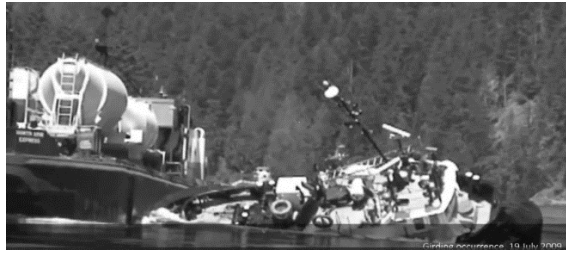


Рисунок 2 — Приклад гірдингу, що трапився при буксируванні баржі [7]

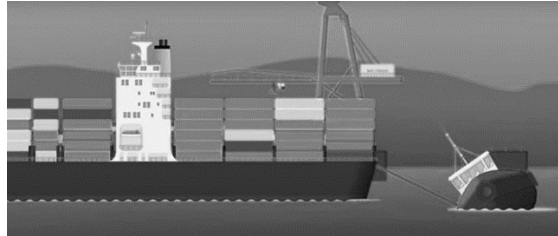


Рисунок 3 — Приклад гірдингу, що трапився при роботі буксиру в кормі судна як утримувача [8]

Постановка задачі. Задачами дослідження є: розробка схеми повороту буксирного каравану, з урахуванням переміщення базових точок під час маневру, послідовності дій при повороті буксирного каравану з використанням концепції полюсу повороту, винайдення способів запобігання гірдингу і положення «в лещатах».

Результати дослідження. При буксируванні караван може рухатись зі швидкістю, яка не перевищуватиме максимальної, тобто, коли опір всього каравану не перевищуватиме максимального упору гвинта. Так як стернування буде відбуватися за рахунок пера чи пер керма, що розташовані в кормі, полюс повороту(ПП) буксиру буде розташований в носовій частині судна.[9]

Під час повороту судна картина змінюється.

Потрібно буде враховувати також положення буксирної точки (БТ) – точки, в якій сила натягу буксирного тросу прикладається до буксира [10].

В ідеалі БТ має бути розташована в ЦО[11], щоб надати буксиру максимальну свободу обертання при стернуванні. Ось чому буксирну лебідку встановлюють якомога далі вперед від корми та якомога ближче до ЦО, наскільки це можливо. Буксирна лебідка розташована щонайближче від ЦО, а полюс повороту(ПП) без об'єкту буксирування при керуванні судна звичайним кермом, яке розташоване в кормі судна, зазвичай розташований на центральній лінії приблизно на одній третині довжини буксира від носа. Точки ЦО та ПП – базові точки змістовної моделі повороту судна [11]. З практичної точки зору, БТ позначається як буксирна лебідка або буксирні кнехти, якщо вони встановлені або додаткові елементи, на які може опиратися буксирний трос при маневруванні.

Однак при розташуванні буксирної БТ близько до ЦО при напрямку буксирної лінії перпендикулярно до ДП виникає дуже висока вірогідність гірдингу.

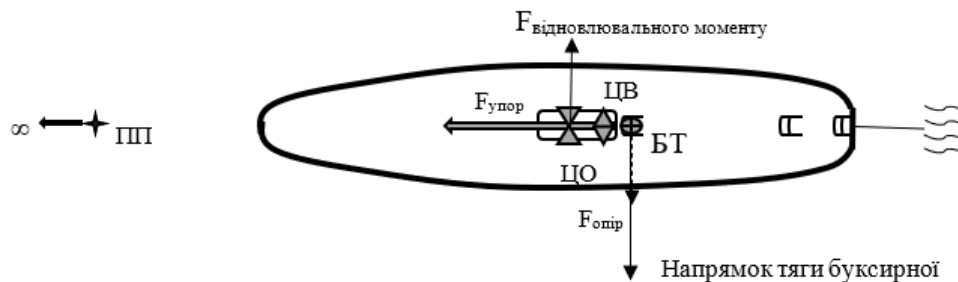


Рисунок 4 — Ситуація гірдингу, коли напрямок тяги буксирної лінії стає перпендикулярним до діаметральної площини буксиру

Між буксиром і об'єктом буксирування можуть бути великі відносні рухи. Між буксирним тросом і кормою буксира також можуть бути значні відносні рухи, особливо поворот або зміщення в поперечному напрямку. Обладнання для контролю цих рухів еволюціонувало протягом історії буксирування. Зараз для цього використовують вертикальні обертальні вали на кормі, норманські штифти, гоб-строп, стаціонарний гоб(гог), гоб-ланцюг (Gob Chain)(Рис.5) [6], або, як їх називають – тросові відтяжки

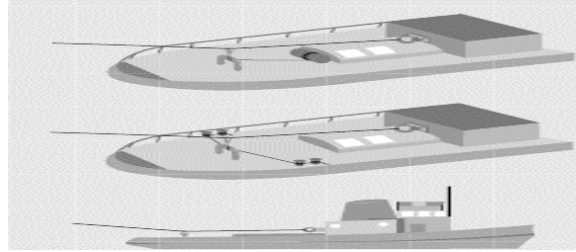


Рисунок 5 — Встановлення тросової відтяжки[6]

Як видно з Рис.1 при гірдінгу судно розташовується лагом до буксирної лінії і не може виконувати обертальний рух. А якщо обертального руху немає, то немає кутової швидкості і ПП розташовується по лінії ДП в нескінченності[9]. А БТ співпадає з ЦО, який за відсутності позовжнього руху буксиру співпадає з ЦВ.

Шляхом зміщення точки буксирування в корму або за допомогою відтяжки з ланцюга або тросу схильність до гірдінгу буксиру можна покращити на конвенційних буксирах. Тросова відтяжка(також її називають вуздечкою) може бути встановлена різними способами (Рис.5[6])

Завдяки цим пристроям ймовірність гірдінга значно зменшується і капітану буксиру потрібно тільки моніторити натяг буксирного тросу, щоб він не перевищував дозволених межі.[12]

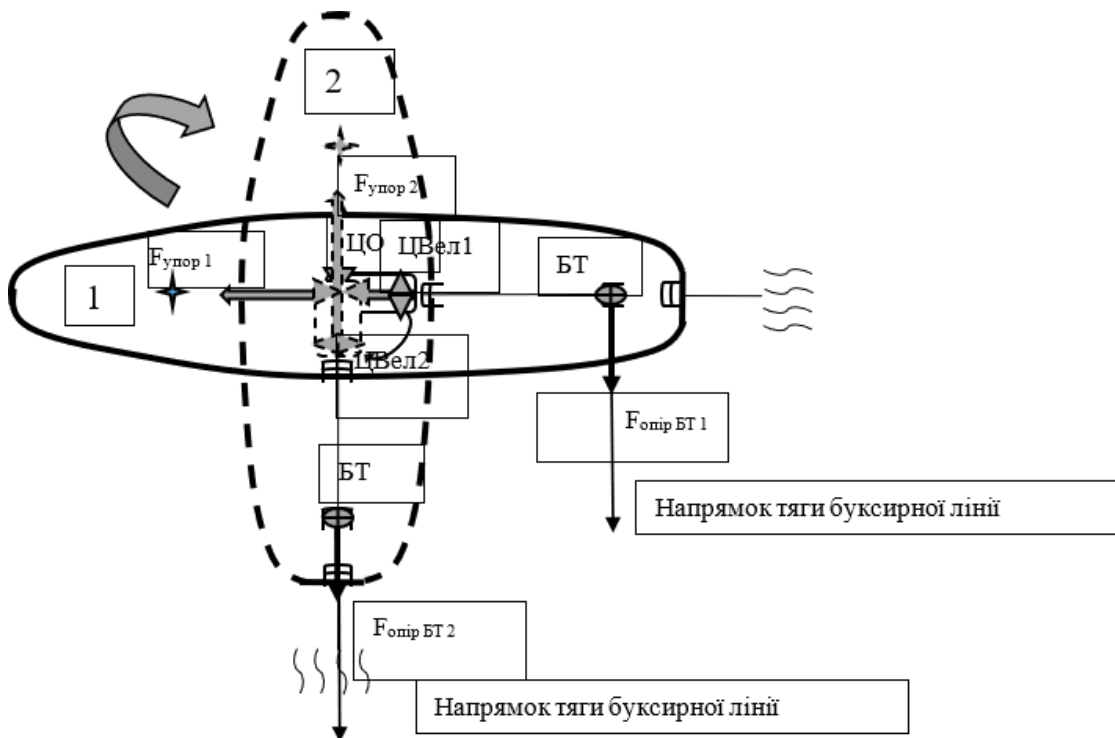


Рисунок 6 — Розворот в горизонтальній площині буксира, що має хід вперед, під дією пари сил: сили натягу буксирного каната, прикладеного до БТ, що перенесена більше в корму, і сили опору води, що прикладена в ЦВел

У разі, коли буксир йде вперед і БТ перенесена в корму від ЦВ, при напрямку буксирної лінії перпендикулярно діаметральній площині, сила натягу буксирної лінії, що прикладена до БТ і сила опору води, що прикладена до ЦВел, який розташовується на одній вертикалі є ЦВ, утворюють пару сил, що прагне розвернути буксир з положення 1 до положення 2 (Рис.15). Якщо протидії цій парі сил немає, то буксир так і розвертається і запобігає гирдінгу. Це відбувається тому, що у положенні 1 відновлювальний момент залежить від поперечної метацентричної висоти, а в положенні 2 – від поздовжньої метацентричної висоти, яка в багато разів більша і тому остійність судна в багато разів більша в поздовжньому напрямку, ніж в поперечному.

Але завданням буксира є відбуксирувати якийсь об'єкт в задану точку, тому він має використовувати тягу гвинта для утворення поздовжньої швидкості і перо керма для відхилення потоку від гвинта і утворення сили в потрібному напрямку (Рис.7)

Для запобігання гирдінгу БТ пересувають якомога далі в корму. Уявимо, що БТ розташована максимально в кормі, в районі розташування вертикальних обертальних валів. Перо керма розташовано також в кормі і в залежності від конструкції центр пера керма може бути також на одній вертикалі з БТ.

Розкладемо силу тяги буксирної лінії $F_{\text{опір БТ}}$ на поздовжню $F_{\text{опір БТ } x}$ та поперечну $F_{\text{опір БТ } y}$ складові. Силу опору води перекладеному керму $F_{\text{опір К}}$ також розкладемо на поздовжню $F_{\text{опір К } x}$ та поперечну $F_{\text{опір К } y}$ складові.

Для руху вперед, як я вже згадував вище, тяга гвинта $F_{\text{тяги}}$ має перевершувати сумарний опір буксира $F_{\text{опір}} + F_{\text{опір К } x}$ і об'єкта буксирування $F_{\text{опір БТ } x}$.

Поперечні ж складові сили тяги буксирної лінії $F_{\text{опір БТ } y}$ та сили опору води перекладеному керму $F_{\text{опір К } y}$ будуть протидіяти одна одній і ускладнювати керування судном. Положення БТ і натяг буксирного троса створюють момент, який протидіє моменту керма і, отже, обмежує поворотний рух буксира. Здатність буксира до утримування курсу стає все більш ускладненим, оскільки точка буксирування переміщується далі назад. Цей вплив посилюється на низькій або нульовій швидкості) [10].

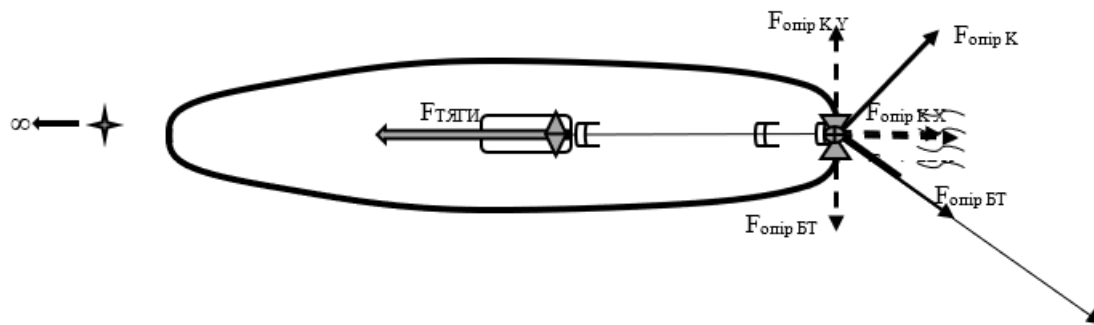


Рисунок 7 — Ситуація, коли буксир опиняється «в лещатах»

Термін «в кайданах» («in irons») [10], який я вважаю краще замінити терміном «в лещатах», який показує, що судно двома боковими силами затиснуте в такому положенні, що не може змінити курс, використовується для опису умов, коли протидіючий момент буксирного троса такий самий або більший за поворотний момент, створюваний кермом та іншими гідродинамічними силами. Тоді буксиром стає неможливо керувати. Це може статися, коли сили $F_{\text{опір К } y}$ та $F_{\text{опір БТ } y}$ будуть дорівнювати одна одній. У цей момент БТ перетворюється в точку з необмеженим опором [9]. Тому ЦО переміщуються в БТ. Буксир не може змінювати курс. Ситуація стає схожою з гирдінгом. Раз буксир не може змінювати курс, обертового руху немає і ПП знов по лінії ДП в нескінченності.

Як тільки буксир пересилує тягу буксирної лінії, знов з'являється поздовжня швидкість, ЦО переміщується в положення попереду ЦВ і буксир стає керованим. А положення «в лещатах» є дуже небезпечним. При перенесенні БТ в корму все рівно зберігається небезпека гирдінгу і перекидання судна.

Цій проблемі приділяється увага і в світовому морському співтоваристві. Так, у [13] судам-постачальникам в офшорі присвячувалася глава 4.5 «Offshore supply vessels», де в пункті 4.5.6.2 перераховані критерії стійкості для таких судів. Після катастрофи з «Bourbon Dolphin» ММО прийняло Resolution MSC.415(97), де були прийняті обмеження для максимально допустимих вертикальних та горизонтальних (поперечних) сил/натягів, які може випробувати судно в найбільш несприятливих умовах для поперечних сил/натягів до досягнення максимального кута крену, обмеженого одним з наступних кутів, залежно від того, який з них менший:

1. Кут крену еквівалентний значенню GZ , що відповідає 50% від $GZ_{\max}$;
2. Кут заливання робочої палуби, причому палуба вважається плоскою;
3. 15° .

Висновки.

1. При буксируванні на повороті буксирного каравану відбувається протистояння моменту сили тяги буксиру і моменту сили опору буксирного каравану.
2. При розрахунку повороту *буксиру* беруться до уваги наступні базові точки: центр ваги(ЦВ), центр величини(ЦВел), центр обертання(ЦО), буксирна точка(БТ), полюс повороту(ПП)
3. При буксируванні за кормою на тросі ЦО *буксира* — попереду ЦВ, ПП — попереду ЦО в межах корпусу судна.
4. При положенні «гірдінг» ЦО *буксира* — в БТ, ПП — в нескінченності.
5. При положенні «в лещатах» — ЦО *буксира* — в БТ, ПП — в нескінченності. Це положення схоже на положення «гірдінг».
6. При положенні *буксиру* близькому до положення «в лещатах» — ЦО буксиру переміщується в бік БТ, ПП — переміщується вперед за межі судна.
7. Для виходу з положення «в лещатах» потрібно збільшення потужності, якщо є така можливість, і продовження руху вперед. Як можливості збільшення потужності вже немає, можна зменшити потужність, надати можливість буксирній лінії розвернути буксир вздовж буксирної лінії і потім знов збільшувати потужність. Це збільшить остійність буксиру і заважить небезпеці. Розігнавши буксирний караван до можливої швидкості на новому курсі, можна починати поступовий перехід на попередній курс

ЛІТЕРАТУРА

1. «STEVENS POWER». Capsizing and foundering during anchor handling operation on 19 October 2003. Casualty report. Division for investigation of maritime accident Danish Maritime Authority. Date 28 June 2004. Case: 199940518. Danish Maritime Authority. Режим доступу до сайту: <http://www.emsa.europa.eu/Documents/medias/11-171.pdf/>. Назва з екрану.
2. The Loss of the «BOURBON DOLPHIN» on 12 April 2007. NOU. Official Norwegian Reports. 2008: 8. Government Administration Services. Information Management. Oslo 2008. Official Norwegian Reports. Режим доступу до сайту: <https://www.regjeringen.no/en/dokumenter/nou-2008-8/>. Назва з екрану.
3. Marine investigation report M09W0141 tug «NORTH ARM VENTURE» while towing the barge «NORTH ARM EXPRESS» entrance to Sechart rapids, British Columbia, 19 July 2009 [Електронний ресурс] / The Transportation Safety Board of Canada (TSB). Режим доступу до сайту: <http://www.tsb.gc.ca/eng/rapports-reports/marine/2009/>. Назва з екрану.
4. Акт розслідування аварійної морської події — перевертання та затоплення буксира «ИССЫК-КУЛЬ» під час виводу із акваторії суднобудівельного заводу «Океан» теплоходу «NOMAD EAGLE», 05.02.2013. Комісія Укрморрічінспекції. 28.02.2013. Київ. Укрморрічінспекція. Режим доступу до сайту: <https://www.sismit.gov.ua/>. Назва з екрану.
5. Tugboat «JASCON 4» sinks in heavy weather off Nigeria. May 29, 2013. Reuters. Режим доступу до сайту: <https://www.gcaptain.com/tugboat-jascon-sinks-Heavy-weather/>. – Назва з екрану.
6. Maritime Safety: Tugs and Tows - Shipping industry Practical Safety and Operational

- Guide By maritimecyprus 18/03/2024. <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2024/03/Tug-and-Tow-Safety-and-Operational-Guide.pdf>
7. Girding danger under the spotlight. 07 Oct 2019by Martyn Wingrove. Riviera maritime media. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/girding-danger-under-the-spotlight-56417>
8. Why You Shouldn't Tug A Tug.Video. Доступ до джерела: <https://www.youtube.com/watch?v=TRb46C4NXzU>
9. Tovstokory O. M. Substantive model of ship turn with account of the latest achievements in theory and practice. DOI: 10.33815/2313-4763.2024.2.29.152-163 Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал № 2(29) (2024). С 152 - 163
10. TB-55-1900-232-10. U.S. ARMY TOWING MANUAL. Доступ до джерела: <https://boatmanuals.tpub.com/TB-55-1900-232-10/index.htm>
11. The Risk of Tugs Capsizing due to Girting. Loss Prevention Bulletin. 2025 West of England <https://www.westpandi.com/news-and-resources/loss-prevention-bulletins/the-risk-of-tugs-capsizing-due-to-girting/>
12. Girding danger under the spotlight. 07 Oct 2019by Martyn Wingrove. Riviera maritime media. <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/girding-danger-under-the-spotlight-56417>
13. Resolution IMO A.749(18) dd 04.11.1993 «Code of intact stability for all types of ships covered by IMO instruments». International marine organization. Режим доступу до сайту: <http://www.imo.org/>. Назва з екрану.
14. Resolution MSC.415(97) (adopted on 25 November 2016) amendments to part b of the international code on intact stability, 2008 (2008 is code)

СЦЕНАРНО-ОРІЄНТОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНОВИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДНЮ ЯК ДОМІШКИ ДО ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

¹Шалапко Д. О., ²Гречка Н. В.

¹Херсонський навчально-науковий інститут НУК імені адмірала Макарова
(Україна)

²Національний університет цивільного захисту України
(Україна)

Вступ. Упровадження альтернативних палив і низьковуглецевих технологій у морському транспорті є одним із пріоритетних напрямів підвищення енергоефективності та екологічної безпеки суднових енергетичних установок. Серед перспективних рішень особливу увагу привертає використання водню як добавки до основного дизельного палива. Такий підхід дозволяє частково інтенсифікувати процеси займання і згоряння без повного переходу на водневе паливо, що є технічно складним для наявних суднових дизельних установок.

У межах розглядуваної концепції водень не використовується як самостійне моторне паливо, а вводиться у вигляді малої домішки до дизельного палива, орієнтовно до 0,1 % за масою. Особливістю запропонованої схеми є подача водню безпосередньо у паливопровід високого тиску перед форсункою. Це принципово відрізняє її від схем подачі водню у впускний тракт, оскільки не передбачає формування значних об'ємів попередньо змішаних воднево-повітряних сумішей у впускній системі двигуна.

Разом із потенційними енергетичними та екологічними перевагами інтеграція водню формує новий профіль пожежної і вибухопожежної небезпеки машинного відділення. Навіть за малих витрат H_2 у складі суднової енергетичної установки з'являються додаткові елементи підвищеного ризику: агрегат виробництва або зберігання водню, трубопроводи, арматура, вузли дозування, з'єднання та локальні ділянки подачі газу. Тому впровадження водневих мікродомішок потребує не лише оцінювання впливу на робочий процес двигуна, а й окремого аналізу пожежної безпеки.

Актуальність досліджень. Фізико-хімічні властивості водню істотно відрізняються від властивостей традиційних рідких палив. Водень має низьку енергію займання, широкий діапазон займистих концентрацій, високу швидкість дифузії та здатність накопичуватися у верхніх зонах обмежених приміщень. У машинному відділенні судна ці властивості набувають особливого значення через складну геометрію простору, наявність багаторівневої компоновки обладнання, локальних застійних зон, гарячих поверхонь, електрообладнання та впускних систем.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що існуючі підходи до пожежної безпеки або орієнтовані на традиційні дизельні суднові енергоустановки, або розглядають водневі системи як самостійні енергетичні комплекси, зокрема паливні елементи чи установки з великими запасами стисненого або криогенного водню. Водночас режим мікродозування водню до дизельного палива має специфічний характер небезпеки. З одного боку, він не створює таких масштабних ризиків, як повністю водневі енергетичні системи; з іншого — змінює конфігурацію потенційно небезпечних зон у машинному відділенні та потребує спеціального сценарного оцінювання.

Особливо важливим є те, що пожежна небезпека в цьому випадку визначається не лише часткою водню в паливі, а насамперед просторовою організацією водневої підсистеми, імовірністю витoku, ефективністю вентиляції, швидкодією газодетекції, наявністю джерел займання та здатністю конструктивних елементів зберігати функціональність під дією теплового потоку.

Постановка задачі. Метою дослідження є обґрунтування сценарно-орієнтованого підходу до оцінювання пожежної безпеки суднових енергоустановок при використанні

водню як малої домішки до дизельного палива.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких задач: ідентифікувати основні джерела пожежної та вибухопожежної небезпеки, що виникають при інтеграції водневої підсистеми у судову дизельну енергоустановку; сформулювати типові сценарії розвитку аварійних подій; визначити критерії оцінювання пожежної небезпеки та вогнестійкості елементів СЕУ; запропонувати узагальнену матрицю ризику «ймовірність–наслідки»; оцінити вплив вентиляції, газодетекції, автоматичних блокувань, теплового екранування та раціонального трасування трубопроводів на інтегральний рівень пожежного ризику.

Об'єктом дослідження є суднова енергетична установка з дизельним двигуном, модернізована для роботи з малою домішкою водню до дизельного палива. Предметом дослідження є процес формування пожежонебезпечних станів у машинному відділенні та вплив конструктивно-технологічних бар'єрів на рівень пожежного ризику.

Результати досліджень. Для оцінювання пожежної безпеки судової енергоустановки з водневою домішкою запропоновано використовувати сценарний підхід. Його перевага полягає в тому, що небезпека розглядається не як абстрактна наявність горючого газу, а як послідовність взаємопов'язаних подій: виникнення витоку, поширення водню у просторі машинного відділення, накопичення газоповітряної суміші, наявності або відсутності джерела займання, спрацювання або відмова захисних систем, тепловий вплив на конструкції й обладнання.

У межах дослідження сформовано чотири базові сценарії аварійного розвитку подій. Сценарій S1 відповідає мікровитоку водню без займання за умов ефективної вентиляції. У цьому випадку основним небезпечним чинником є можливість локального накопичення H_2 до концентрацій, близьких до нижньої межі займистості. Сценарій S2 описує мікровитік із відкладеним займанням, коли локальна хмара водню запалюється від випадкового джерела. Сценарій S3 характеризує масований витік із негайним займанням і формуванням факельної пожежі, що створює інтенсивний тепловий вплив на конструкції, трубопроводи та елементи двигуна. Найбільш несприятливим є сценарій S4, за якого масований витік поєднується з неефективною вентиляцією, що може призвести до накопичення вибухонебезпечної хмари у верхніх зонах машинного відділення.

Кількісне оцінювання сценаріїв доцільно виконувати за системою критеріїв, які відображають як імовірність реалізації небезпечної події, так і тяжкість її наслідків. До таких критеріїв належать умовна ймовірність займання суміші «водень–повітря», інтенсивність теплового потоку на конструкції та обладнання, час досягнення граничних температур у контрольних елементах, а також час збереження функціональності критичних систем: вентиляції, електроживлення, газодетекції, сигналізації та автоматичних блокувань.

Для формалізації ризику використано матрицю «ймовірність–наслідки», у якій імовірність реалізації сценарію та тяжкість наслідків оцінюються за п'ятирівневими дискретними шкалами. При цьому рівень імовірності не розглядається як точна статистична частота аварій, оскільки репрезентативні статистичні дані для судових дизельних енергоустановок із водневою мікродомішкою поки є обмеженими. Тому оцінювання виконується за комбінованим сценарно-експертним підходом із урахуванням типу відмови, місця витоку, стану вентиляції, наявності джерел запалювання, швидкодії газодетекції та ефективності захисних бар'єрів.

Результати сценарного аналізу показують, що за відсутності спеціальних заходів інтеграція водню може призводити до зростання інтегрального пожежного ризику. Найбільший внесок у це зростання роблять сценарії масованих витоків, особливо у разі неефективної вентиляції. Навіть якщо ймовірність таких сценаріїв є відносно низькою, тяжкість наслідків може бути високою через можливість факельного горіння, інтенсивного теплового впливу, пошкодження трубопроводів, втрати функціональності критичних систем і створення небезпеки для екіпажу.

Для узагальнення результатів запропоновано інтегральний показник пожежної

небезпеки, який враховує сумарний внесок сценаріїв S1–S4 з урахуванням їхньої ймовірності, тяжкості наслідків і вагових коефіцієнтів. Такий показник дозволяє порівнювати різні конфігурації суднової енергоустановки: базову дизельну СЕУ, двопаливну СЕУ без додаткових заходів і двопаливну СЕУ з оптимізованими конструктивно-технологічними рішеннями.

Порівняльна оцінка свідчить, що двопаливна СЕУ без спеціальних заходів має істотно вищий рівень інтегральної пожежної небезпеки порівняно з традиційною дизельною установкою. Це пояснюється появою нових сценаріїв, пов'язаних із витокami та займанням водню. Водночас застосування комплексу захисних рішень дозволяє суттєво знизити ризик. До таких рішень належать просторове відокремлення елементів водневої підсистеми від зон інтенсивного тепловиділення, розміщення агрегатів виробництва або буферного зберігання водню поза машинним відділенням або в ізольованих відсіках, мінімізація кількості фланцевих з'єднань, трасування трубопроводів у «холодних» зонах, застосування локальних теплових екранів і вогнестійких перегородок.

Важливим елементом зниження ризику є активний контур безпеки, який включає вентиляцію, газодетекцію та автоматичні блокування. Для водневих систем традиційна вентиляція, орієнтована переважно на відведення теплоти, є недостатньою. Вона повинна забезпечувати ефективне видалення водню з верхніх зон машинного відділення та локальних «кишень», де можливе його накопичення. Газодетектори доцільно розмішувати поблизу потенційних джерел витoku і у верхніх частинах відсіку. Двопорогова логіка спрацювання системи — попереджувальний і аварійний рівні — дозволяє реалізувати поетапну реакцію: від підсилення вентиляції та зниження подачі водню до повного аварійного відключення водневої підсистеми.

Отримані результати демонструють, що пожежна безпека суднової енергоустановки з водневою домішкою повинна забезпечуватися не одним окремим засобом захисту, а сукупністю взаємопов'язаних бар'єрів. Оптимальний ефект досягається тоді, коли пасивні конструктивні рішення поєднуються з активними системами контролю, вентиляції та аварійного керування. Саме така інтегрована структура захисту дозволяє знизити інтегральний ризик до рівня, близького до традиційної дизельної СЕУ.

Висновки. Використання водню як малої домішки до дизельного палива у суднових енергоустановках є перспективним напрямом підвищення енергоекологічної ефективності морського транспорту, однак його впровадження супроводжується формуванням нового профілю пожежної та вибухопожежної небезпеки. На відміну від традиційних дизельних систем, воднева підсистема створює ризики, пов'язані з витокami газу, його швидкою дифузією, накопиченням у верхніх зонах машинного відділення та можливим займанням від гарячих поверхонь або електрообладнання.

Запропонований сценарно-орієнтований підхід дозволяє систематизувати основні аварійні ситуації у вигляді сценаріїв S1–S4 і виконувати їх порівняльну оцінку за критеріями ймовірності займання, інтенсивності теплового впливу, часу досягнення граничних температур і часу збереження функціональності критичних систем. Це створює основу для переходу від якісного опису небезпек до інженерно обґрунтованого управління пожежним ризиком.

Встановлено, що найнебезпечнішими є сценарії масованих витоків водню, особливо за умов неефективної вентиляції. Водночас комплексна оптимізація конструктивно-технологічних бар'єрів — вентиляції, газодетекції, автоматичних блокувань, теплового екранування, трасування трубопроводів і просторового розділення небезпечних зон — дозволяє знизити інтегральний показник пожежної небезпеки до рівня, близького до традиційної дизельної суднової енергоустановки.

Практичне значення запропонованого підходу полягає у можливості його використання на етапах проєктування, модернізації та технічного обґрунтування суднових енергоустановок із водневою домішкою. Подальші дослідження доцільно спрямувати на уточнення кількісних параметрів сценаріїв на основі CFD-моделювання поширення водню

в машинному відділенні, експериментальної перевірки ефективності вентиляції та калібрування шкал ризику за даними експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Maritime Organization. International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IGF Code). London : IMO, 2017.
2. ISO/TR 15916:2015. Basic considerations for the safety of hydrogen systems. Geneva : International Organization for Standardization, 2015.
3. DNV GL. Handbook for hydrogen-fuelled vessels. Høvik : DNV GL, 2021. 132 p.
4. Shalapko D., Radchenko M., Pavlenko A., Radchenko R., Radchenko A., Pyrysunko M. Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. 2024. Vol. 72, No. 2. Article e148837. DOI: 10.24425/bpasts.2024.148837.
5. Shalapko D. O. Investigation of the influence of the use of small hydrogen impurities to the main fuel on injection spraying. Збірник наукових праць НУК. 2021. № 4 (487). С. 14–19. DOI: 10.15589/znp2021.4(487).3.
6. Aarskog F. G., Rødseth H., Scheidl S. et al. Concept risk assessment of a hydrogen-driven high-speed passenger ferry. International Journal of Hydrogen Energy. 2020. Vol. 45, Iss. 2. P. 1359–1373. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.224.
7. Mao X., Zhang D., Li H. et al. Risk assessment of hydrogen fuel cell ships based on fuzzy Bayesian network. Ocean Engineering. 2023. Vol. 270. Article 113636. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.113636.
8. Choi J.-H., Lee D., Park B.-J. Quantitative risk assessment of hydrogen leakage in a fuel cell ship. Journal of Marine Science and Engineering. 2023. Vol. 11, Iss. 4. Article 844. DOI: 10.3390/jmse11040844.
9. Van Hoecke L., Laffineur L., Campe R. et al. Challenges in the use of hydrogen for maritime applications. Energy & Environmental Science. 2021. Vol. 14. P. 815–843. DOI: 10.1039/D0EE03078A.
10. Dimitriou P., Tsujimura T. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. International Journal of Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42, Iss. 38. P. 24470–24486. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.07.232.

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВИХ МІКРОДОМІШОК У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВКАХ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ

Шалапко Д. О.

*Херсонський навчально-науковий інститут НУК імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Підвищення енергоефективності та екологічної безпеки суднових енергетичних установок є одним із ключових напрямів розвитку сучасного морського транспорту. Особливого значення це питання набуває для дизель-генераторних установок, які забезпечують електропостачання судна на ходових, маневрових і стоянкових режимах. У реальних умовах експлуатації такі агрегати значну частину часу працюють на часткових навантаженнях, що супроводжується погіршенням сумішоутворення, зниженням повноти згоряння, підвищенням питомої витрати палива та збільшенням викидів продуктів неповного окиснення.

Одним із перспективних шляхів удосконалення робочого процесу дизельних двигунів є застосування водню як функціональної добавки до основного палива [1]. На відміну від повного переходу на водневе паливо, що потребує радикальної зміни паливної апаратури, систем зберігання, безпеки та керування, використання малих водневих домішок може бути реалізоване як технологія поетапної модернізації наявних дизель-генераторних установок. У цьому випадку водень не замінює основне паливо повністю, а виконує роль активного компонента, який впливає на кінетику займання, швидкість тепловиділення, тривалість згоряння та повноту окиснення паливо-повітряної суміші.

Актуальність досліджень. Суднові дизель-генераторні установки є складними енергетичними об'єктами, робота яких визначається взаємодією паливної апаратури, процесів упорскування, сумішоутворення, займання, згоряння, теплообміну та навантажувального режиму. Тому ефективне використання водневих домішок неможливе лише на основі емпіричного підбору їхньої кількості [2]. Необхідним є математичний опис робочого процесу, який дозволяє визначити раціональний діапазон подачі водню з урахуванням енергетичної ефективності, екологічних показників і механічної навантаженості двигуна.

Актуальність роботи також пов'язана з тим, що для суднових дизель-генераторів важливо не лише зменшити витрату основного палива, а й забезпечити стабільність роботи на змінних навантаженнях [3]. Надмірне збільшення частки водню може призводити до надто швидкого тепловиділення, зростання максимального тиску циклу, підвищення швидкості наростання тиску та збільшення емісії оксидів азоту. Отже, науково обґрунтованим є не максимальне заміщення дизельного палива воднем, а пошук оптимального інтервалу мікродомішок, у якому позитивний вплив на згоряння не супроводжується небажаним зростанням термомеханічних навантажень.

Постановка задачі. Метою дослідження є обґрунтування підходу до оптимізації використання водневих мікродомішок у суднових дизель-генераторних установках на основі математичного моделювання робочого процесу двигуна.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: визначити основні параметри, що характеризують вплив водню на робочий процес дизельного двигуна; сформулювати структуру математичної моделі тепловиділення з урахуванням зміни періоду затримки займання та тривалості згоряння; оцінити вплив водневих домішок на індикаторні показники циклу; встановити обмеження за максимальним тиском, швидкістю наростання тиску та екологічними параметрами; сформулювати критерій вибору раціональної частки водню для дизель-генераторної установки.

Об'єктом дослідження є робочий процес судового дизель-генераторного двигуна при використанні водневих мікродомішок до основного палива. Предметом дослідження є

закономірності зміни параметрів тепловиділення, паливної економічності та термомеханічної навантаженості двигуна залежно від частки водню.

Результати досліджень. Для опису впливу водню на робочий процес дизельного двигуна доцільно використовувати розрахункову модель, що поєднує термодинамічний аналіз індикаторного циклу з параметричним описом закону тепловиділення. Основою такої моделі може бути модифікована функція Вібе, параметри якої коригуються залежно від частки водню, навантаження двигуна та умов сумішоутворення [4]. У загальному випадку введення водню впливає на кут початку інтенсивного тепловиділення, тривалість основної фази згоряння, максимальну швидкість тепловиділення та положення центру згоряння.

Рациональним критерієм оцінювання ефективності водневої добавки є не окремий показник, а сукупність параметрів: питома ефективна витрата дизельного палива, максимальний тиск циклу, швидкість наростання тиску, положення CA50, температура відпрацьованих газів і рівень викидів NOx. Такий підхід дозволяє уникнути однобічної оцінки, коли покращення паливної економічності досягається за рахунок надмірного зростання жорсткості роботи двигуна або погіршення екологічних характеристик.

З фізичної точки зору, позитивний вплив малих водневих домішок може бути пояснений підвищенням реакційної здатності паливоповітряної суміші [5]. Водень має високу швидкість дифузії та широкі межі займання, тому його присутність у зоні підготовки суміші сприяє прискоренню початкових окиснювальних реакцій. Для дизельного процесу це може проявлятися у скороченні періоду затримки займання, зменшенні частки пізнього дифузійного догоряння та зміщенні основної фази тепловиділення ближче до верхньої мертвої точки [5]. У результаті поліпшується використання теплоти в робочому циклі, що потенційно знижує питому витрату основного палива.

Разом з тим, ефект від водню має нелінійний характер. За малих концентрацій домішка переважно покращує кінетику згоряння без істотного зростання механічної навантаженості. За надмірного дозування водню можливе надто швидке тепловиділення в початковій фазі згоряння, що призводить до підвищення максимального тиску та швидкості його наростання. Для суднових дизель-генераторів це є принципово важливим, оскільки надійність і ресурс двигуна мають не менше значення, ніж економія палива. Тому математична модель повинна містити не лише енергетичний критерій, а й обмеження за допустимою жорсткістю робочого процесу.

У практичному аспекті перспективною є побудова адаптивної системи керування подачею водню. Така система може враховувати навантаження генератора, частоту обертання, температуру охолоджувальної рідини, температуру відпрацьованих газів, тиск наддувного повітря, концентрацію кисню у випуску та показники емісії. На основі цих даних блок керування може змінювати витрату водню так, щоб підтримувати робочий процес у зоні оптимального співвідношення між ефективністю, екологічністю та надійністю. Для стаціонарних і суднових дизель-генераторних установок такий підхід є технічно реалістичним, оскільки їхні режими роботи є більш стабільними порівняно з транспортними двигунами змінного навантаження.

Окрему роль у такій системі відіграє джерело водню. Для суднових або портових енергетичних комплексів можливим є використання електролізного водню, отриманого від надлишкової електроенергії з відновлюваних джерел або від берегової енергетичної інфраструктури [6]. У цьому випадку водень виконує подвійну функцію: з одного боку, є енергетичним носієм, а з іншого — технологічним засобом оптимізації згоряння в дизельному двигуні. Така концепція узгоджується з розвитком «зеленого» транспорту, у якому ключове значення мають не лише нові джерела енергії, а й ефективні способи їх інтеграції в наявні енергетичні системи.

Застосування математичного моделювання дає змогу попередньо оцінити безпечні межі використання водню без проведення великої кількості дорогих експериментів. На першому етапі модель може бути використана для імітації зміни закону тепловиділення,

індикаторного тиску та температури циклу при різних частках водню. На другому етапі результати моделювання доцільно верифікувати за експериментальними індикаторними діаграмами, отриманими на дизельному двигуні або дизель-генераторній установці. На третьому етапі модель може бути інтегрована в алгоритм оптимального керування подачею водню.

Таким чином, математичне моделювання робочого процесу є необхідною передумовою для переходу від експериментального використання водневих домішок до керованої технології підвищення ефективності судових дизель-генераторних установок. Його застосування дозволяє не лише прогнозувати зміну паливної економічності, а й оцінювати механічні та екологічні обмеження, що є критично важливими для енергетичних установок транспортного призначення.

Висновки. Використання водневих мікродомішок у судових дизель-генераторних установках є перспективним напрямом підвищення їхньої енергоефективності та екологічної безпеки. Найбільш доцільною є стратегія обмеженого, адаптивно керованого введення водню, за якої добавка використовується не як повна заміна дизельного палива, а як засіб інтенсифікації процесів займання і згоряння.

Показано, що оптимізація частки водню повинна виконуватися з урахуванням комплексу критеріїв: питомої витрати палива, положення основної фази тепловиділення, максимального тиску циклу, швидкості наростання тиску та рівня емісії NOx. Однокритеріальний підхід, орієнтований лише на зниження витрати дизельного палива, є недостатнім, оскільки може призвести до зростання термомеханічної напруженості двигуна.

Запропонований підхід до математичного моделювання створює основу для розроблення адаптивних систем керування подачею водню в судових і стаціонарних дизель-генераторних установках. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну верифікацію моделі, уточнення параметрів тепловиділення для різних режимів навантаження та формування алгоритмів безпечного керування водневою добавкою в умовах реальної експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Shalapko D. Optical-graphic studies of hydrogen additives' effects on diesel fuel atomization parameters. *Transport Problems*. 2023. Vol. 18, No. 4. P. 135–146. DOI: 10.20858/tp.2023.18.4.11.
2. Shalapko D. et al. Advanced fuel system with gaseous hydrogen additives. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*. 2024. DOI: 10.24425/bpasts.2024.148837.
3. Verhelst S., Wallner T. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2009. Vol. 35, No. 6. P. 490–527. DOI: 10.1016/j.pecs.2009.08.001.
4. Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd ed. New York : McGraw-Hill Education, 2018. 1056 p.
5. Dincer I., Acar C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40, No. 34. P. 11094–11111. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2014.12.035.
6. Basic considerations for the safety of hydrogen systems : ISO/TR 15916:2015. Geneva : International Organization for Standardization, 2015. 54 p.

СЕКЦІЯ:

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ
ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ**

SECTION:

**INFORMATION TECHNOLOGIES, SYSTEM ANALYSIS
AND MATHEMATICAL MODELLING OF COMPLEX OBJECTS**

ЕВОЛЮЦІЙНА АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

Белінська Т.А., Костенко В.В.

*Дніпровський Університет митної справи та фінансів
(Україна)*

Вступ. Сучасні програмні системи функціонують в умовах постійних змін бізнес-вимог, технологій та середовища. Традиційні підходи до побудови архітектури, які передбачають її повне проєктування на початкових етапах розробки, дедалі частіше виявляються недостатньо ефективними, оскільки не враховують динамічний характер розвитку програмних продуктів. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває концепція еволюційної архітектури, яка орієнтована на поступове вдосконалення системи відповідно до змінних вимог та умов її використання. У *Software Architecture: The Hard Parts* підкреслюється, що архітектура повинна розглядатися як керований процес змін, а не як статична структура [1, с. 150–160].

Актуальність дослідження зумовлена зростанням складності програмних систем, широким впровадженням мікросервісних підходів та необхідністю швидкої адаптації до змін ринку. У сучасних умовах розробки програмного забезпечення важливо не лише створити функціональний продукт, але й забезпечити його здатність до подальшого розвитку без значних витрат ресурсів. Як зазначається у сучасних підходах до архітектури, система повинна проєктуватися таким чином, щоб зміни були очікуваними та контрольованими, а не критичними та руйнівними. У *Building Evolutionary Architectures* автори зазначають, що в традиційних монолітних системах зміна навіть незначної функціональності може вимагати повторного розгортання всієї системи, що збільшує ризики та витрати. У той же час еволюційна архітектура дозволяє локалізувати зміни та впроваджувати їх поступово [2, с. 30–55].

Метою даної роботи є аналіз основних принципів еволюційної архітектури та визначення її ролі у створенні сучасних програмних систем. Особлива увага приділяється дослідженню механізмів, які забезпечують можливість поступового розвитку архітектури без порушення цілісності системи, а також оцінці переваг і обмежень цього підходу.

У процесі дослідження було використано методи аналізу та узагальнення наукових джерел, порівняльний аналіз підходів до проєктування архітектури програмних систем, а також метод систематизації принципів еволюційної архітектури. Це дозволило визначити ключові механізми забезпечення адаптивності та стійкості програмних систем.

У *Software Architecture: The Hard Parts* автори детально описують застосування архітектурних фітнес-функцій як інструменту автоматизованого контролю архітектурних рішень. Зокрема, вони розглядають приклади перевірок, які забезпечують дотримання визначених обмежень, таких як допустимі залежності між модулями або відповідність обраний архітектурній структурі. Наприклад, у системах із мікросервісною архітектурою можуть використовуватися фітнес-функції, що автоматично перевіряють, чи не виникають заборонені прямі залежності між сервісами, які повинні взаємодіяти лише через визначені API. У разі порушення таких правил збірка системи завершується з помилкою, що дозволяє забезпечити постійний контроль архітектурної цілісності системи [1, с. 165–175].

У *Building Evolutionary Architectures* автори розглядають підхід до поступової трансформації монолітних систем у більш гнучкі архітектури. Зокрема, описується стратегія декомпозиції, за якої окремі функціональні підсистеми (наприклад, управління користувачами, обробка замовлень або платежів) виділяються в незалежні сервіси. Такий підхід дозволяє ізолювати зміни в межах окремого компонента та зменшити вплив цих змін на інші частини системи. Автори підкреслюють, що саме поступовий характер такої декомпозиції є ключовим фактором успішної еволюції архітектури, оскільки дозволяє уникнути ризиків, пов'язаних із повною перебудовою системи [2, с. 60–75].

Крім того, у *Building Evolutionary Architectures* значна увага приділяється управлінню архітектурними характеристиками, такими як масштабованість,

продуктивність та безпека. Автори наводять приклади контролю цих характеристик за допомогою автоматизованих механізмів, інтегрованих у процес безперервної інтеграції. Наприклад, автоматизовані перевірки можуть оцінювати рівень зв'язаності між компонентами або контролювати відповідність системи визначеним нефункціональним вимогам, що дозволяє підтримувати стабільність архітектури під час її розвитку [2, с. 30–55].

Важливим доповненням до еволюційної архітектури є принципи, викладені у Чистій архітектурі Роберта Мартіна. Автор наводить приклади застосування принципу інверсії залежностей, відповідно до якого бізнес-логіка системи повинна бути незалежною від зовнішніх компонентів. Наприклад, зміна бази даних або інтерфейсу користувача не повинна впливати на логіку обробки бізнес-процесів. Такий підхід дозволяє ізолювати зміни та підвищує стійкість системи до модифікацій [3, с. 200–230].

У *Software Architecture: The Hard Parts* також розглядається інтеграція еволюційної архітектури з практиками безперервної інтеграції та доставки. Автори описують використання автоматизованих пайплайнів, у межах яких кожна зміна коду проходить перевірку за допомогою тестів, включаючи архітектурні фітнес-функції. Це дозволяє забезпечити безперервний контроль за відповідністю системи визначеним архітектурним принципам та своєчасно виявляти відхилення [1, с. 175–185].

У *Building Evolutionary Architectures* також розглядається проблема керування складністю у великих системах. Автори зазначають, що еволюційний підхід дозволяє впроваджувати зміни поступово, без необхідності повної перебудови системи. У розподілених архітектурах це означає можливість незалежного оновлення окремих сервісів без впливу на роботу всієї системи, що забезпечує безперервність її функціонування [2, с. 80–95].

Наукова новизна отриманих результатів полягає в узагальненні підходів до застосування еволюційної архітектури та визначенні взаємозв'язку між архітектурними фітнес-функціями, принципами модульності та підходами чистої архітектури. Показано, що їх комплексне використання забезпечує підвищення адаптивності програмних систем та зниження ризиків при внесенні змін.

Висновки. Таким чином, аналіз підходів, викладених у *Software Architecture: The Hard Parts*, *Building Evolutionary Architectures* та Чистій архітектурі, свідчить про те, що еволюційна архітектура є ефективним інструментом розробки сучасних програмних систем. Вона дозволяє забезпечити контрольованість змін, підвищити адаптивність системи та знизити ризики її модернізації. Поєднання цих підходів створює основу для побудови гнучких, масштабованих і стійких до змін програмних систем. Водночас слід зазначити, що впровадження еволюційної архітектури пов'язане з певними труднощами. Зокрема, вона потребує високого рівня автоматизації процесів розробки, наявності розвинутої інфраструктури тестування та відповідної кваліфікації розробників. Крім того, неправильне застосування принципів декомпозиції може призвести до надмірної складності системи. [1, с. 185–190; 3, с. 230–240].

ЛІТЕРАТУРА

1. Ford N., Richards M., Sadalage P., Dehghani Z. *Software Architecture: The Hard Parts*. O'Reilly Media, 2021. Розд. 6, с. 150–190.
2. Ford N., Parsons R., Kua P. *Building Evolutionary Architectures*. O'Reilly Media, 2017. Розд. 2–4, с. 30–95.
3. Мартін Р. Чиста архітектура: мистецтво розробки програмного забезпечення. Розд. 20–22, с. 200–240.

ВИЗНАЧЕННЯ ІНСТРУМЕНТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МОРСЬКИХ РОБОТИЗОВАНИХ ЗАСОБІВ УМОВАХ ЗОВНІШНЬОГО ЗБУРЕННЯ

Блінцов В. С., Грудініна Г. С.

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Постійне зростання вимог до точності керування морськими рухомими об'єктами (МРО) підвищує актуальність проблеми впливу невизначених зовнішніх збурень на МРО. До таких збурень належать вітер, хвилювання та течія. Дія цих факторів суттєво ускладнює задачі стабілізації руху та забезпечення точності позиціонування. Розвиток морської робототехніки безпосередньо залежить від здатності систем автоматичного керування компенсувати ці фактори та підтримувати заданий режим руху навіть у надскладних динамічних умовах [1].

Актуальність дослідження полягає у необхідності визначення основних напрямків удосконалення систем автоматичного керування рухом морських рухомих об'єктів, таких як автономні безпілотні судна та підводні апарати. Головною проблематикою завдання є питання удосконалення якості керування даними об'єктами в умовах впливу зовнішнього збурення.

Постановка задачі. Головною проблемою під час розробки системи керування морськими автономними безпілотними суднами та підводними апаратами є питання невизначеності впливу зовнішнього збурення. З метою удосконалення якості керування даними об'єктами в роботі необхідно провести дослідження динаміки МРО в умовах зовнішнього збурення із застосуванням сучасного засобу моделювання руху судна в умовах зовнішнього збурення.

Результати досліджень. Розглянемо на прикладі застосування запропонованого програмного пакету VeSim від компанії Sintef [2] для тестування регулятора курсу судна в умовах зовнішнього збурення. З початку підготуємо регулятор курсу судна попередньо розроблений в програмному пакеті Matlab/Simulink. Для цього необхідно зберегти, розроблений в Simulink регулятор, у форматі FMU. На рисунку 1 представлено структуру ПІД регулятора, розробленого для стабілізації курсу судна в системі Simulink [3].

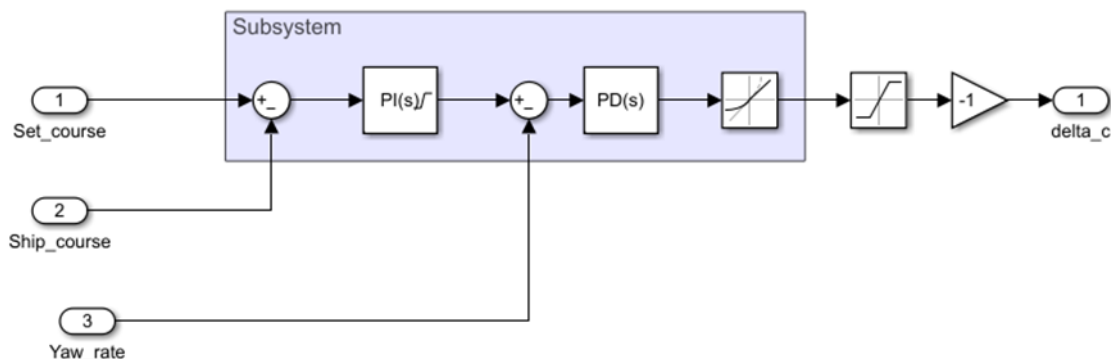


Рисунок 1 — Структурна схема регулятора курсу судна створена в Simulink

Наступним кроком підключаємо до програмного пакету файл з геометрією корпусу судна та вибираємо рушійно-стерновий комплекс. Також, підключаємо FMU файл з розробленим регулятором.

Наступним етапом створюємо сценарій зовнішніх умов плавання, а саме задаємо параметри вітру, хвилювання і течії. У таблиці 1 представлено сценарій зовнішнього

збурення, що відповідає заданим умовам.

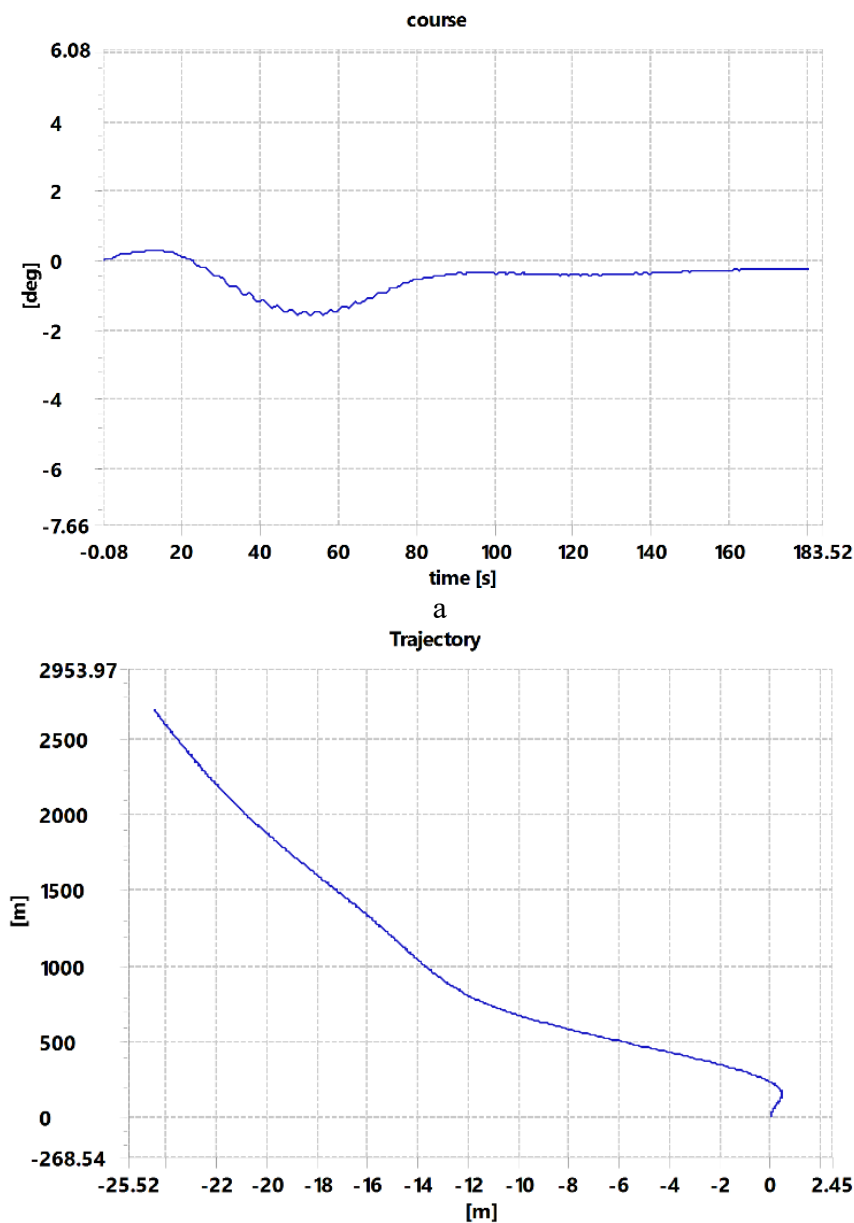
Таблиця 1. Сценарій зовнішнього збурення

Судно		Вітер		Хвилювання		Течія	
швидкість, вуз.	курс, град.	швидкість, м/с.	напрямок, град.	висота, м	напрямок, град.	швидкість, м/с.	напрямок, град.
12	0	5	10	2	10	0.1	20

Наступним кроком проведемо підлаштування параметрів регулятора.

Параметри ПД-регулятора були підібрані експериментально шляхом послідовного налаштування пропорційної, диференційної та інтегральної складових з урахуванням критеріїв швидкодії, перерегулювання та стійкості системи в умовах вітро-хвильових збурень.

На рисунку 2 представлено результати моделювання руху судна, керованого ПД регулятором. Умови зовнішнього збурення представлені в табл.1.



б

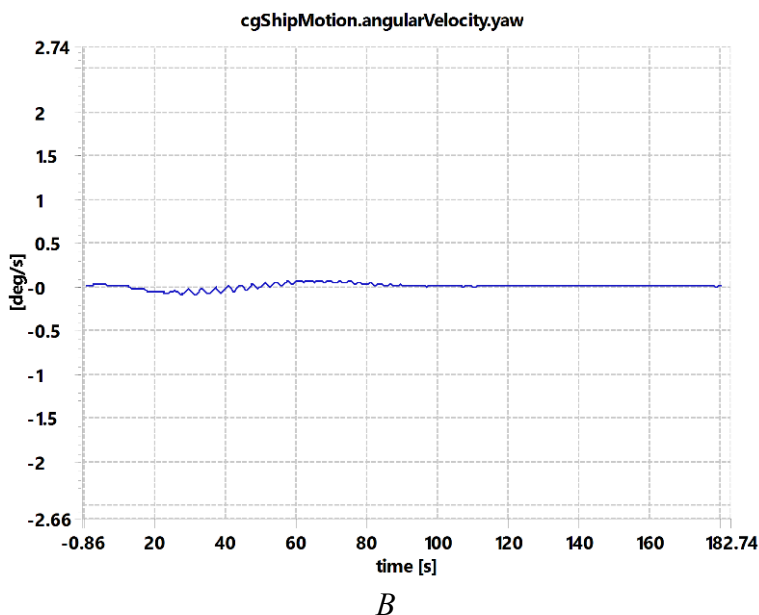


Рисунок 2 — Моделювання руху судна, керованого ПД регулятором в умовах зовнішнього збурення: а) курс судна; б) траєкторія руху; в) кутова швидкість

Висновки. Під час розробки системи керування морським роботизованим засобом, важливо мати змогу досліджувати динаміку руху керованого МРО в умовах наближених до реального морського середовища. В даній роботі представлено результат системного аналізу сучасних програмних засобів, які було вибрано за критеріями: відповідність вимогам, простота використання. У якості прикладу реалізації запропонованого підходу до розробки систем автоматичного керування наведено приклад застосування VeSim для тестування регулятора стабілізації курсу судна в умовах зовнішнього збурення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тимченко, В. Л., & Надточий, А. В. (2025). Безекіпажне надводне судно як складова автоматизованої системи розмінування внутрішніх вод України. Вісник Східноукраїнського Національного Університету Імені Володимира Даля, 6 (286), 182–188. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-286-6-182-188>
2. VeSim (SINTEF). Отримано з: sintef.no
3. Бурунін, А.П., Грудініна, Г.С. (2024). Дослідження ефективності системи керування малорозмірним безекіпажним надводним судном в умовах дії зовнішніх збурень. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. НУК, № 4 (497), С. 131-140. DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).19](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).19)

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСЬКИХ ДВИГУНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ DEPAS 5.0W. WAVELET VIBROACOUSTICS + ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ

Варбанець Р. В., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М.
*Одеський національний морський університет
(Україна)*

Міжнародна морська організація (ІМО) активно впроваджує нові вимоги щодо декарбонізації світового морського флоту та зниження викидів парникових газів. Основними напрямками розвитку сучасного судноплавства є підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок, використання альтернативних видів палива та вдосконалення методів моніторингу технічного стану головних двигунів. Одним із найважливіших завдань сучасної суднової енергетики є забезпечення безперервного контролю параметрів робочого процесу дизельних двигунів у режимі реального часу. Для цього необхідно застосовувати сучасні цифрові системи діагностування, здатні забезпечити високу точність вимірювань та можливість аналізу великого обсягу експериментальних даних.

Сучасні суднові дизелі працюють в умовах підвищених вимог щодо екологічної безпеки та економічності. Впровадження стандартів ІМО щодо зменшення викидів CO_2 , NO_x та SO_x потребує вдосконалення систем контролю процесу згоряння палива та технічного стану паливної апаратури і механізмів газорозподілу. Особливо актуальним є створення портативних систем діагностування, які можуть використовуватись як у навчальному процесі морських університетів, так і безпосередньо судновими механіками під час експлуатації суден. Використання віброакустичного аналізу, wavelet-перетворення та алгоритмів штучного інтелекту дозволяє значно розширити можливості сучасних систем моніторингу робочого процесу двигунів.

Метою роботи є розробка методів та засобів діагностування суднових дизелів на основі сумісного аналізу індикаторного тиску та віброакустичних сигналів із застосуванням хвильового аналізу та алгоритмів штучного інтелекту. У рамках дослідження необхідно забезпечити високоточну синхронізацію даних за кутом повороту колінчастого вала, реалізувати новий алгоритм визначення верхньої мертвої точки за наявності трьох невідомих параметрів, а також забезпечити можливість визначення фаз паливоподачі та газорозподілу за віброакустичними сигналами. Окрему увагу приділено розробці критеріїв оцінювання стабільності робочого циклу та можливості прогнозування параметрів робочого процесу за допомогою AI-алгоритмів.

У роботі представлено нову портативну систему DEPAS 5.0W для аналізу робочого процесу суднових дизелів. Система забезпечує реєстрацію тиску в циліндрі до 250 бар, аналіз віброакустичних сигналів у діапазоні до 15 кГц, бездротову передачу даних через Bluetooth та роздільну здатність $0,1^\circ$ кута повороту колінчастого вала. Для визначення положення верхньої мертвої точки використовується аналітичний алгоритм на основі політропного закону стиску та цифрового низькочастотного фільтра Butterworth. Розроблена система дозволяє визначати параметри робочого циклу P_{max} , $IMEP$, $iPower$, а також фази відкриття та закриття клапанів і фази паливоподачі. У роботі також реалізовано критерії оцінювання нерівномірності циклу COV та CII , які дозволяють оперативно оцінювати стабільність процесу згоряння палива та технічний стан паливної апаратури. Особливу увагу приділено wavelet-аналізу віброакустичних сигналів. Використання wavelet-скалограм дозволяє визначати частотний склад сигналів у конкретні моменти часу та забезпечує високоточне визначення фаз робочого процесу.

На основі MATLAB Deep Learning Toolbox досліджується можливість використання нейромережових алгоритмів для прогнозування параметрів робочого процесу за віброакустичними сигналами. Експериментальні дослідження на двигунах типу NVD24,

Wartsila 6L20 та MAN 7S50MC підтвердили ефективність запропонованих методів діагностування та можливість підвищення ефективності роботи суднових дизелів.

Висновки. Розроблено портативну систему DEPAS 5.0W для діагностування суднових дизелів у режимі реального часу. Запропоновано новий алгоритм визначення ВМТ із трьома невідомими параметрами, що є актуальним для сучасних суднових двигунів. Показано ефективність сумісного використання індикаторного та віброакустичного аналізу для діагностування паливної апаратури та механізму газорозподілу. Wavelet-аналіз та алгоритми штучного інтелекту є перспективними для задач прогнозування параметрів робочого процесу суднових дизелів. Запропоновані методи можуть бути використані як у навчальному процесі морських університетів, так і під час експлуатації сучасних суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Varbanets R., Minchev D., Kucherenko Y., Zalozh V., Kyrylash O., Tarasenko A. Methods of Real-Time Parametric Diagnostics for Marine Diesel Engines. Polish Maritime Research. 2024. Vol. 31, No. 3. P. 71–84.
2. Neumann S., Varbanets R., Kyrylash O., Maulevych V., Yeryganov O. Marine diesels working cycle monitoring on the base of IMES GmbH pressure sensors data. Diagnostyka. 2019. Vol. 20, No. 2. P. 19–26.
3. Kefalas A. et al. Estimation of Combustion Parameters from Engine Vibrations Based on Discrete Wavelet Transform and Gradient Boosting // Graz University of Technology. 2025.

PROXIMITY GOSSIP-ПРОТОКОЛ СИНХРОНІЗАЦІЇ РЕЄСТРУ ПОДІЙ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ЗВ'ЯЗКУ

Велегура Є. А., Горячкін В. М.

*Український державний університет науки і технологій
(Україна)*

Сучасна логістика вантажних перевезень дедалі більше спирається на оперативний обмін даними між мобільними учасниками — вантажівками, причепами, спеціалізованим обладнанням контейнерів — та стаціонарною інфраструктурою центрів управління. Якщо для стаціонарних учасників надійне з'єднання можна вважати нормою, то для мобільних вузлів характерною є фундаментально інша мережева реальність: ділянки автомагістралей, гірські перевали, тунелі, прифронтові території та віддалені сільські райони регулярно створюють зони відсутнього або деградованого покриття, тривалість перебування в яких може варіюватися від хвилин до годин.

Важливість цієї проблеми зумовлена подвійною природою логістичних даних. З одного боку, вони мають критичне значення для розрахунків між учасниками, доказів виконання договорів та страхових випадків, тому потребують криптографічної незмінності та повної аудитоспроможності. З іншого боку, фіксація подій (зміна температури в рефрижераторі, відкриття опломбованого контейнера, проходження контрольних точок) триває безперервно, що зумовлює критичну необхідність мінімізації латентності доставки інформації до інфраструктурних вузлів задля забезпечення оперативного моніторингу та верифікації стану вантажу [1]. Поєднання цих вимог робить актуальною розробку механізмів синхронізації, орієнтованих не тільки на стабільну топологію, а також і на хаотичні короткочасні контакти між мобільними вузлами.

При проведенні аналізу обмежень та виборі архітектури реєстру, враховуючи розподілену природу транспортних мереж, актуальною є теорема CAP (Consistency, Availability, Partition tolerance) [3], згідно з якою система не може одночасно гарантувати узгодженість, доступність та стійкість до розділення. У вантажних перевезеннях розділення мережі є не виключним, а постійним станом, тому пріоритетом стає поєднання доступності та стійкості до розділення з відкладеним досягненням узгодженості (eventual consistency). Класичні лінійні блокчейн-протоколи [1, 2] непридатні для таких умов, оскільки вимагають частого глобального консенсусу, що в умовах ізольованих мобільних кластерів призводить до зупинки запису або відкидання локальних гілок при відновленні зв'язку [4].

Архітектурною основою запропонованого рішення є реєстр на базі направленого ациклічного графа (DAG) [4, 5], у якому кожна нова транзакція посиляється хешами на декілька попередніх. Це дозволяє різним вузлам паралельно та незалежно фіксувати події, формуючи локальні розгалуження графа без необхідності негайного узгодження порядку. Для детермінованого злиття таких розгалужень при відновленні зв'язку застосовуються безконфліктні реплікаційні типи даних (CRDT) [6]: журнал транзакцій моделюється як G-Set, а агрегований стан вантажу — як автомат із частковим порядком станів. Комутативність та асоціативність операцій злиття гарантують однаковий результат незалежно від послідовності контактів, що принципово важливо для коректної роботи нижче описаного протоколу обміну, де одна й та сама транзакція може досягти отримувача через різні ланцюги посередників.

Для вирішення проблеми синхронізації запропоновано застосування proximity gossip-протоколу при обміні дельтами між транспортними засобами. Протокол функціонує в режимі безпосередньої взаємодії мобільних вузлів через локальні безпроводні канали короткого радіусу дії, що забезпечує автономну роботу системи безпосередньо в зонах відсутності мережевого покриття, де інфраструктура зв'язку відсутня за визначенням. У таких умовах єдиним каналом винесення даних з ізольованого сегмента залишається інший

транспортний засіб, що випадково або планово опиняється поруч (рис. 1).

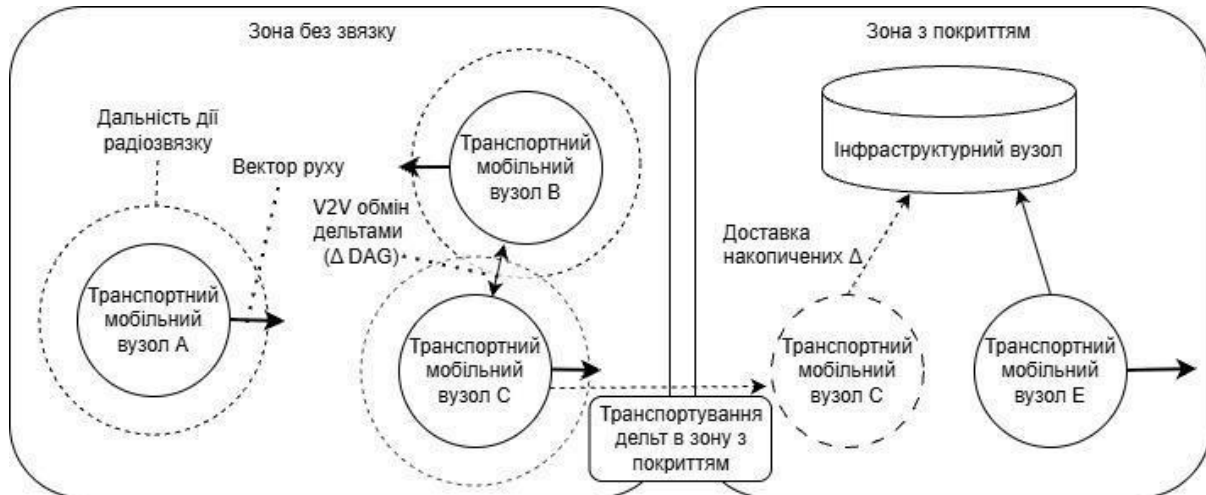


Рисунок 1 — Модель proximity gossip-обміну між транспортними засобами в умовах фрагментованого покриття зв'язку

Кожен мобільний вузол періодично транслює beacon-повідомлення з ідентифікатором, поточною геопозицією, напрямком руху та компактним вектором версій (vector clock), що описує найсвіжіші відомі вузлу події з кожного джерела. При прийомі beacon від зустрічного транспортного засобу вузол порівнює його вектор зі своїм та визначає асиметрію знань — підмножину транзакцій, наявних в одного учасника, але відсутніх в іншого. Каналом передаються лише ці дельти, що різко скорочує мережеве навантаження порівняно з епідемічними протоколами повного обміну [7]. Цифрові підписи створювачів транзакцій та хеш-посилання DAG роблять питання довіри до конкретного посередника неактуальним: будь-яка модифікація даних виявляється на стороні отримувача.

У зонах підвищеної концентрації транспорту (стоянки, заправки, під'їзди до митниць, термінали) у радіусі дії одночасно може перебувати декілька кандидатів на синхронізацію, що вимагатиме вибір партнера для синхронізації. Запропоновано стратегію вибору на основі комбінації трьох критеріїв. Перший — інформаційний вік партнера, тобто час від останнього успішного обміну з ним; пріоритет надається сусідам із максимальним віком, оскільки очікуваний приріст знань від них вищий. Другий — вектор руху: перевага надається транспортним засобам, що рухаються у протилежному напрямку, оскільки вони з більшою ймовірністю невдовзі покинуть поточну зону відмови та доставлять накопичені дані до інфраструктурного вузла, виконуючи роль «цифрового кур'єра» (digital ferry). Третій — оцінка очікуваної тривалості контакту на основі відносної швидкості сторін, що дозволяє пріоритизувати зустрічі з достатньо широким часовим вікном для повного обміну дельтами.

Прийняті дані послідовно інтегруються в локальний DAG отримувача через CRDT-операцію merge. Завдяки властивостям комутативності, асоціативності та ідемпотентності цієї операції результат залишається коректним навіть тоді, коли одна транзакція досягає вузла різними шляхами через декількох посередників, що є типовою ситуацією у щільних транспортних потоках. Це дозволяє відмовитися від ускладнених схем виявлення дублікатів та довірених маршрутизаторів.

Інтенсивність зустрічей між транспортними засобами на ділянці траси може бути змодельована як просторовий пуассонівський процес, параметри якого визначаються щільністю потоку, шириною радіо-діапазону та розподілом швидкостей. На основі цієї моделі аналітично оцінюється середній час до глобальної реплікації події, створеної в офлайн-зоні, а також математичне очікування довжини маршруту посередництва. Прив'язка протоколу до фізичної моделі трафіку дозволяє адаптивно налаштовувати

частоту beacon-розсилок та розмір дельти залежно від спостережуваної густоти зустрічей, мінімізуючи енергоспоживання у малоінтенсивних сценаріях.

Запропонований proximity gossip-протокол є цілеспрямованим адаптуванням епідемічної моделі розповсюдження даних до специфіки транспортних мереж із просторово-корельованими відмовами зв'язку. Обмеження множини партнерів безпосереднім радіо-оточенням, обмін лише дельтами на основі векторів версій та пріоритизація транспортних засобів зустрічного напрямку дозволяє скоротити час винесення даних з ізольованих сегментів мережі за рахунок ефекту «цифрового кур'єра».

ЛІТЕРАТУРА

1. M. B. Mollah et al., Blockchain for the Internet of Vehicles Towards Intelligent Transportation Systems: A Survey, in IEEE Internet of Things Journal, vol. 8, no. 6, pp. 4157–4185, 15 March 2021, doi: 10.1109/JIOT.2020.3028368.
2. Y. Xiao et al., A survey of distributed consensus protocols for blockchain networks, IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 2, pp. 1432–1465, 2020, doi: 10.1109/comst.2020.2969706.
3. S. Gilbert and N. Lynch, Brewer's conjecture and the feasibility of consistent, available, partition-tolerant web services, ACM SIGACT News, vol. 33, no. 2, pp. 51–59, 2002, doi: 10.1145/564585.564601.
4. K. Karlsson et al., Vegvisir: A partition-tolerant blockchain for the internet-of-things, in 2018 IEEE 38th Int. Conf. on Distributed Computing Systems (ICDCS), IEEE, 2018, pp. 1150–1158, doi: 10.1109/ICDCS.2018.00114.
5. M. Tran et al., SwarmDAG: A partition tolerant distributed ledger protocol for swarm robotics Ledger, vol. 4, pp. 25–31, 2019, doi: 10.5195/ledger.2019.174.
6. M. Shapiro et al., A comprehensive study of convergent and commutative replicated data types, INRIA Research Report, 2011, url: <https://inria.hal.science/inria-00555588v1>.
7. A. Vahdat and D. Becker, Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks, Tech. Rep. CS-200006, Department of Computer Science, Duke University, July 2000, url: <http://issg.cs.duke.edu/epidemic/epidemic.pdf>.

DEVELOPMENT OF AN INFORMATION MODEL OF THE MOVEMENT OF THE WORKING PARTS OF SUBSOILERS

Gorbatyuk Ie. V.

*Kyiv National University of Construction and Architecture
(Ukraine)*

Introduction. Intensive development of mineral deposits and construction of oil and gas pipelines is impossible without modern construction equipment capable of developing solid and frozen soils.

One of the main types of machines that develop such soils are mounted rippers based on caterpillar tractors, the working process of which is characterized by the lowest energy intensity of the soil destruction process [1, 2].

Relevance of research. Due to the fact that frozen and strong soils have increased strength, their development by earthmoving machines is impossible without preliminary processing aimed at reducing the resistance of the soil during its further development. Therefore, the development of an information model of the movement of the loosening unit of a construction machine is an urgent task.

Formulation of the problem. The efficiency of the loosening equipment largely depends on the rational operating modes of the power plant. The control systems that are currently mass-produced, the display devices, as well as the slow reaction of the operator to the rapidly changing working process conditions, do not allow the full use of the traction and coupling qualities of the machine.

In this regard, it is necessary to develop an information model of the workflow of the loosening unit of a construction machine.

Research results. Any machine-tractor unit is a multi-mass system [3, 4]. When analyzing the translational motion of the base tractor, the following main masses can be distinguished: internal combustion engine, transmission, tractor frame, attachments, respectively. The internal combustion engine and transmission create inertial moments due to uneven rotational motion, and the frame and attachments create inertial forces due to uneven translational motion. Conditionally assuming that each of the above masses is a shaft that performs rotational motion relative to its axis, we replace the internal combustion engine with an «internal combustion engine shaft» with a moment of inertia, transmission — «transmission shaft» with a moment of inertia. The forward motion of the tractor is replaced by the motion of the «tractor shaft» with the moment of inertia J_3 , and the motion of the attachment is replaced by the «attachment shaft» with the moment of inertia J'_3 .

When compiling the equations of motion of the base tractor, the following assumptions were made: the base tractor moves in a straight line; the connections of the conditional shafts are not deformed (energy losses due to deformation are insignificant); the connection of the attachment and the frame is absolutely rigid.

Uniform rectilinear motion of the base tractor, expressed in moments related to the conditional shaft of the tractor:

$$M_s = M_f + M_{wb}, \quad (1)$$

where M_s — moment on the tractor's nominal shaft; M_f — moment of resistance to rolling of the tractor; M_{wb} — moment of resistance created by the working body.

Taking into account the uneven rectilinear motion caused by the action of micro-relief irregularities on the running gear, this equation will take the form:

$$M_s = (J_3 + J'_3) \frac{d\omega_2}{dt} + M_f + M_{wb} - M_\alpha, \quad (2)$$

where ω_2 — angular velocity of the conventional tractor shaft; M_α — moment, brought to the

tractor shaft, arising from the tractor's movement down a slope (the tractor's forward tilt in the direction of movement is taken as a positive angle).

Moment of rolling resistance of the tractor, brought to the tractor shaft:

$$M_f = \frac{r_w}{i_t} P_f, \quad (3)$$

where P_f — tangential rolling resistance force of the base tractor; i_t — transmission ratio; r_w — radius of the drive wheel of the base tractor.

In straight-line motion, P_f force depends on the parameters of the engine, the weight of the machine, the actual speed of its movement and ground conditions.

The moment of resistance created by the working body:

$$M_{wb} = \frac{r_w}{i_t} P_c, \quad (4)$$

where P_c — traction resistance force.

The moment arising from the movement of the tractor on a slope is determined from the expression [5]:

$$M_\alpha = \frac{r_w}{i_t} G_l \sin \alpha, \quad (5)$$

where G_l — weight of the loosening unit; α — angle of inclination of the base tractor relative to the horizontal plane.

The actual speed of the base tractor is determined from the expression [5]:

$$v_t = \frac{r_w}{i_t} \omega_2. \quad (6)$$

Thus, after substituting expressions (3) — (5) into equation (2), we obtain a system of equations describing the uneven gradual movement of the base tractor:

$$\begin{cases} v_t = \frac{r_w}{i_t} \omega_2; \\ M_s = (J_3 + J'_3) \frac{d\omega_2}{dt} + \left(\frac{r_w}{i_t} \right) \times [P_f + P_c - G_l \sin \alpha] \end{cases} \quad (7)$$

Conclusions. Thus, the input of this information model of the movement of the loosening unit of a construction machine is the value of the following quantities: the angular velocity of the shaft of the internal combustion engine and the force of traction resistance, and the output is the magnitude of the moment on the conventional shaft of the tractor.

REFERENCES

1. Pelevin L. Developing a mathematical substantiation for the physical modelling of the soil-ripping equipment work process / L. Pelevin, Ie. Gorbatyuk, S. Zaichenko, V. Shalenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – vol. 6, no. 2 (90): Information technology. Industry control systems. P. 52–60.
2. Gorbatyuk Ie., Mishchuk D., Balaka M. Informative model of the effect of microrelief on uncontrolled movement of the working elements of the ripper. Proceedings of the 6th International scientific and practical conference “Current trends in scientific research development”. BoScience Publisher. Boston, USA. 2025. P. 141–146.
3. Gorbatyuk Ie.V., Rashkivskiy V.P., Balaka M.M. Information development of functional control schemes for soil loosening. Сучасний стан та пріоритети модернізації науки, освіти і суспільства: збірник тез доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Полтава, 21 січня 2025 р.). Полтава: ЦФЕНД, 2025. С. 57–59.
4. Горбатюк Є.В. Планування рельєфу ґрунту за допомогою стохастичних

математичних моделей. International scientific-practical conference “Science, education, technology and society: global trends and regional aspects”: conference proceedings (Tampere, Finland, January 9, 2025). Tampere, Finland: Scholarly Publisher ICSSH, 2025. С. 60-61.

5. Gorbatyuk Ie.V., Mishchuk D.O., Komotska S.Ju. Stochastic mathematical model ground. Proceedings of the III International Scientific and Theoretical Conference “Current scientific goals, approaches and challenges”. January 17, 2025. Riga, Republic of Latvia: International Center of Scientific Research. P. 125-126. <https://doi.org/10.36074/scientia-17.01.2025>.

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR SHORT-TERM FORECASTING OF ROAD ACCIDENT RATES

¹Gorzelańczyk P., ²Jurkovič M., ³Sokolovskij E.

¹Stanislaw Staszic State University of Applied Sciences in Pila
(Poland)

²University of Zilina
(Slovakia)

³Vilnius Gediminas Technical University
(Lithuania)

Introduction. Traffic accidents remain one of the most serious global challenges in the areas of traffic safety and public health. According to the World Health Organization, approximately 1.3 million people die each year as a result of traffic accidents, and the economic losses from these events are extremely significant. Under these conditions, improving the accuracy of accident rate forecasting becomes critical for developing effective preventive measures and intelligent road safety management systems.

Traditional statistical forecasting methods have limited capabilities for capturing the nonlinear temporal dependencies and seasonal fluctuations characteristic of accident dynamics. In contrast, modern approaches based on artificial intelligence methods, particularly artificial neural networks, provide significantly greater flexibility and predictive power when analyzing complex transportation systems. The rapid development of intelligent transportation infrastructure and digital monitoring technologies creates the conditions for the practical integration of neural network forecasting models into road traffic safety management systems.

Research relevance. The relevance of the study is determined by several interconnected factors:

- increasing requirements for transportation safety management;
- growing availability of traffic statistical datasets;
- development of intelligent transportation systems;
- necessity for accurate short-term forecasting tools;
- growing implementation of artificial intelligence methods in transportation analytics.

The proposed forecasting framework enables identification of long-term accident trends, seasonal fluctuations, and periods of increased transportation risk while maintaining high forecasting accuracy.

Objective of the study. The objective of this study is to evaluate the effectiveness of multilayer perceptron neural networks for short-term forecasting of road accidents using monthly statistical data from Poland for the period 2001–2021.

The research focuses on:

- identification of seasonal patterns in accident dynamics;
- optimization of neural network architecture;
- comparative analysis of alternative data partitioning schemes;
- evaluation of forecasting accuracy;
- development of predictive models for intelligent transportation safety systems.

Particular attention is devoted to improving model generalization capability and minimizing forecasting error under dynamically changing transportation conditions. The obtained forecasting models may serve as analytical tools for proactive traffic safety management and transportation risk mitigation.

Main material. The forecasting framework is based on multilayer perceptron neural networks designed for nonlinear time-series analysis of monthly road accident statistics. The proposed methodology combines seasonal time-series analysis, neural-network optimization, and comparative evaluation of different training configurations.

The time-series forecasting problem was formalized as:

$$\hat{y}_{t+h} = f(y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-p+1}), \quad h \in N, \quad (1)$$

where: h - represents the forecasting horizon; p - denotes the number of lags; θ is the vector of neural-network parameters; $f(\cdot)$ corresponds to the nonlinear function approximated by the neural network.

The study utilized multilayer perceptron architectures consisting of 12 input neurons, hidden layer and single output neuron.

$$y_k = \phi\left(\sum_{j=1}^m w_{kj} \cdot \sigma\left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + b_j\right) + c_k\right), \quad (2)$$

where x_i are input variables; v_{ji} and w_{kj} are network weights; b_j and c_k are biases;

$\sigma(\cdot)$ is the hidden-layer activation function; $\phi(\cdot)$ is the output activation function.

$$J(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2, \quad (3)$$

where: y_t denotes the observed value; $\hat{y}_t$ denotes the predicted value; N is the number of observations.

The neural-network training process was performed using the BFGS optimization algorithm. Two alternative data partition schemes were investigated:

- 70–15–15;
- 80–10–10.

A comparative analysis demonstrated that the 70–15–15 configuration provided higher forecasting accuracy and improved model generalization capability. The optimal neural-network architecture corresponded to the MLP 12-8-1 model, which achieved a minimum forecasting error of 1.27%.

Table 1 — Optimal neural network configurations

Configuration	Architecture	MPE
70–15–15	MLP 12-8-1	1.27%
80–10–10	MLP 12-4-1	1.85%

The obtained results confirmed the ability of neural networks to reproduce both long-term decreasing trends and pronounced seasonal fluctuations in traffic accident dynamics. Peak accident values remained concentrated during summer months due to increased transportation intensity and population mobility. At the same time, minimum accident values were characteristic of winter periods.

Figure 1 illustrates the projected dynamics of road accidents in Poland based on the optimized multilayer perceptron neural network model. The obtained forecasting results confirm the continuation of the long-term downward trend in accident rates while preserving pronounced seasonal fluctuations.

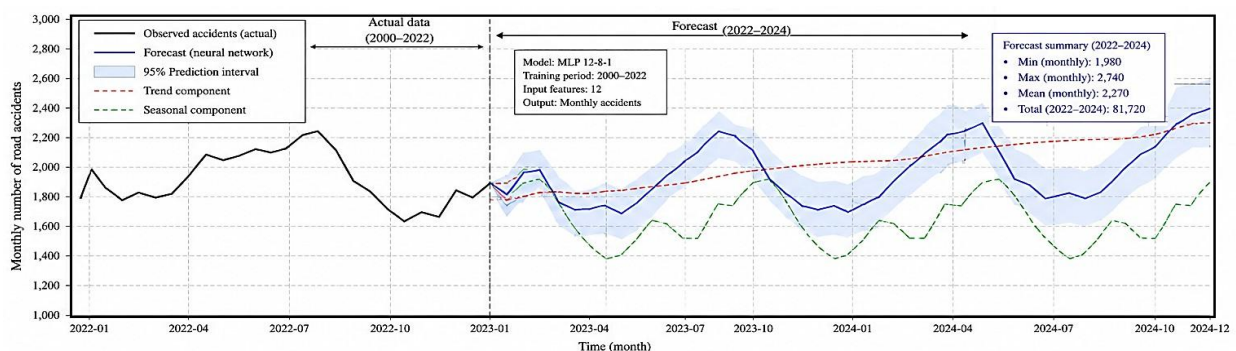


Figure 1 — Neural-network forecasting of road accident dynamics in Poland (2022–2024)

Forecasted monthly accident dynamics obtained using the optimized MLP 12-8-1 neural network architecture. The figure illustrates historical accident observations, forecast intervals,

seasonal fluctuations, and long-term trend evolution. The obtained results confirm preservation of pronounced seasonal patterns together with a gradual long-term decrease in accident rates.

The additive decomposition (Fig. 2) demonstrates the separation of the forecasting model into trend, seasonal, and residual components. The results confirm stable seasonal cyclicity and limited residual variance, indicating satisfactory predictive stability of the developed neural-network model.

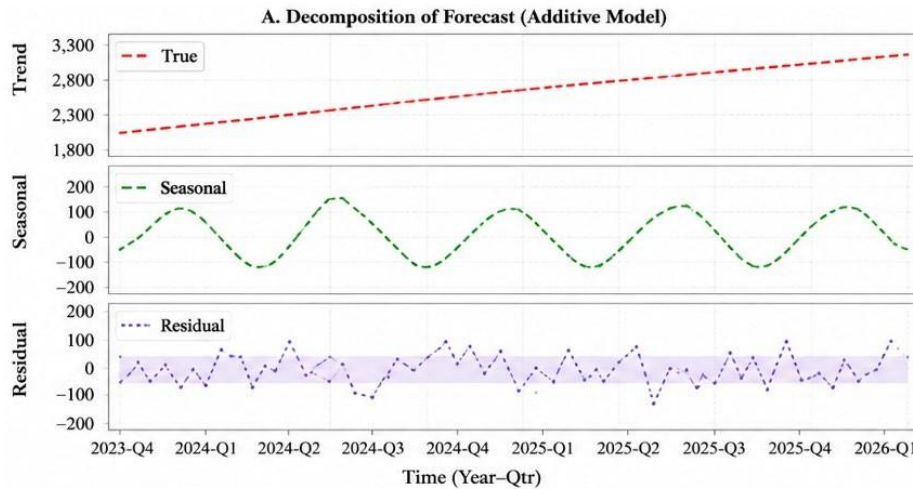


Figure 2 — Additive decomposition of forecasting components and residual analysis

The developed neural-network architecture successfully reproduces nonlinear temporal dependencies and seasonal components of the analyzed time series. The forecasting results demonstrate the practical applicability of artificial intelligence methods for intelligent transportation safety systems and decision-support platforms.

Conclusions. The conducted study confirmed the effectiveness of multilayer perceptron neural networks for short-term forecasting of road accidents. The developed forecasting framework successfully reproduces seasonal fluctuations and long-term trends in accident dynamics.

The optimal MLP 12-8-1 architecture achieved a minimum forecasting error of 1.27%, demonstrating high predictive accuracy and generalization capability. The obtained results confirm the feasibility of integrating neural-network forecasting models into intelligent transportation safety systems and decision-support platforms.

The proposed methodology may support:

- proactive traffic safety management;
- transportation risk assessment;
- resource allocation optimization;
- preventive safety planning;
- intelligent transport monitoring systems.

The developed analytical framework provides a practical tool for improving transportation safety management under dynamically changing traffic conditions. The proposed forecasting framework may serve as a basis for future integration of artificial intelligence methods into intelligent transportation management systems.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВІАЦІЙНОГО СИНХРОННОГО БЕЗКОНТАКТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Єнчев С. В., Гобатюк Т. П.

*Державний університет «Київський авіаційний інститут»
(Україна)*

Вступ. Розвиток електрифікованих комплексів повітряних суден (ПС) призводить до збільшення споживачів електричної енергії. Наразі практичне все бортове обладнання ПС є споживачем електричної енергії. Разом з цим, підвищується встановлена потужність обладнання, що призводить до загального збільшення енергоспоживання ПС. Одночасно зростають вимоги до якості електричної енергії. Система електропостачання (СЕР) ПС відноситься до авіаційного обладнання й повинна забезпечувати ефективне і безпечне енергопостачання систем ПС за різноманітних зовнішніх збурень при якості електроенергії, що відповідає вимогам ДСТУ ISO 1540:2018 Аерокосмічні системи, характеристика бортових повітряних електричних систем [1].

Актуальність дослідження. Одним із важливих напрямів розвитку авіації є перехід до концепції літака з більш / повністю електрифікованим обладнанням (МЕА / АЕА), під яким розуміється літак із єдиною централізованою системою електропостачання, що забезпечує енергетичні потреби літака.

Постановка задачі. На сучасних ПС використовується цифрове та радіоелектронне обладнання, що характеризується імпульсними режимами роботи, які негативно впливають на якість електричної енергії: збільшується час перехідних процесів, збільшуються провали та викиди при комутації [2]. У авіаційних СЕР змінного струму широке застосування отримали безконтактні синхронні генератори з обертовими випрямлячами, в яких використовуються регулятори напруги за відхиленням. Перспективним є впровадження комбінованого регулювання напруги: за відхиленням і збуренням [2, 3], з використанням цифрових засобів керування. Цифрові регулятори мають ряд суттєвих переваг, що полягають у вищій точності, завадостійкості, можливості реалізації складних законів керування, перебудові структури, появи можливості побудови адаптивних регуляторів з елементами штучного інтелекту.

Використання регуляторів напруги з нечіткою логікою [6-9] і нейронними мережами [4, 5] для синхронного генератора дозволяє покращити динаміку процесів регулювання напруги, зменшити час перехідних процесів, зменшити провали та викиди напруги при комутації навантаження. Використання комбінованого інтелектуального регулятора авіаційного енерговузла змінного струму на базі безконтактного синхронного генератора обмежене відсутністю математичних моделей для аналізу процесів регулювання напруги в статичних і динамічних режимах та експериментальних досліджень, у тому числі імітаційного моделювання.

Результати досліджень. Математична модель авіаційного синхронного безконтактного генератора (АСБГ) з нейромережевим регулятором. АСБГ складається з трьох електричних машин [2] (рис.):

1. Основного синхронного генератора, що являє собою синхронну машину з обертовим явнополюсним індуктором, обмотка збудження якого живиться постійним струмом через обертовий випрямляч від шестифазної регульованої обмотки збудження (РОЗ). Індуктор генератора, випрямлячі та РОЗ розміщені на одному валу. Живлення ОЗБ здійснюється постійним струмом через регулятор напруги БРЗУ від РОП підбуджувача, постійний магніт якого розміщено на роторі. РОГ АСБГ розрахована на номінальну напругу 200/115 В і частоту 400 Гц.

2. Збуджувач — шестифазний СГ з вбудованим однонапівперіодним випрямлячем. Збудження електромагнітне здійснюється випрямленим струмом підбуджувача.

3. Підбуджувач являє собою трифазний магнітоелектричний генератором з ротором

типу «зірочка».

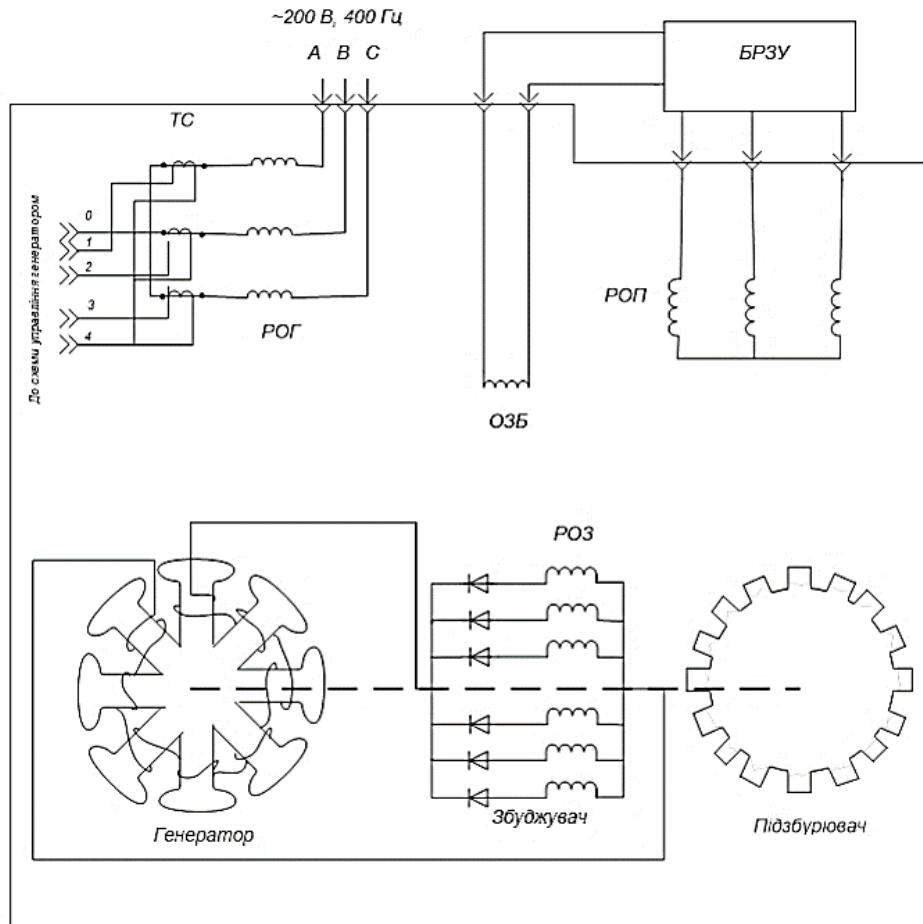


Рисунок 1 — Схема авіаційного синхронного безконтактного генератора

На рис. 1 використано позначення: БРЗУ — блок регулювання, захисту та управління; РОП — робоча обмотка підбуджувача; РОЗ — робоча обмотка збуджувача; ОЗБ — обмотка збудження (збуджувача); РОГ — робоча обмотка генератора; ТС — трансформатори струму.

Напруга АСБГ без врахування нейромережевого регулятора напруги (НМРН) має вигляд [2, 3]:

$$u_G = K_1 u_{q0} \left[(K_2 - 1) e^{-\frac{t}{T'_{EG}}} + 1 \right], \quad (1)$$

де $K_1 = \frac{Z_q Z}{x_d x_q + r^2}$; $K_2 = \frac{x_d x_q + r^2}{x'_d x_q + r^2}$; x'_d — синхронний перехідний індуктивний опір СГ за подовжньою віссю; x_d — синхронний індуктивний опір СГ за подовжньою віссю; x_q — синхронний індуктивний опір СГ за поперечною віссю; u_{q0} — початкова напруга в НМРН; T'_{EG} — постійна часу обмотки збудження СГ за замкнутого статора; Z — повний опір навантаження; Z_q — повний опір навантаження за поперечною віссю; r — активний опір навантаження.

Закон зміни напруги на затискачах СГ за відсутності регулювання визначається параметрами генератора, а саме, індуктивними опором за подовжньою і поперечною осями, постійною часу обмотки збудження СГ і параметрами навантаження. Напруга АБСГ після увімкнення навантаження не повернеться до свого початкового рівня, якщо не відбудеться збільшення струму збудження. Збільшення струму збудження в СГ у результаті автоматичного збільшення сигналу керування НМРН при вмиканні навантаження [5]. Зміна

напруги СГ під дією керувального сигналу регулятора з використанням нейронної мережі визначається виразом [4].

$$u_{G2} = \frac{z_q z^* z_{qB} z_B U_{NN}}{(x_d x_q + r^2)(x_{dB} x_{qB} + r_B^2)} \left[1 - \frac{T'_{EG} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{EG}}} + T'_{EE} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{EE}}}}{(T'_{EG} - T'_{EE})} \right], \quad (2)$$

де U_{NN} — керувальний сигнал НМРН.

Приймаємо

$$\frac{z_{qB} z_B}{x_{dB} x_{qB} + r_B^2}. \quad (3)$$

Тоді, з врахуванням (1) і (3) рівняння (2) приймає вигляд:

$$u_{G2} = K_1 K_3 U_{NN} \left[1 - \frac{T'_{EG} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{EG}}} + T'_{EE} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{EE}}}}{(T'_{EG} - T'_{EE})} \right] = K_1 K_3 U_{NN} F(t), \quad (4)$$

де

$$F(t) = 1 - \frac{T'_{EG} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{EG}}} + T'_{EE} \cdot e^{-\frac{t}{T'_{EE}}}}{(T'_{EG} - T'_{EE})}. \quad (5)$$

Для визначення залежності напруги на затисках АБСГ з НМРН після увімкнення навантаження складемо вирази (1) і (4)

$$U_G = U_{G1} + U_{G2} = F(t) = K_1 u_{q0} \left[(K_2 - 1) e^{-\frac{t}{T'_{EG}}} + 1 \right] + K_1 K_3 U_{NN} F(t). \quad (6)$$

Висновки. З виразів (1), (4) і (6) випливає, що в АБСГ з НМРН швидкість зростання напруги СГ визначається постійними часами кіл збудження збуджувача T'_{EE} та генератора T'_{EG} . Статичний режим отримаємо при $t \rightarrow \infty$ виразу (6)

$$U_G = K_1 K_3 U_{NN}. \quad (7)$$

Значення сигналу керування нейронної мережі U_{NN} за заданого типу та значенні навантаження можна реалізувати у вигляді навчальної вибірки для НМРН.

ЛІТЕРАТУРА

1. ДСТУ ISO 1540:2018 Аерокосмічні системи. Характеристика бортових повітряних електричних систем (ISO 1540:2006, IDT).
2. Захарченко В.П., Єнчев С.В., Ільєнко С.С. Електропостачання повітряних суден. Навчальний посібник. К.: НАУ, 2021. 244 с.
3. Єнчев С.В., Захарченко В.П., Гобатюк Т. П. Нейромережевий регулятор напруги авіаційного енерговузла змінного струму. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. 2022. №2. С.53–59.
4. Єнчев С. В., Таку С. О. Розробка адаптивного нейромережевого регулятора інтелектуальної системи керування авіаційним двигуном. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. № 6. т. 29 (68). С. 34–39.
5. Park J.W., Harley R.G. Critic Based Neurocontrol for Synchronous Generator in Power System Using MLP/RBF Neural Networks. Industry Applications, IEEE Transactions on Vol.39, Issue 5, Sept. 2003, pp. 1529–1540.

ІНТЕГРАЦІЯ ЗНАНЬ У ТРАНСПОРТНИХ ГІС НА ОСНОВІ ОНТОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ

¹Касім М.М., ²Касім А.М.

¹Національний університет біоресурсів і природокористування України
(Україна)

²Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України
(Україна)

Вступ. Сучасні транспортні мережі характеризуються високою складністю, динамічністю та значними обсягами різнорідних даних, що у реальному часі надходять з різних джерел: геоінформаційних систем, навігаційних сервісів, сенсорних мереж, систем моніторингу транспорту та логістичних платформ [1]. Ефективне функціонування транспортно-логістичних систем значною мірою залежить від можливості інтеграції цих даних у єдиний інформаційний простір.

Традиційні транспортні геоінформаційні системи (ГІС) орієнтовані переважно на зберігання (накопичення), візуалізацію та просторовий аналіз базових і тематичних геоданих, проте вони мають обмежені можливості щодо семантичної інтеграції наявних даних і знань та автоматизованого логічного виведення нових знань. Унаслідок цього виникають проблеми неоднорідності даних, дублювання інформації, складності взаємодії між різними розподіленими інформаційними підсистемами та недостатньої адаптивності транспортних сервісів до семантики предметної області (ПрО) [2–6].

Одним із перспективних напрямів вирішення зазначених проблем є використання онтологічних моделей, які забезпечують формалізоване представлення знань про предметну область, встановлення семантичних зв'язків між об'єктами (концептами ПрО) та підтримку механізмів логічного виведення [5]. Онтологічний підхід дозволяє інтегрувати геопросторові, транспортні та логістичні дані в єдину семантичну структуру, придатну для інтелектуального аналізу та підтримки прийняття рішень.

Метою роботи є розроблення підходу до інтеграції знань у транспортних ГІС на основі онтологічних моделей для забезпечення семантичної узгодженості різнорідних даних та підтримки інтелектуального аналізу транспортних процесів.

Проблеми інтеграції знань у транспортних ГІС. Транспортні ГІС працюють із великою кількістю різнорідних (гетерогенних) даних, серед яких:

- геопросторові дані;
- транспортні мережі;
- GPS-треки;
- дані різноманітних IoT-сенсорів;
- логістичні параметри;
- поточні інциденти (події);
- інформація про рухомі об'єкти (транспортні засоби).

Ці дані можуть мати різні формати, структури та рівні деталізації, в результаті чого мають місце проблеми семантичної несумісності, складності автоматизованого аналізу та відсутності єдиного простору представлення знань.

Класичні реляційні моделі даних [6] не забезпечують достатньої гнучкості для опису складних транспортних процесів і взаємозв'язків між об'єктами транспортної інфраструктури.

Онтологічний підхід до інтеграції знань. Розроблена онтологія формалізує предметну область транспортної ГІС через множину концептів, атрибутів та відношень:

$$O = \langle C, R, A, I \rangle,$$

де: C — множина класів об'єктів (рис. 1, 2); R — множина відношень між цими об'єктами (табл. 1); A — множина атрибутів, властивих об'єктам (табл. 2); I — множина екземплярів об'єктів як конкретних індивідів онтології.

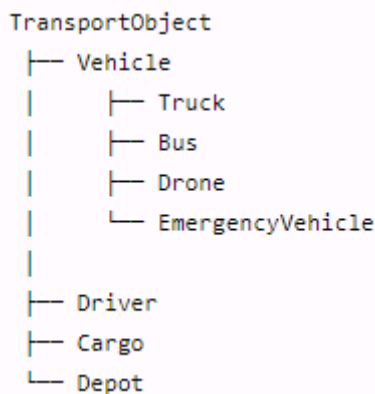


Рисунок 1 — Розташування онтологічних концептів, що відповідають картографічним об'єктам інформаційного шару «Транспортні об'єкти»

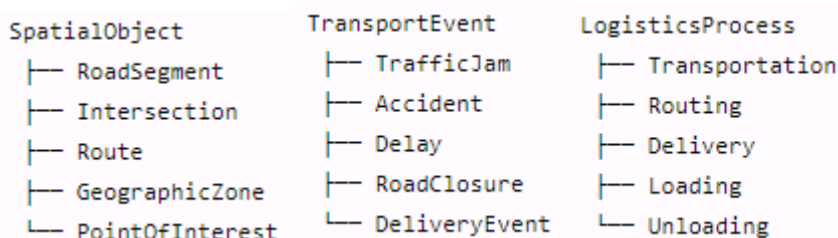


Рисунок 2 – Ієрархічна структура онтологічних класів «Просторові об'єкти», «Транспортні події», «Логістичні процеси»

Таблиця 1 — Основні відношення (*Object Properties*) між об'єктами онтології

Відношення	Домен	Діапазон	Опис
hasRoute	Vehicle	Route	транспорт має маршрут
passesThrough	Route	RoadSegment	маршрут проходить через сегмент
locatedIn	Object	GeographicZone	розташування
carries	Vehicle	Cargo	перевезення вантажу
assignedTo	Driver	Vehicle	призначення водія
affectedBy	Route	TransportEvent	вплив події
connectedTo	RoadSegment	RoadSegment	топология дороги

Таблиця 2 — Атрибути об'єктів онтології (*Data Properties*)

Атрибут	Тип
latitude	float
longitude	float
speed	float
capacity	integer
cargoWeight	float
travelTime	float
fuelConsumption	float
timestamp	datetime

Для транспортної ГІС основними концептами залежно від її прикладних задач виступають: транспортний засіб (*Vehicle*); маршрут (*Route*); сегмент маршруту (*RoadSegment*); транспортна подія (*TransportEvent*); логістичний об'єкт (*LogisticsProcess*); географічна зона (*GeographicZone*) тощо.

Геопросторові дані інтерпретуються як екземпляри онтологічних класів. Наприклад, дорожній сегмент → *RoadSegment*; транспортний маршрут → *Route*; затор → *TrafficJam*;

транспортний засіб $\rightarrow$ *Vehicle*. Тобто кожен онтологічний клас – це окремий інформаційний прошарок на карті ГІС. Запропонований підхід передбачає інтеграцію геопросторових та семантичних (онтологічних) даних як поєднання традиційних ГІС-шарів із семантичним описом об'єктів [3, 4], що входять до складу кожного інформаційного шару. Це дає змогу:

- здійснювати семантичний пошук;
- виконувати логічне виведення;
- аналізувати взаємозв'язки між об'єктами (процесами, подіями);
- інтегрувати дані різних транспортних сервісів.

Розширена формальна модель онтології має вигляд:

$$O = \langle C, R, F, T, I, G \rangle.$$

Тут: C – множина класів; R – множина відношень; F – множина функцій інтерпретації; T – множина аксіом, які використовуються в правилах виведення для визначення істинних тверджень; I – множина екземплярів; G – онтологічний граф, що задає ієрархію класів.

Така онтологічна модель дозволяє описувати:

- структуру транспортної мережі;
- логічні зв'язки між об'єктами;
- просторові та часові характеристики;
- контекст транспортних подій [4–6].

Семантичний механізм логічного виведення. Важливою перевагою онтологічного підходу є підтримка механізмів логічного виведення (*reasoning*) [5]. На основі логічних правил система може автоматично виявляти нові знання.

Наприклад:

IF *Route affectedBy TrafficJam*
THEN *Route is Risky*,

або:

IF *Vehicle capacity < cargoWeight*
THEN *Vehicle is Overloaded*.

Подібні правила дозволяють:

- автоматично виявляти ризиковані маршрути;
- аналізувати транспортні події;
- підтримувати прийняття рішень;
- адаптувати маршрути до ситуації в реальному часі.

Інтеграція з транспортними задачами оптимізації. Онтологічна модель може бути інтегрована з математичними моделями маршрутизації, зокрема TSP, MTSP та VRP. У цьому випадку семантичні правила можуть використовуватись для:

- формування обмежень оптимізаційної моделі;
- зміни ваг графа;
- виключення недопустимих маршрутів;
- адаптації моделей до поточної ситуації.

Для реалізації оптимізаційних моделей можуть застосовуватись мова моделювання AMPL, середовища оптимізаційних солверів Gurobi та IBM ILOG CPLEX з NEOS-сервера.

Архітектура транспортної ГІС. Запропонована архітектура включає:

- ГІС-підсистему;
- онтологічне сховище знань;
- модуль семантичного аналізу;
- механізм логічного виведення;
- модуль оптимізації маршрутів.

Така структура інтегрованої системи дозволяє забезпечити не лише інтеграцію та семантичну інтероперабельність різнорідних даних, а й їх контекстно-залежний аналіз знань та підтримку інтелектуальних транспортних сервісів.

Результати дослідження. Ключові досягнення визначено наступним чином:

- проаналізовано проблеми інтеграції знань у транспортних ГІС;

- обґрунтовано доцільність використання онтологічного підходу;
- запропоновано структуру транспортної онтології;
- розроблено концептуальну модель інтеграції ГІС та онтологій;
- розглянуто підходи до семантичного аналізу транспортних процесів;
- показано можливість інтеграції онтологічних моделей із задачами оптимізації маршрутів.

Запропонований підхід дозволяє підвищити рівень інтелектуалізації транспортних ГІС та забезпечити ефективну інтеграцію різномірних (транспортних) даних.

Висновки. У роботі досліджено тему інтеграції знань у транспортних геоінформаційних системах на основі онтологічних моделей. Показано, що використання онтологій стосовно цих систем забезпечує:

- формалізоване представлення знань Про транспортної ГІС;
- семантичну інтеграцію гетерогенних даних;
- підтримку логічного виведення;
- підвищення ефективності аналізу транспортних процесів.

Запропонована концепція інтегрованої транспортної ГІС дозволяє поєднати геопросторові технології, семантичні моделі та методи оптимізації маршрутів у єдиній інтелектуальній системі.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на:

- інтеграцію поточкових даних у реальному часі;
- використання підходів, що базуються на графах знань;
- розроблення цифрових двійників транспортних систем;
- застосування методів штучного інтелекту та машинного навчання для адаптивного управління транспортними процесами.

ЛІТЕРАТУРА

1. Касім А.М., Касім М.М. Багатокритеріальна модель оптимізації маршрутів у морській логістиці. Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT–2025): збірник матеріалів XVI Міжнародної науково-практичної конференції (28–30 травня 2025, Одеса). Одеса: Херсонська державна морська академія, 2025. С. 226–229.
2. Васюхін М.І., Касім А.М., Бень А.П., Касім М.М. Про точність визначення місцеположення рухомих об'єктів за радіолокаційними даними та комплекс програм прецизійної візуалізації оточуючої обстановки. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2018. № 2 (19). С. 220–233.
3. Касім А. Функціональні модулі та алгоритми синтезу цифрового зорового образу динамічної морської ситуації в прецизійній геоінформаційній системі реального часу. Міжнародний науково-технічний журнал «Проблеми керування та інформатики». 2025. 70 (2). С. 75–90. <https://doi.org/10.34229/1028-0979-2025-2-7>
4. Палагін О.В., Касім А.М., Касім М.М. Декомпозиційні методи системного аналізу в оптимізації та коопераційній еволюції інтерактивних геоінформаційних сервісів. Кібернетика та системний аналіз. 2025. 61 (3). С. 46–64.
5. Касім А.М., Касім М.М. Онтологічне моделювання бази знань інтелектуальної ГІС цифрового землеробства. Кібернетика та комп'ютерні технології. 2025. 3. С. 79–90. <https://doi.org/10.34229/2707-451X.25.3.7>
6. Касім А.М., Касім М.М., Ясєнев С.О. Специфіка використання геопросторових даних для задач аеронавігації. Наукоємні технології. 2016. 29 (1). С. 16–22, <https://doi.org/10.18372/2310-5461.29.10087>

UDC 629.5.015.1:004.8

EXCEL AND AI INTEGRATION FOR SHIP STABILITY CALCULATIONS

Kyrychenko K.V., Shevchenko M.V., Panchenko M.V.

*Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)*

Introduction. In modern maritime navigation, ship safety plays a key role, and stability is one of the main parameters that determine the ability of a ship to resist capsizing. For many years, traditional tools, such as Microsoft Excel, have been widely used to perform relevant calculations. Its convenience, accessibility, and flexibility have made it a standard in the practice of marine engineers and the educational process.

However, with the development of digital technologies, more innovative approaches have emerged, in particular, artificial intelligence (AI) methods. Due to its ability to self-learn, analyze large amounts of data, and detect complex patterns, AI is gradually being integrated into marine engineering, including ship stability calculations. As Yu Yu Ao, Yunbo Li, Jiaye Gong, Shaofan Li note, «a neural network with many inputs can provide accurate real-time prediction of ship resistance, with an average error of less than 4%» [1].

It is advisable to study not only the individual capabilities of traditional and new approaches, but also their integration. The combination of tools such as Excel with modern AI algorithms opens up new horizons for automating stability calculations. This allows you to increase the accuracy, speed and efficiency of engineering solutions, while maintaining the convenience and accessibility of basic tools.

Relevance of research. It is advisable to study not only the individual capabilities of traditional and new approaches, but also their integration. The combination of tools such as Excel with modern AI algorithms opens up new horizons for automating stability calculations. This allows you to increase the accuracy, speed and efficiency of engineering solutions, while maintaining the convenience and accessibility of basic tools.

Formulation of the problem. For a comparative study of the traditional method of ship stability calculations using Microsoft Excel and the innovative approach based on artificial intelligence, it is necessary to perform an analytical comparison of the capabilities of both methods in terms of calculation accuracy, speed of operations and ease of use for engineers. In addition, it is advisable to integrate Excel and artificial intelligence technologies, in particular, use Excel for pre-processing and structuring data, and apply artificial intelligence algorithms for forecasting, analysis and optimization of ship stability parameters.

Research results. Microsoft Excel is one of the most widely used tools for engineering calculations, including ship stability analysis. Its popularity is due to its accessibility, flexibility, and data visualization capabilities that allow modeling various operational scenarios. Using Excel, engineers can calculate metacentric height (GM), construct stability diagrams and righting lever (GZ) curves, analyze the effects of cargo and ballast on ship stability, and assess a ship's compliance with International Maritime Organization (IMO) criteria.

One example of Excel's use for stability calculations is ShipSafe — Trim and Stability Calculator. This is an Excel-based calculator designed for marine cargo ships and pontoon barges. The program allows you to calculate the ship's draft and trim, assess stability according to IMO requirements, and perform quick checks during loading and unloading. Due to the sufficient accuracy of the results, this tool is widely used for planning ship operations.

Another example is the TheNavalArch platform, which offers over 100 Excel-based calculators for various areas of marine engineering, including ship stability calculations. These calculators allow you to determine hydrostatic parameters, analyze stability under various operating conditions, and check compliance with regulatory requirements. The practical application of such tools confirms their accuracy, ease of use, and compliance with modern

requirements of classification societies.

Using Microsoft Excel has a number of advantages, including accessibility, ease of use, flexibility in creating and modifying calculation models, as well as the ability to quickly analyze and visualize results. At the same time, there are certain limitations, including the lack of automated checks of complex regulatory requirements, limited capabilities for modeling emergency situations or ship hull damage, and a significant dependence of the accuracy of the results on the correctness of the entered data and the formulas used.

As an example of using Excel for stability calculations, we can consider the problem of constructing a ship's displacement curve based on given values of displacement and average draft. Using tabular data, the program builds a displacement curve, after which the displacement at an average draft of 3.30 m is determined. Next, the new average draft is calculated after loading 1278 tons of cargo and unloading 310 tons, and the approximate value of TPC at an average draft of 3.8 m is determined. Such calculations demonstrate the effectiveness of using Excel to perform basic engineering tasks related to the stability and loading of ships.

In this task, it was necessary to determine the amount of cargo unloaded and to construct a diagram of the dependence of displacement on draft. Having constructed the diagram, we observe that it has a nonlinear nature, therefore, it is impossible to calculate the necessary values by direct correlation - it is necessary to use data obtained directly from the graph.

To determine the amount of cargo unloaded, the values read from the diagram were used: the initial displacement was 4841 tons, the final - 1949 tons. In addition, it is known that at the final stage an additional 200 tons of cargo were loaded. To calculate the mass of the unloaded cargo, we subtract the final displacement from the initial displacement and add the loading volume: $4841 - 1949 + 200 = 3092$ tons. Therefore, 3092 tons of cargo were unloaded.

Artificial intelligence opens up new possibilities in the field of ship stability analysis, allowing to take into account complex nonlinear relationships between ship parameters and process large amounts of data. Machine Learning (ML) and Deep Learning (DL) methods are used to predict metacentric height (GM) in real time, assess the stability of damaged ships, model ship motion in rough sea conditions, and optimize cargo distribution to ensure shipping safety. The use of artificial intelligence technologies allows to increase the speed of information processing and adapt the results of calculations to changing ship operating conditions.

One example of the application of artificial intelligence is a study published in the journal *Ocean Engineering*, which proposed a method for predicting metacentric height for Ro-Ro passenger ships using an optimized radial basis function neural network (RBFNN) [2]. The results obtained demonstrated high prediction accuracy in various ship operating conditions. Another example is the study presented in *Complex & Intelligent Systems*, which developed a combined approach based on several machine learning models for predicting ship stability. This method provided low mean square error and high level of accuracy of results [3].

The main advantages of using artificial intelligence in stability calculations include the ability to process large data sets, taking into account complex relationships between ship parameters, the possibility of real-time forecasting and adaptation to changing operating conditions. At the same time, there are certain limitations, including the need to use a large amount of qualitative data for training models, the complexity of interpreting deep learning results and the need for significant computing resources.

As part of the study, ChatGPT was used to implement artificial intelligence methods in ship stability calculations. In addition, the use of ChatGPT contributed to the automation of explanatory comments to graphs and calculation tasks, which allowed to increase the efficiency of processing the obtained results.

This solution considers how artificial intelligence performed calculations and constructed a graph. The diagram it constructed turned out to be linear, which indicates the presence of an error, because in the conditions of the problem, the dependence of displacement on draft is nonlinear. Thus, the construction of a straight line is erroneous and does not allow the correct use of the ratio for calculations.

In addition, when performing calculations, artificial intelligence made a significant arithmetic error, which caused the result to deviate from the correct one by 400 tons. This is a critical error, which in real conditions of vessel operation can have serious consequences.

Although the AI did not make any mistakes when reading the values from the graph, it incorrectly took into account the loaded cargo when performing the calculations: instead of adding 200 tons to the difference between the initial and final displacement, the model subtracted it together with the unloading volume, obtaining the result $4841 - 1949 - 200 = 2692$ tons. This is a conceptual error, which in practical conditions can lead to critical situations, in particular, violation of the stability of the vessel or even accidents. That is why the use of innovative technologies requires mandatory verification of the obtained results by specialists.

Conclusions. The study found that traditional methods for calculating ship stability, including Microsoft Excel, remain accessible and convenient for basic calculations, but have limitations when modeling complex situations and depend on the accuracy of the input data. The use of AI and machine learning allows you to increase the accuracy of calculations, process large amounts of data and predict stability in real time, but such methods can also be error-prone and require careful verification of the results. The comparison showed that the choice of approach depends on the complexity of the problem, since for simple calculations it is advisable to use traditional methods, while for complex operating conditions the use of artificial intelligence technologies is promising.

REFERENCES

1. Yu Ao, Yunbo Li, Jiaye Gong, Shaofan Li. Artificial Intelligence Design for Ship Structures: A Variant Multiple-Input Neural Network-Based Ship Resistance Prediction. *J. Mech. Des.* Sep 2022, 144(9): 091707 (13 pages) <https://doi.org/10.1115/1.4053816>
2. Lijun Wang, Shenghao Liao, Sisi Wang, Baozhu Jia, Jianchuan Yin, Ronghui Li. Real-time prediction of metacentric height of ro-ro passenger ships in Qiongzhou strait based on improved RBF neural network, *Ocean Engineering*. Volume 312, Part 3, 2024, 119067. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119067>.
3. Jiang, C., Xiang, X. & Xiang, G. A joint multi-model machine learning prediction approach based on confidence for ship stability. *Complex Intell. Syst.* 2024, 10, 3873–3890. <https://doi.org/10.1007/s40747-024-01363-w>

МЕТРОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТРАНСПОРТУ

¹Комарова Г.Л., ²Приміський І.В., ³Лалазарова Н.О., ⁴Афанасьєва О. В.

¹Український державний університет залізничного транспорту
(Україна)

²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
(Україна)

³Харківський національний автомобільно-дорожній університет
(Україна)

⁴Харківський національний університет радіоелектроніки
(Україна)

Вступ. Інтеграція транспортної мережі України до європейського транспортного простору вимагає не лише оновлення автопарку, а й впровадження жорстких нормативів інтелектуального контролю викидів. Ефективність сучасних ресурсозберігаючих технологій прямо залежить від якості та оперативності вимірювальної інформації. Будь-яка похибка у визначенні концентрації забруднюючих речовин призводить до некоректної генерації керуючих сигналів у системах автоматичного регулювання двигуном (ECU), що фактично нівелює всі зусилля з енергозбереження [1]. У цьому контексті забезпечення метрологічної достовірності та автоматизація повірочних процедур стають базовими умовами надійності транспортних систем [2].

Актуальність. Основна складність полягає в тому, що вимірювальні процеси на рухомих об'єктах транспорту протікають в екстремальних умовах: за наявності інтенсивних вібрацій, широкого спектра електромагнітних завад та нестабільних температурних режимів відпрацьованих газів. Традиційні методи періодичного лабораторного контролю не забезпечують необхідної оперативності. Розв'язання цієї проблеми вбачається в повній автоматизації вимірювальних ланцюгів на основі мікропроцесорної техніки, що дозволяє реалізувати адаптивну фільтрацію сигналів, метрологічний самоконтроль та інтелектуальний аналіз даних безпосередньо під час руху [3].

Постановка проблеми. Для практичної реалізації стратегії безперервного моніторингу пропонується архітектура вимірювального циклу, що базується на чотирьох інтегрованих рівнях (рис. 1), де кожен етап спрямований на мінімізацію сумарної похибки:

1. Рівень сенсорної адаптації: застосування інтелектуальних сенсорів із вбудованими модулями термокомпенсації та стабілізації живлення, що дозволяє нівелювати вплив агресивного середовища безпосередньо в точці відбору проби.
2. Рівень цифрової обробки: впровадження алгоритмів рекурсивної фільтрації (зокрема, фільтра Калмана) для відокремлення корисного інформаційного сигналу від динамічних завад, викликаних нерівномірністю роботи циліндрів двигуна.
3. Рівень метрологічної верифікації (ядро системи): автоматичне порівняння характеристик датчиків із внутрішніми еталонними мітками в реальному часі. Це дозволяє здійснювати автоматичну корекцію чутливості та усувати часовий дрейф «нуля».
4. Рівень інтеграції: передача верифікованих даних до CAN-шини автомобіля для корекції паливоподачі в ECU, що забезпечує підтримку стехіометричного складу суміші та максимальну енергоефективність.

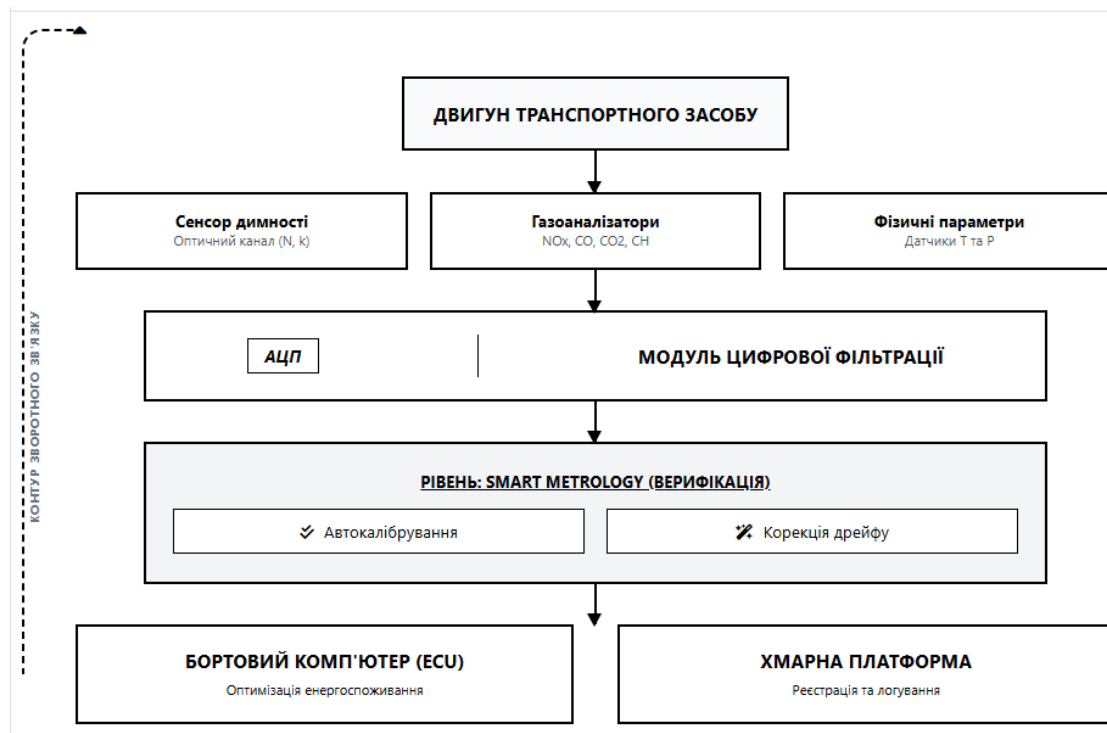


Рисунок 1 — Архітектура інтелектуальної системи контролю викидів з метрологічною верифікацією даних

Результати та обговорення. Особлива увага приділяється контролю димності, де надійність результатів базується на забезпеченні єдності таких метрологічних параметрів, як точність, збіжність та відтворюваність [4]. Використання оптичних методів вимірювання потребує суворого автоматизованого контролю чистоти лінз та стабільності ефективної бази пробігу світлового променя. Взаємозв'язок впроваджених метрологічних процедур із практичними показниками надійності наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 — Вплив метрологічної автоматизації на показники експлуатації транспортного засобу

Метрологічна процедура	Практична реалізація	Ефект для ресурсозбереження
Автоматичне калібрування	Використання внутрішніх еталонів та контрольних сумішей	Забезпечення точності налаштування (економія палива 3–5%)
Компенсація забруднення оптики	Алгоритмічна корекція інтенсивності випромінювання	Зниження частоти сервісного обслуговування приладів на 20%
Валідація в динамічних режимах	Проведення вимірювань за циклами RDE	Підвищення надійності діагностики циліндро-поршневої групи
Цифрова реєстрація даних	Ведення логів у хмарних сервісах	Об'єктивний аналіз екологічного сліду та відсутність штрафів

– Автоматичне калібрування: усуває похибку налаштування датчиків (зниження витрат палива на 3–5%).

– Компенсація забруднення оптики: алгоритмічне підсилення сигналу дозволяє

знизити частоту сервісних зупинок для чищення приладів на 20–25%.

– Валідація в динамічних режимах (RDE): використання циклів Real Driving Emissions підвищує точність діагностики стану паливної апаратури.

Сучасні норми Євро-6 вимагають детектування наднизьких концентрацій частинок, що стимулює перехід від стаціонарних стендів до мобільних систем PEMS (Portable Emissions Measurement Systems) які дозволяють проводити вимірювання в реальних умовах експлуатації [5]. Для легітимізації результатів лабораторії мають впроваджувати «Настанову з якості» згідно з ISO 17025 [6]. Впровадження концепції «Метрологія 4.0» дозволяє автоматизувати передачу логів у хмарні сховища з накладанням цифрового підпису, що гарантує неможливість фальсифікації екологічних даних та забезпечує повну трасованість до національних первинних еталонів [7].

Прецизійний контроль екологічних параметрів є інструментом ранньої діагностики. Підвищення вмісту сажі є маркером несправності форсунок, що дозволяє перейти до стратегії обслуговування «за станом». Це не лише подовжує ресурс двигунів на 15–20%, а й забезпечує стабільно низьке споживання енергоресурсів.

Висновки. Метрологічна оптимізація та автоматизація вимірювальних процесів є необхідним фундаментом для вирішення проблем надійності та енергозбереження на транспорті. Синхронізація технічних можливостей систем моніторингу з вимогами сучасних стандартів дозволяє забезпечити високу достовірність інформації, що є запорукою екологічної безпеки та економічної ефективності транспортних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Приміський І. В. Нормування викидів шкідливих речовин транспортними засобами та перехід до стандартів Євро. Східно-Європейський журнал передових технологій. 2014. № 4/11 (70). С. 4–10.
2. Про метрологію та метрологічну діяльність: Закон України від 05.06.2014 № 1314-VII. Відомості Верховної Ради України. 2014. № 30. Ст. 1008.
3. Приміський І. В. та ін. Автоматизація вимірювальних процесів у складних технічних системах. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2016. № 4. С. 72–78.
4. Комарова Г. Л., Кашпур А. П., Приміський І. В. Сучасні методи вимірювання димності та їх метрологічні аспекти. Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті: Матеріали 25 Міжнар. наук.-техн. семінару, 25–26 березня 2025 р. Київ: АТМ України, 2025. С. 53–56.
5. Giechaskiel B. et al. European Regulatory Framework and Particularities in Testing Real Driving Emissions (RDE) with PEMS. Sustainability. 2021. Vol. 13. № 11. P. 6052.
6. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2017. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT). [Чинний від 2018-01-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 24 с.
7. Hummel T. et al. Metrology for the Factory of the Future: Challenges and Opportunities in the context of Industry 4.0. Measurement. 2020. Vol. 164. 108044.

MATRIX APPROACH TO ANALYSIS AND VERIFICATION OF KOLMOGOROV CHARACTERISTIC EQUATIONS IN COMPLEX STOCHASTIC SYSTEMS

Kravets V.V., Hryshechkina T.S., Kravets V.I.

*Ukrainian State University of Science and Technology
(Ukraine)*

Introduction. Modern complex systems are characterized by a high level of uncertainty and a significant number of random processes that arise under the influence of external and internal factors. Markov chains and Kolmogorov differential equations are widely used for the mathematical description of such processes. Of particular relevance are the problems of analytical study of multidimensional stochastic models, in which the number of possible states of the system increases exponentially with the increase in the number of subsystems [1, 2].

One of the promising directions for solving the problem of multidimensionality is the use of matrix methods, which ensure compactness of the record, simplification of calculations and adaptation of mathematical models to computer implementation [3].

Relevance of research. During the analysis of complex technical, energy, economic and information systems, the problem of the so-called "curse of dimensionality" arises, when the complexity of mathematical models increases sharply with the increase in the number of system elements. This complicates obtaining accurate analytical solutions and their verification.

The use of asymmetric homogeneous Markov chains allows modeling the failure and recovery processes of autonomous subsystems in a complex system. However, the effectiveness of such an approach largely depends on the possibility of constructing and verifying analytical solutions to Kolmogorov's characteristic equations.

Therefore, it is relevant to develop methods for matrix representation of system states, formation of characteristic equations and verification of the obtained analytical results.

Problem statement. The aim of the research is to develop an approach to the analytical study of asymmetric homogeneous Markov chains for complex systems with an arbitrary number of autonomous subsystems and to verify the obtained solutions of Kolmogorov's characteristic equations.

To achieve the set goal, it is necessary to solve the following problems:

- form the sets of possible states of a complex system in matrix form;
- construct transition intensity matrices for Kolmogorov equations;
- reduce characteristic equations to algebraic equations of the appropriate order;
- obtain analytical expressions for the roots of characteristic equations;
- verify the obtained analytical solutions.

Research results. The paper considers a complex system consisting of independent autonomous subsystems, for which the intensities of failure and recovery flows are given. Each subsystem can be in two states: operational or non-operational.

Based on the asymmetric representation of possible states, transition intensity matrices $R^{(m)}$ are constructed for systems with different numbers of subsystems. It is shown that the characteristic Kolmogorov equations:

$$\det[R^{(m)} - vE^{(n)}] = 0, \quad (1)$$

can be presented in the form of algebraic equations, the order of which is determined by the number of possible states of the system:

$$\sum_{i=0}^n a_{n-i}^{(n)} v^{n-i} = 0. \quad (2)$$

Here, the coefficients $a_{n-i}^{(n)}$ are represented by symmetric determinants composed by the corresponding columns of the matrices $R^{(m)}$ and $-E^{(n)}$.

Analytical expressions of the roots of the characteristic equations are obtained through the parameters of the intensities of the failure and recovery flows. To check the correctness of the

solutions, the following were used:

- direct calculation of the characteristic determinants.
- application of Vieta's theorem.

The verification confirmed the correctness of the obtained analytical solutions for systems of different dimensions. The proposed approach allows to significantly simplify the analysis of complex stochastic systems and provides the possibility of further computer implementation of models.

Conclusions. As a result of the study, an approach to the analytical study of asymmetric homogeneous Markov chains based on the matrix representation of the states of complex systems was developed.

The possibility of reducing Kolmogorov's characteristic equations to algebraic equations with subsequent obtaining of analytical expressions of the roots was shown. The verification confirmed the reliability of the obtained results.

The proposed approach can be used to analyze the reliability and predict the behavior of a wide class of complex systems: technical, energy, economic, environmental and information.

REFERENCES

1. Kravets, V., Bass, K., Kravets, V. and Tokar, L. (2014) Analytical Solution of Kolmogorov Equations for Four-Condition Homogenous, Symmetric and Ergodic System. Open Journal of Applied Sciences, 4, 497-500. doi: 10.4236/ojapps.2014.410048.
2. Kravets, V., Kapitsa, M., Domanskyi, I., Kravets, V., Hryshechkina, T., & Zakurday, S. (2024). Devising an analytical method for solving the eighth-order Kolmogorov equations for an asymmetric Markov chain. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5(4 (131), 33–41. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.312971>
3. Kravets, V., Kapitsa, M., Hryshechkina, T., & Kravets, V. (2026). Analytical Modeling of the Dynamics of Random Processes During Combat Use of a Military Tetrasystem. Transactions on Engineering and Computing Sciences, 14(01), 10–16. <https://doi.org/10.14738/tmlai.1401.19828>

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗРАХУНКУ КОСОЗУБИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ

Кравченко В.І., Хахалєв Д.В.

*Донбаська державна машинобудівна академія
(Україна)*

Вступ. Відомо, що при експлуатації самохідних машин, безпілотних літаків і інших без екіпажних апаратів та механізмів виконання ними виробничих функцій неможливо без використання зубчастих передач.

При цьому конструктору таких машин приходиться робити багато складних і трудомістких розрахунків щодо визначення параметрів передачі, що затягує сам процес створення конструкції в цілому.

Актуальність досліджень. Тому актуальним є питання прискорення проектування машин шляхом створення системи автоматизованих розрахунків косозубих передач у вигляді мобільного сайту.

Постановка задачі. Метою цієї роботи є вдосконалення проектування косозубих циліндричних зубчастих передач (КЦЗП) шляхом дослідження та моделювання системи інформаційного забезпечення бізнес-діяльності інженера-конструктора.

Задачі роботи:

- вивчення і аналіз службових інструкцій інженера-конструктора з проектування КЦЗП, вхідних і вихідних документів, якими він користується;
- розробка інформаційної моделі.

Результати досліджень. Представимо діяльність інженера за допомогою SADT методології (див. модель-діаграму на рисунку нижче), розробленої свідомо для того, щоб визначити вимоги до програмного продукту [1].

Для виконання своїх функцій конструктор КЦЗП отримує від роботодавця:

- потужність передачі;
- передавальне число;
- модуль передачі;
- кутову швидкість (оберти);
- кут нахилу зубів (вхідні дані, рисунок).

Також вибираються:

- параметри розрахунку;
- матеріал зубчастих коліс;
- параметри з'єднання деталей на валах та інші.

Дані параметрів розрахунку за відповідними формами (правило перевірки даних, рисунок) заносяться до бази системи автоматизації.

Далі за відповідними алгоритмами [2] з обов'язковим урахуванням вимог ДСТУ (стрілки зверху, рисунок) інженер-конструктор (стрілка знизу, рисунок) виконується розрахунок КЦЗП. Допомога йому в цьому також система автоматизації (ПП).

Після цього виконується перевірочний розрахунок.

За результатами розрахунку остаточно визначаються:

- напруження у колесі та шестерні;
- передаточне відношення;
- число зубців;
- кут нахилу зубців;
- модуль передачі;
- виконується формування звіту (стрілка справа, рисунок).

У разі збою в системі автоматизації, зумовлених людським фактором, або

технічними причинами друкується помилка (рисунок) з датою, часом, місцем і причиною збою.

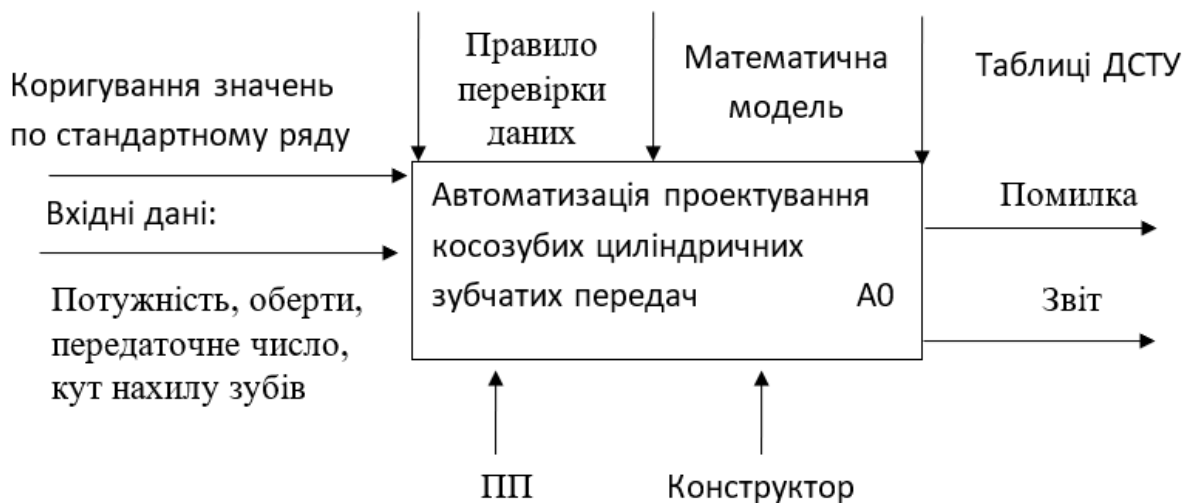


Рисунок 1 — Контекстна структурно-функціональна модель-діаграма рівня А0 бізнес-діяльності інженера-конструктора з проектування КЦЗП

Висновки. Таким чином вивчення і аналіз службових інструкцій інженера-конструктора з проектування косозубих циліндричних зубчастих передач дозволило створити інформаційну модель його бізнес процесу, що тільки за рахунок підвищення точності обчислень підніме на новий рівень усю систему проектування машин і механізмів.

Подальший напрямок досліджень — створення мобільного веб-додатку, який дозволяє автоматизувати розрахунки при проектуванні косозубих зубчатих передач.

ЛІТЕРАТУРА

1. М. Фаулер, К. Скотт UML: Основи. СПб.: Символ–Плюс, 2002. 192 с.
2. Карнаух С. Г., Чоста Н. В. Розрахунки механічних передач : навчальний посібник до курсового й дипломного проектування. Краматорськ : ДДМА, 2021. 204 с. ISBN 978-966-379-274-3

ОПТИЧНИЙ РЕЗОНАНС НА ПОВЕРХНІ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ

Крапивко Г. І.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Відбиттю від поверхні сонячних елементів приділено достатньо уваги [1, 2]. Однак в умовах дальнього космосу та підвищеної радіації, резонанс має місце та явно погіршує енергетичні характеристики сонячного елемента. З аналізу рис.1 видно, що полірований кремній має практично пряме відбиття в діапазоні довжин хвиль сонячного випромінювання.

Текстурований кремній веде себе як фотонний кристалл зі штучним двопроеменепреломленням.

Метою дослідження є — з'ясування причини появи сплесків відбиття на довжинах хвиль 576 і 865 нм.



Рисунок 1 — Крива залежності відбиття поверхні від довжини хвилі.

SiO_2 — мінерал, присутній на пластині сонячного елемента у природі зустрічається у формі шестигранних кристалів з гострими вершинами (рис.2). Як і всяке кристалічне тіло, кварц анізотропен, т.е. у різних напрямках його фізичні властивості різні; але оскільки він має кілька геометричних осей симетрії, очевидно, що у цих напрямках фізичні властивості кристала будуть однакові. У кристалі кварцу розрізняють оптичну вісь (z-z), три механічні (y-y) і три електричні (x-x).

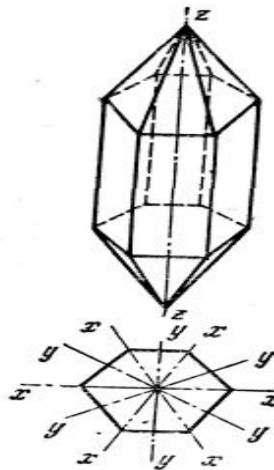


Рисунок 2 — Кристал кварцу

Нанесене антивідбивне покриття з кристала кварцу можна представити у вигляді прямокутного перерізу з гранями, перпендикулярними трьом осям симетрії (рис.3.), у напрямках осей x і y буде спостерігатися прямий п'єзоелектричний ефект. Він полягає в тому, що при стисканні пластини на її гранях виникають протилежні за знаком електричні заряди, величина яких пропорційна деформації кристала; при розтягуванні знаки зарядів змінюються зворотні.

Для цього досить пружного впливу сонячного променя у напрямку осі x (рис.3). Що б під дією пружних сил окремі шари, на які подумки можна розділити платівку, почали розходитися від середнього перерізу в протилежних напрямках. Далі шар від середини, то більше він зміщується, оскільки його зміщення складається зі зміщень всіх проміжних шарів; найбільше зміщення зроблять грані. Пройшовши те положення, яке шари займали до стиснення, вони не зупиняться і за інерцією рухатимуться далі, станеться розтягування платівки, яке зміниться зворотним рухом, переходом до стиснення тощо. На підставі сказаного можна зобразити графік розподілу амплітуд коливань окремих шарів пластини (рис.3), який має вигляд половини стоячої хвилі, що укладається вздовж товщини пластинки. Товщина покриття SiO_2 знаходиться в межах $0,8\text{ мкм} < d < 0,9\text{ мкм}$. Звідси випливає, що довжина хвилі антивідбивного покриття з SiO_2 , що генерується, дорівнює його подвоєній товщині $\lambda = 2d = 1784\text{ нм}$. Сплески на довжинах хвиль 576 і 865 нм (рис.1) є що інше, як друга (ВГ) і третя (ТГ) гармоніки вище зазначеного генератора.

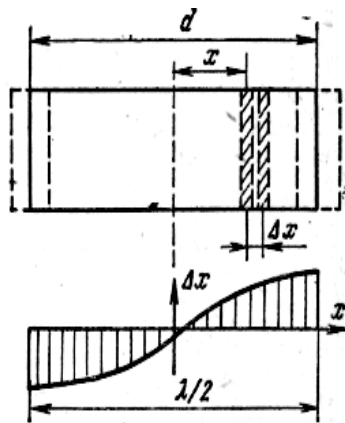


Рисунок 3 — Власні коливання антивідбивного покриття SiO_2

Частота власних коливань можна знайти зі співвідношення: $f_0 = v_x / \lambda$, де v_x – швидкість поширення пружних коливань вздовж осі x . З тією самою частотою змінюються заряди на гранях. Електричні коливання такої частоти створюють у відкритому просторі електромагнітні хвилі з довжиною: $\lambda = c / f = (c / v_x) \lambda = 2 (c / v_x) d$.

Швидкість поширення пружних хвиль у кристалі Si близька до 6000 см/с , не значно відрізняючись для осей x і y .

Висновок. Резонансні явища та присутність відображень ДГ(другої) та ТГ(третьої гармонік), явище унікальне, якому не було приділено належної уваги. На графіках дослідження відбитків полірованого монокристалу кремнію резонансних явищ не зазначено. Причиною появи генерації на довжинах хвиль 576 нм і 865 нм є модифікована поверхня монокремнію з гострими піками і має покриття SiO_2 товщиною $0,8\text{--}0,85\text{ мкм}$.

Поверхня Si обробленої оптичним квантовим генератором (ОКГ) із покриттям ZnS відображення на вказаних вище довжинах хвиль не має. Що зрештою дає приріст ефективності ФЕП близько $13\text{--}14\%$.

ЛІТЕРАТУРА

1. M.Patrini, M.Gali, M.Belotti. Optical response of one-dimensional photonic crystals $(\text{Si}/\text{SiO}_2)_m$. Journal of Applied Physics.-2002.Vol.92-No4-p.1816-1820.

2. Журавський А.М., Ворозов Н.М. Вплив текстурованої поверхні на коефіцієнт відбиття кремнію. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Сучасна радіoeлектроніка: наукові дослідження та підготовка кадрів». Мінськ, 23–24 квітня 2008 р., С.47–48.

3. Шувалов В.О., Письменний М.І., Кочубей Г.С., Носіков С.В. Втрати потужності сонячних батарей космічного апарату в полярній іоносфері і в магнітосфері Землі. Космічна наука і технології. 2011. №17(3). с. 5–15.

ЗАСТОСУВАННЯ BIM-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ БУДІВЕЛЬ

Крицький Д. М., Кайдан Е. С., Каратанов С.В.

*Харківський авіаційний інститут «Харківський авіаційний інститут»
(Україна)*

Вступ. Сучасний розвиток будівельної галузі характеризується переходом від традиційних методів проєктування до цифрових підходів, що забезпечують інтеграцію даних на всіх етапах життєвого циклу об'єкта [1]. Одним із ключових інструментів такого переходу є технологія інформаційного моделювання будівель (BIM), яка дозволяє створювати не лише геометричне представлення об'єкта, а повноцінну інформаційну модель з параметричними характеристиками [2].

Особливої актуальності BIM-технології набувають при проєктуванні інженерних систем будівель (MEP-систем), оскільки саме вони характеризуються високою складністю, великою кількістю взаємозв'язаних елементів та необхідністю точної координації в обмеженому просторі [3].

У даній роботі розглядається застосування BIM-підходу для моделювання інженерних мереж будівлі на прикладі систем трубопроводів, обладнання та їх інтеграції в архітектурне середовище.

Актуальність досліджень. Традиційні методи проєктування інженерних систем базуються на двовимірних кресленнях, що ускладнює виявлення помилок і призводить до виникнення колізій між різними системами вже на етапі будівництва [4]. Це спричиняє додаткові витрати часу та ресурсів, а також знижує загальну ефективність реалізації проєкту.

Інженерні мережі будівлі (системи водопостачання, опалення, вентиляції) повинні бути узгоджені між собою, а також з конструктивними та архітектурними елементами. В умовах обмеженого простору це завдання стає складним без використання сучасних цифрових інструментів [5].

BIM-технології дозволяють:

1. Інтегрувати всі інженерні системи в єдину модель;
2. Виконувати автоматичну перевірку колізій (clash detection);
3. Працювати з параметричними елементами;
4. Оперативно вносити зміни без порушення узгодженості проєкту.

Таким чином, застосування BIM є необхідною умовою підвищення якості та ефективності проєктування інженерних систем.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження можливостей використання BIM-технологій для проєктування інженерних систем будівель та оцінка їх ефективності при моделюванні трубопровідних мереж.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні задачі:

1. Створити тривимірну BIM-модель інженерних систем;
2. Виконати трасування трубопроводів;
3. Інтегрувати обладнання в модель будівлі;
4. Здійснити базові гідравлічні розрахунки;
5. Провести аналіз ефективності застосування BIM.

Результати досліджень. У ході виконання роботи було створено тривимірну BIM-модель інженерних систем будівлі, що включає трубопровідні мережі, насосне обладнання, ємності та елементи арматури. На рис. 1 представлено загальний вигляд змодельованої інженерної системи.

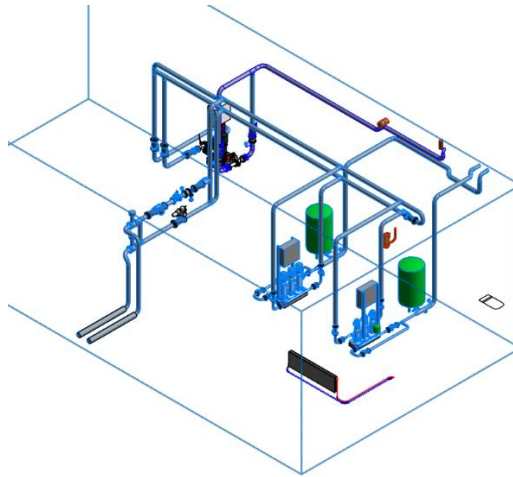


Рисунок 1 — Тривимірна модель інженерних систем будівлі

Модель дозволяє аналізувати структуру системи та виконувати інженерні розрахунки. Основним параметром при проєктуванні є витрата рідини:

$$Q = v \cdot A \quad (1)$$

де Q — витрата, v — швидкість потоку, A — площа поперечного перерізу труби.

Це співвідношення використовується для підбору діаметрів трубопроводів у BIM-моделі. Для оцінки втрат енергії в системі застосовується рівняння Дарсі–Вейсбаха:

$$h_f = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

Що дозволяє визначити втрати напору залежно від довжини трубопроводу, його діаметра та швидкості потоку. На рис. 2 показано інтеграцію інженерних систем у BIM-модель будівлі.

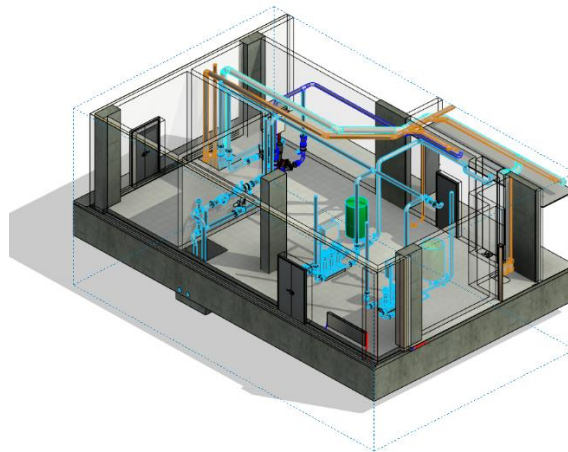


Рисунок 2 — Інтеграція інженерних мереж у BIM-модель будівлі

Створена модель дозволяє оцінити взаємне розташування елементів та виявити можливі колізії ще на етапі проєктування.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що BIM-технології значно підвищують ефективність проєктування інженерних систем.

Основні переваги:

1. Зменшення кількості колізій;
2. Підвищення точності проєктування;
3. Можливість виконання інженерних розрахунків;
4. Інтеграція всіх систем у єдину модель.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування BIM у сучасному

проектуванні.

ЛІТЕРАТУРА

1. Akbari S., Sheikhhoshkar M., Pour Rahimian F., Bril El Haouzi H., Najafi M., Talebi S. Sustainability and building information modelling: Integration, research gaps, and future directions. *Automation in Construction*. 2024. Vol. 163. Article 105420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105420>
2. Abdelalim, A. M.; Shawky, K.; Salem, M.; Al-Adwani, M.; Sherif, A. Automation and Optimization of BIM Execution Plans for Mega Construction Projects. *Preprints* 2024, 2024120698. <https://doi.org/10.20944/preprints202412.0698.v1>
3. Zhao Q., Shi H., Zhou L., Lv G. Automated BIM generation for MEP systems from CAD data using multi-drawing graph integration. *Automation in Construction*. 2025. Vol. 180. 106542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106542>
4. Pogorelskiy S., Kocsis I. BIM based collision tracking at the intersections of different building engineering systems at the design stage. *International Review of Applied Sciences and Engineering*. 2025. Vol. 16, No. 1. P. 70–80. DOI: <https://doi.org/10.1556/1848.2024.00833>
5. Wang, D.; Fang, Y. Automatic BIM Reconstruction for Existing Building MEP Systems from Drawing Recognition. *Buildings* 2025, 15, 924. <https://doi.org/10.3390/buildings15060924>

OVERVIEW OF MODERN METHODS FOR MODELLING DYNAMIC PROCESSES

Lazarijeva N.M.

*Ukrainian State University of Railway Transport
(Ukraine)*

Introduction. The control of many complex systems and objects requires intellectualization of the process with the introduction of modern methods and tools that have proven their effectiveness and are able to replace the human operator to a certain extent.

Relevance of research. Open real-time systems have complex relationships that are difficult to write analytically. Control of rolling wagons is one of the examples of such systems, due to the impossibility of accurately determining the number of influencing factors acting on the process. Taking into account the incompleteness and vagueness of information, the construction of a control model for such a process is an important scientific and practical problem.

Statement of the problem. The purpose of the study is to review the methods of modelling dynamic objects and processes that do not require complex mathematical calculations. At the same time, high requirements for real-time operation are imposed on efficiency.

Research results. Control of dynamic objects is based on the use of differential equations to describe objects. Among the numerical methods for solving ordinary differential equations, the basic ones are the Euler, Runge-Kutta and a number of others. The Euler method [1] does not require complex calculations and provides high performance by finding a solution to the recurrent equation

$$y_{i+1} = y_i + h \cdot f(x_i, y_i),$$

where h is the discretization step. The limitation of the application is accuracy, because it depends on the compromise between the discretization step and the speed of calculations.

The Runge-Kutta method [2] allows to avoid finding high-order derivatives and is able to provide high accuracy, but it is quite laborious: when expanding Δy_i into a Taylor series, it is necessary to calculate the coefficients of the equation

$$\Delta y_i = \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4),$$

which reduces the performance.

The accuracy and speed of calculations when switching to difference equations is determined by the discretization step and the complexity of the systems being modelled. Despite the simplicity of the calculations, a calculation error can accumulate.

Now the approach to modelling has changed towards the transition from classical numerical methods to the use of neural network approach. One of the directions is the use of Physics-Informed Neural Networks, which support the conservation of physical laws and allow modelling the motion of dynamic objects [3]. Learning is based not only on the discrepancy, but also on compliance with physical conservation laws.

Another approach is Neural ODEs networks [4], which allow modelling based on differential equations using classical methods, ensuring the accuracy of the calculation and the ability to approximate complex dynamics

$$\frac{dy}{dt} = f(h, t, Q),$$

where $h = [x, y, z, v_x, v_y, v_z, m, V_{wind}]$ is the state vector;

Q is the network parameters.

By creating a continuous velocity field, which is the desired variable, a system is modelled

where the physical parameters are components of the input data vector. The Neural ODE network determines the complex nonlinear relationship between the weight of the object and all other parameters.

Computer simulation of the movement of wagons down a hill in an open system under the influence of environmental factors was carried out (Fig. 1).

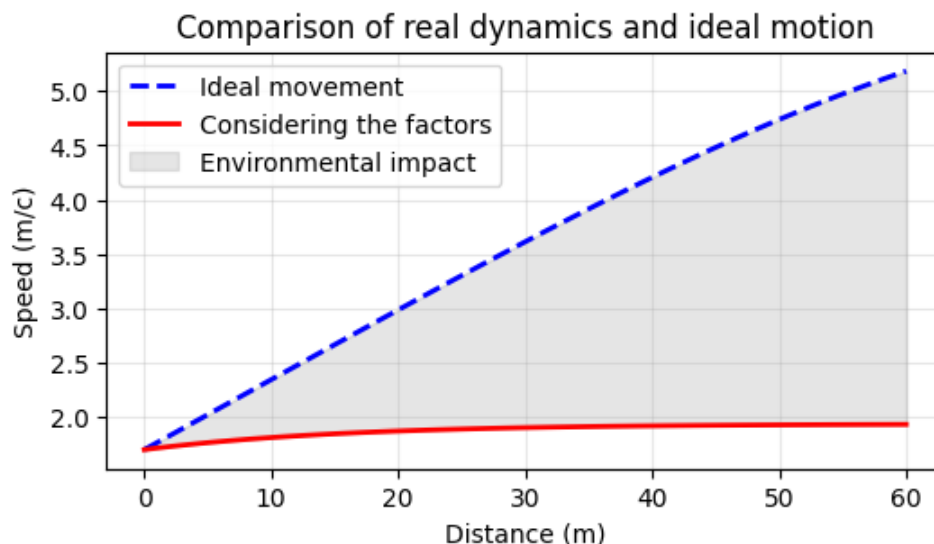


Figure 1 — The influence of environmental factors on movement dynamics

Source: developed by the author based on modelling

As can be seen from the figure 1, the influence of environmental factors is quite significant and must be taken into account. The neural network during training must approximate the dependence and predict the speed of the object at a given point on the path based on the current values of the input data vector.

To train the neural network, data synthesized by the author according to a heuristic formula under the conditions of seasonal factors (temperature, wind) within the variability of the values of the object parameters were used [5]. The convergence of the model based on the training results is shown in Figure 2.

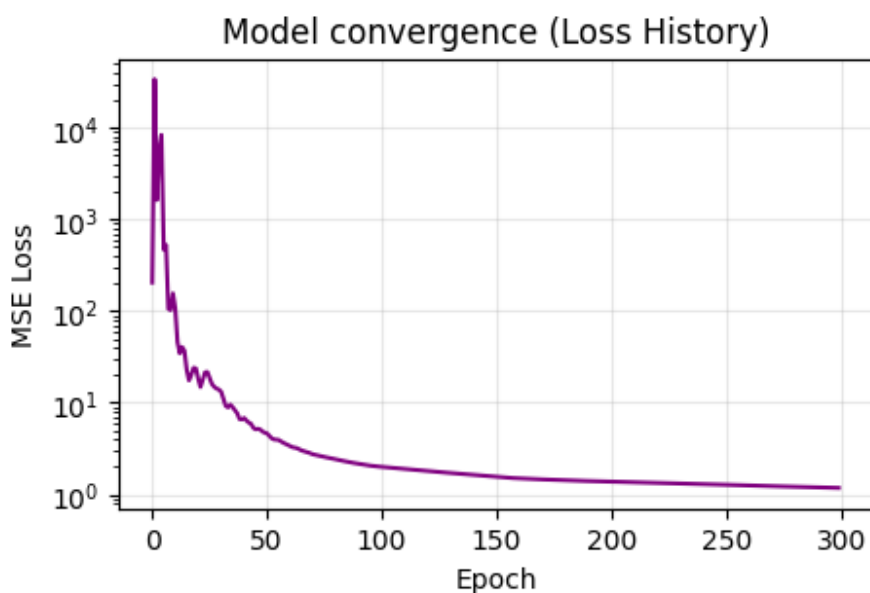


Figure 2 — Model convergence

Source: developed by the author based on modelling

The use of a neural network allows the approximation of the function $y(x, t)$ as continuous, avoiding discretization errors. However, there is a constant error caused by the limitations of network training, which is demonstrated by the results of computer simulations presented in Figure 3.

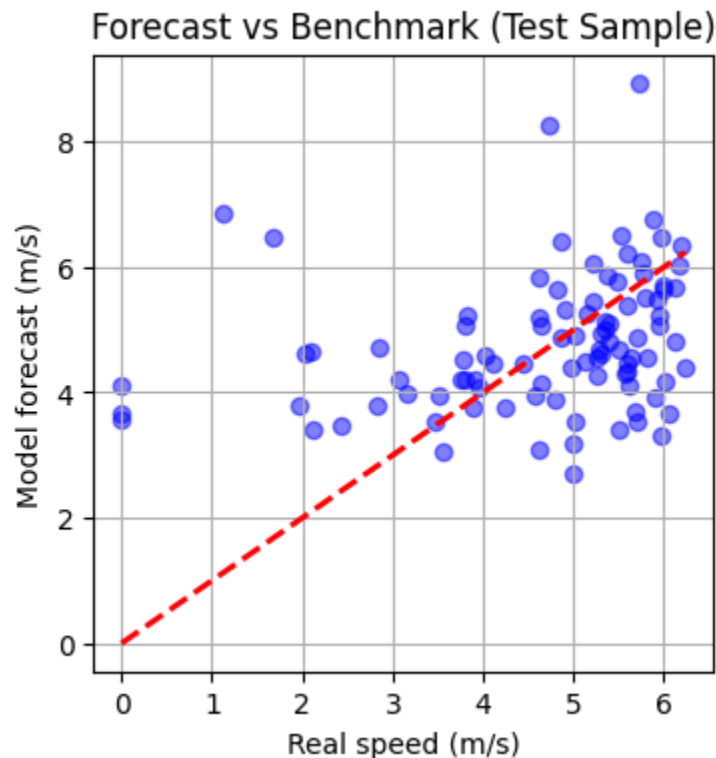


Figure 3 — Test results

Source: developed by the author based on modelling

Velocity variability due to external factors can reach 3,251 m/s. At the same time, the mean absolute error (MAE) on the test set is 1,1256 m/s.

Conclusion. The presented study of methods based on neural networks, in particular Neural ODE, showed that, like numerical methods, the neural network approach has significant shortcomings in modelling dynamic objects in open systems due to a number of reasons, including:

- limited awareness of factors and their effect on the control object;
- the inaccessibility of the identity of neural network modelling due to limited accuracy;
- inaccuracy and incompleteness of data, etc.

REFERENCES

1. Euler method. https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_method.
2. Runge–Kutta methods. https://en.wikipedia.org/wiki/Runge–Kutta_methods.
3. Physics-Informed Neural Networks. https://en.wikipedia.org/wiki/Physics-informed_neural_networks.
4. Neural differential equation. https://en.wikipedia.org/wiki/Neural_differential_equation.
5. Lazarijeva N.M., Lazariev O.V. Creating a rule base according to numerical data for the fuzzy control system of retarders. *Materialy X Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii z avtomatychnoho upravlinnia (12 kvitnia 2023 r.): Zb. nauk. prats. – Kherson-Khmelnyskyi, 2023. C 78-81. ISBN 978-617-7941-95-7.*

ОПТИМІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ АДАПТИВНИХ БІПІРАМІДАЛЬНИХ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мотайло А.П.

Херсонська державна морська академія
(Україна)

Вступ. Протягом останнього десятиліття математичне моделювання складних об'єктів переживає фундаментальну трансформацію в підходах до дискретизації просторових областей. Традиційна парадигма, заснована на використанні лінійних тетраедральних елементів, поступово замінюється складнішими топологічними структурами, такими як піраміди та багатогранники (поліедри) [1]. Ця зміна зумовлена необхідністю подолання вроджених математичних обмежень симплекс-елементів першого порядку, які тривалий час залишалися стандартом завдяки простоті автоматичної генерації сіток. Дана робота стосується розробки алгоритмів методу скінченних елементів (МСЕ), що дозволяють зберігати геометричну гнучкість тетраедральних сіток, одночасно забезпечуючи точність і стабільність в зонах виродження скінченних елементів (СЕ).

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення швидкодії та точності інженерних розрахунків при проектуванні об'єктів морського транспорту. Використання поліедральних СЕ дозволяє значно скоротити час збірки матриць жорсткості, що є критичним для розв'язання практичних задач з великим обсягом вхідних даних про геометрію області та граничні умови [2].

Постановка проблеми. Основними обмеженнями класичних симплекс-елементів першого порядку є їхня чутливість до викривлення геометрії, що призводить до втрати точності в зонах складної конфігурації [3]. Існує потреба в створенні поліедральних СЕ, які поєднують простоту тетраедрів з обчислювальною стійкістю апроксимації.

Метою дослідження є розробка та обґрунтування математичного апарату для побудови адаптивного трипараметричного біпірамідального СЕ з кусково-лінійною апроксимацією, а також проведення порівняльного аналізу його обчислювальної ефективності та метричних характеристик якості щодо класичних методів декомпозиції для підвищення точності моделювання об'єктів у транспортній галузі.

Для досягнення поставленої мети у роботі вирішуються такі завдання:

- побудова базисних функцій геометричним методом;
- розробка алгоритму швидкої збірки матриці жорсткості на основі аналітичного інтегрування;
- дослідження впливу геометрії біпірамідального СЕ на його показники якості.

Об'єктом аналізу є біпірамідальна геометрична структура, вершини якої суміщені з осями локальної системи координат. Геометрична адаптивність поліедра забезпечується варіацією координат трьох рухомих вершин (K_1 , K_2 , K_5) через параметри r , p , q відповідно. Положення вершин K_2 , K_4 , K_6 є зафіксованим на відстані одиниця від точки перетину діагоналей K_0 . Біпірамідальний СЕ (рис.1) має сім вузлів інтерполяції, що збігаються з вершинами та геометричним центром поліедра.

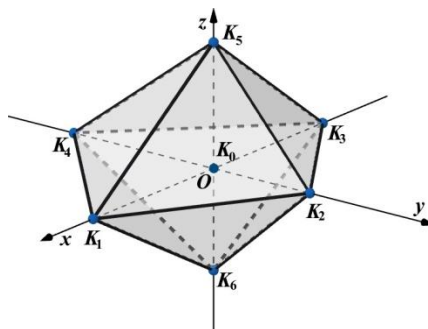


Рисунок 1 — Трипараметричний біпірамідальний СЕ

Побудова базису досліджуваного СЕ заснована на геометричному методі та задовольняє сукупності стандартних вимог до скінченно-елементних апроксимацій [4]:

$$\begin{aligned} N_1 &= (|x| + x)/2r; N_3 = (|x| - x)/2; \\ N_2 &= (|y| + y)/2p; N_4 = (|y| - y)/2; \\ N_5 &= (|z| + z)/2q; N_6 = (|z| - z)/2; \\ N_7 &= 1 - \sum_{i=1}^6 N_i. \end{aligned} \quad (1)$$

Апроксимаційні функції (1) характеризуються кусково-лінійною структурою та інваріантністю координати градієнтів у межах під областей. Це дозволяє обчислювати точно компоненти матриці жорсткості досліджуваного СЕ, яку в загальному вигляді подано як:

$$[k_{ij}] = \iiint_V [B]^T [D] [B] dv, \quad (2)$$

де V — розрахункова область біпіраміди, $[B] = [\partial N_i / \partial x \ \partial N_i / \partial y \ \partial N_i / \partial z]$ — матриця градієнтів базисних функцій, $[D]$ — матриця фізичних констант середовища (пружних характеристик/теплопровідності/проникності в залежності від типу розв'язуваної задачі).

З огляду на геометричні особливості СЕ для визначення компонент k_{ij} застосовано аналітичну кубатурну формулу

$$k_{ij} = \sum_{m=1}^8 V[m] \cdot k_{ij}[m], \quad i, j = 1..7, \quad (3)$$

де $V[m]$, $k_{ij}[m]$ — об'єм та компонента матриці жорсткості m -го октанта біпіраміди, у межах якого координати точок зберігають постійність знаку.

Аналіз структури формули (3) та геометрична інтерпретація біпіраміди дозволяють представити її поліедром, який є об'єднанням восьми суміжних тетраедрів зі спільною вершиною K_0 .

Для верифікації запропонованої математичної моделі проведено порівняльне дослідження генерації матриці жорсткості двома методами: шляхом прямого обчислення за формулою (3) та через процедуру декомпозиції поліедра на вісім тетраедрів. У табл.1 наведено результати оцінки точності та часової складності алгоритмів збірки матриці жорсткості для фіксованих конфігурацій при $r=0.9$, $q=1.4$.

Варіація параметра p у діапазоні $[0.1; 1.1]$ дозволяє дослідити чутливість обчислювальної схеми до наявності вироджених (тонких) тетраедрів у декомпозиції біпірамідального СЕ. Компоненти матриці жорсткості розраховано для ізотропного середовища за умови, що матриця фізичних характеристик $[D]$ є одиничною. Кількісну оцінку відхилень здійснено на основі розрахунку максимальної абсолютної похибки (Δ) та середньоквадратичного відхилення (ε):

$$\Delta = \max_{i,j=1..7} |k_{ij} - k_{ij}^*|, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{7} \sqrt{\sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^7 (k_{ij} - k_{ij}^*)^2}, \quad (5)$$

де k_{ij} , k_{ij}^* — елементи матриць жорсткості, які отримано за допомогою аналітичного інтегрування (2) та запропонованої кубатурної схеми (3) відповідно.

Результати. У межах обчислювального експерименту проведено порівняльний аналіз топологічних показників якості біпірамідального СЕ та критичного тетраедра декомпозиції $K_0K_1K_2K_5$, який характеризується найменшими метричними значеннями серед восьми суміжних елементів (рис.1). Оцінку геометричних характеристик тетраедрів виконано за алгоритмами, інтегрованими в середовище ANSYS [5]. Якість біпірамідальної структури визначено за аналітичними залежностями, адаптованими для поліедральних елементів [6]. Обчислення виконано в системі комп'ютерної алгебри Maple з підтримкою

25-значної розрядності (evalf_{25}) для мінімізації похибок округлення. Результати апробації (табл.1) демонструють переваги запропонованого підходу як у контексті обчислювальності стійкості, так і швидкості алгоритму.

Таблиця 1 — Порівняльний аналіз обчислювальної ефективності та метрик якості CE

Метод моделювання	Час збірки $[k_{ij}]$ (с)	Обчислювальна похибка (Δ/ϵ)	Параметр p	Element Quality	Skewness	Aspect Ratio	Orthogonal Quality
Біпірамідальний CE (Запропонована схема)	0.578	$2 \cdot 10^{-24} / 1.42 \cdot 10^{-25}$	1.1	0.0108	0.1902 [exc.]	1.2807	0.9758
		$2 \cdot 10^{-24} / 6.05 \cdot 10^{-25}$	0.7	0.0103	0.3133 [good]	1.5375	0.9414
		$1.3 \cdot 10^{-23} / 1.86 \cdot 10^{-24}$	0.1	0.0075	0.4506 [good]	1.9670	0.5567
Декомпозиція (Вісім лінійних тетраедрів)	1.453	$2 \cdot 10^{-24} / 8.62 \cdot 10^{-25}$	1.1	0.0056	0.3640 [good]	1.4696	0.8348
		$5 \cdot 10^{-24} / 9.95 \cdot 10^{-25}$	0.7	0.0048	0.5572 [fair]	2.3094	0.7837
		$1.4 \cdot 10^{-23} / 3.84 \cdot 10^{-24}$	0.1	0.0009	0.9319 [bad]	16.1658	0.1774

Проведений обчислювальний експеримент підтвердив високу ефективність запропонованої математичної моделі. Встановлено, що швидкість генерації локальної матриці жорсткості біпірамідального CE у 2.5 рази перевищує швидкість стандартного методу декомпозиції при збереженні ідентичного порядку точності.

Аналіз метричних характеристик показав, що більшість індикаторів якості досліджуваних елементів перебувають у межах допустимих діапазонів. Зокрема, при варіації параметра p від одиниці на 0.1, біпірамідальний CE демонструє високі показники: Skewness класифікується як «excellent», Orthogonal Quality є близьким до одиниці, що суттєво перевершує характеристики відповідного тетраедра. Подальше відхилення p на 0.3 призводить до помірного зниження якості метрик до рівня «good», проте ці значення залишаються вищими за показники декомпозиційного підходу, які відповідають категорії «fair».

Найбільш виражена перевага біпірамідального CE спостерігається при $p=0.1$. Коли показник Skewness біпіраміди зберігає стійкість, аналогічна метрика для критичного тетраедра декомпозиції набуває статусу «bad». Це свідчить про геометричне виродження елемента, що в межах стандартних алгоритмів генерації тетраедральних сіток потребує примусового перерахунку топології [5]. Аналіз параметра Aspect Ratio також підтверджує схильність тетраедрів до значної анізотропії при малих значеннях p , тоді як біпірамідальний CE зберігає стабільність геометричної конфігурації.

Висновки. 1. Впровадження адаптивного трипараметричного біпірамідального CE забезпечує високу точність математичного моделювання при суттєвому (у 2.5 рази) скороченні часових витрат на етапі формування локальних та глобальних матриць жорсткості.

2. Доведено, що геометрична адаптивність запропонованого CE дозволяє ефективно нівелювати проблему виродження елементів у складних вузлах транспортних конструкцій. Використання біпірамідальних структур замість стандартних тетраедральних сіток дозволяє уникнути критичного зниження метрик якості (Skewness, Aspect Ratio) та запобігає надмірній кількості рівнянь системи, що знижує навантаження на обчислювальні

ресурси.

3. Обґрунтовано універсальність розробленого математичного апарату для задач транспортної галузі. Отримані результати можуть бути інтегровані в алгоритм МСЕ для розрахунку напружено-деформованого стану суднових деталей, а також для моделювання стаціонарних температурних полів у суднових енергетичних установках за умов лінійної апроксимації розподілу фізичних величин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Owen S.J., Cannan S. A., Saigal S. Pyramid-Elements For Maintaining with Tetrahedra to Hexahedra Conformability. [Scribd]. URL: <https://www.scribd.com/document/133233035/Pyramid-Elements> (date of access: 02.05.2026).
2. Numerical Analysis of Flow in Building Arrangement: Computational Domain Discretization/ M.Sosnowski et al. Applied Sciences. 2019. Vol.9, no.5. P.941. URL: <https://doi.org/10.3390/app9050941> (date of access: 02.05.2026).
3. Locking-Proof Tetrahedra/ M.Frâncu et al. ACM Transactions on Graphics. 2021. Vol.40, no.2. P.1–17. URL: <https://doi.org/10.1145/3444949> (date of access: 02.05.2026).
4. Zienkiewicz O. C. Introductory Lectures on the Finite Element Method. Vienna: Springer Vienna, 1972. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-2973-9> (date of access: 03.05.2026).
5. Mesh Metric. ANSYS. URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/wb_msh/msh_metrics.html (date of access: 02.05.2026).
6. Мотайло А.П. Визначення метрик якості скінченного елемента в формі біпіраміди. Системи та технології. Т. 69, №1. Дніпро, 2025. С.15–22. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.2> (дата звернення 02.05.2026).

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАНОКЕРАМІКИ $\text{ZrO}_2(3 \text{ мол.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3)\text{--WC}$ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

*Нерубацький В. П., Комарова Г. Л., Зінченко О. Є., Харін Р. О., Камінський Ю. В.
Український державний університет залізничного транспорту
(Україна)*

Вступ. Еволюція сучасних інтелектуальних технічних систем нерозривно пов'язана з інтеграцією інформаційних технологій у процеси синтезу матеріалів із програмованими властивостями. У контексті системного аналізу та математичного моделювання складних об'єктів наноструктурного рівня особливого значення набуває формалізація фізико-хімічних процесів, що протікають при інтенсивній енергетичній дії. Розроблення нанокомпозиційної кераміки системи $\text{ZrO}_2(3 \text{ мол.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3)\text{--WC}$ методом електроконсолідації [1–4] є багатофакторною задачею оптимізації, де керовані параметри (температура, тиск, швидкість нагріву) визначають фазову стабільність та механічну надійність кінцевого виробу. Системна декомпозиція процесу консолідації дозволяє ідентифікувати критичні точки структуроутворення та інтегрувати отримані математичні залежності у прецизійні інформаційно-вимірювальні системи моніторингу та керування процесом.

Актуальність досліджень. Наукове обґрунтування методів створення кераміко-композитних систем нового покоління обумовлене дефіцитом конструкційних матеріалів, здатних зберігати функціональну стійкість в умовах екстремального зносу та хімічної агресії. Перехід від емпіричного підходу до математично обґрунтованої парадигми проєктування дає змогу реалізувати цифрові алгоритми управління якістю на всіх ієрархічних рівнях – від підготовки наносуспензій до фінальної обробки виробу. Дослідження кореляційних зв'язків між параметрами електроактивації та еволюцією мікроструктури забезпечує підвищення відтворюваності та стабільності формування властивостей матеріалу в межах заданих експлуатаційних умов.

Постановка задачі. Метою дослідження є теоретичне обґрунтування системного підходу до синтезу поліфункціональної нанокераміки $\text{ZrO}_2(3 \text{ мол.}\% \text{ Y}_2\text{O}_3)\text{--WC}$ на основі математичного моделювання кінетики електроконсолідації та верифікації фізико-хімічних закономірностей формування безпористої структури. Задача передбачає розробку реологічних моделей ущільнення, системний аналіз впливу нанодобавок на механізми трансформаційного зміцнення та обґрунтування інформаційних рішень для моніторингу деградаційних процесів.

Результати досліджень. У процесі реалізації системного аналізу створення поліфункціонального композиту було отримано такі наукові результати:

1. На основі теорії в'язкої течії пористого тіла розроблено математичну модель, що описує динаміку ущільнення під дією електричного струму. Встановлено, що досягнення відносної щільності $>99,5 \%$ при температурі 1450°C та тиску 60 МПа потребує дотримання оптимального діапазону швидкості нагріву $150\text{--}200^\circ\text{C/хв}$. Чисельне моделювання термічних полів підтвердило можливість локалізації енергії в контактних зонах між зернами, що гальмує процеси рекристалізації та сприяє збереженню нанокристалічного стану матриці.

2. Сформовано методологію використання композиту як інтелектуального сенсора на основі аналізу його електрофізичних характеристик. Завдяки формуванню перколяційної мережі карбіду вольфраму в діелектричній матриці ZrO_2 , вимірювання динаміки електричного опору дозволяє потенційно в реальному часі ідентифікувати зародження субмікротріщин. Розроблені алгоритми обробки інформаційних сигналів забезпечують можливість інтеграції матеріалу в автоматизовані системи Structural Health Monitoring

(SHM) для предиктивного оцінювання залишкового ресурсу складних об'єктів.

3. Методами комп'ютерного аналізу цифрових зображень мікроструктур доведено, що ультрадисперсні домішки забезпечують ефект «анкерування» меж зерен. Математична апроксимація результатів випробувань на кавітаційну та ерозійну стійкість підтвердила поліфункціональність матеріалу. Системний аналіз виробничого циклу вказав на суттєве зниження енергоємності (до 60 %) відносно ізостатичного пресування, що сприяє підвищенню екологічної безпеки та економічної ефективності промислового виробництва.

Висновки. Результати проведеного системного аналізу та математичного моделювання параметрів електроконсолідації підтверджують можливість формування нанокераміки $\text{ZrO}_2(3 \text{ мол. \% } \text{Y}_2\text{O}_3)\text{--WC}$ з розширеним комплексом експлуатаційних властивостей. Використання інформаційно-вимірювальних технологій на етапі експлуатації дозволяє розглядати матеріал як елемент системи самодіагностики стану конструкцій, що підвищує надійність складних технічних об'єктів. Розроблені цифрові моделі структуроутворення створюють науково-технічну базу для впровадження концепцій Smart Industry.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hevorkian E., Samociuk W., Rucki M., Krzysiak Z., Pieniak D., Nerubatskyi V., Chyshkala V., Lytovchenko S., Chalko L., Morozow D., Caban J., Kulich V. Microstructure and properties of binderless μWC obtained using the electroconsolidation method. *Materials*. 2025. Vol. 18, Iss. 20. 4646. <https://doi.org/10.3390/ma18204646>.

2. Hevorkian E. S., Nerubatskyi V. P., Chyshkala V. O., Lytovchenko S. V., Prokopiv M. M., Samociuk W., Mechnik V. A. Technological and innovative features of the electroconsolidation method as a kind of plasma sintering for refractory compounds. *Journal of Superhard Materials*. 2024. Vol. 46, Iss. 5. P. 364–375. <https://doi.org/10.3103/S1063457624050046>.

3. Morozova O. M., Martyrosyan S. R., Nerubatskyi V. P. The determination of the dependence of mechanical characteristics of $\text{ZrO}_2\text{--}3 \text{ wt \% } \text{Y}_2\text{O}_3$ on the sintering mode of ceramics moulding by electroconsolidation method. Матеріали 4-ї міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні транспортні технології» (Харків, УкрДУЗТ, 27–28 листопада 2023 р.). Харків: УкрДУЗТ, 2023. С. 329–330.

4. Геворкян Е. С., Нерубацький В. П., Гордієнко Д. А. Дослідження закономірностей і визначення оптимальних умов електроконсолідації нанопорошкових сумішей Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 . Матеріали X міжнародної науково-практичної конференції «Людина, суспільство, комунікативні технології» (Харків, УкрДУЗТ, 27–28 жовтня 2022 р.). Харків: Мачулін, 2022. С. 202–204.

УДОСКОНАЛЕННЯ ОСНОВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ЗАХИСТУ МОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ МОВОПОДІБНИХ ЗАВАД

Нужний С.М.

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Захист мовної інформації від витоку акустичними та віброакустичними каналами є актуальною задачею технічного захисту інформації в умовах розвитку сучасних методів цифрової обробки сигналів та реконструкції мовлення. Розвиток систем захисту інформації в Україні пов'язується з удосконаленням нормативно-правового та науково-технічного забезпечення ТЗІ, підвищенням стійкості критичної інформаційної інфраструктури та впровадженням об'єктивізованих методів оцінювання ефективності захисту [1–2].

Традиційні методи оцінювання захищеності мовної інформації базуються переважно на енергетичних і психоакустичних показниках та не враховують можливість цифрової реконструкції перехопленого сигналу. Сучасні методи спектрального аналізу, адаптивної фільтрації та нейромережевої обробки дозволяють відновлювати інформативні компоненти сигналу навіть за умов значного зашумлення [3].

Перспективним напрямом підвищення ефективності захисту є використання мовоподібних активних завад, здатних здійснювати деструкцію формантно-спектральної структури мовлення та знижувати можливість його реконструкції [2, 4].

Актуальність досліджень обумовлена необхідністю забезпечення захисту мовної інформації в умовах зростання загроз технічного перехоплення та цифрової реконструкції мовлення. Положення Стратегії кібербезпеки України та нормативні документи Державної служби спеціального зв'язку та захисту інформації України визначають одним із пріоритетних напрямів розвитку систем ТЗІ підвищення стійкості державних інформаційних ресурсів до сучасних технічних загроз [5].

Нормативні документи НД ТЗІ 2.3-002-2001, НД ТЗІ 2.3-003-2001 та НД ТЗІ 2.3-025:2024 встановлюють необхідність проведення інструментального контролю захищеності мовної інформації. Разом із тим більшість існуючих методів оцінювання базуються на показниках SNR, AI, SII та STI, які не враховують можливість цифрової реконструкції перехоплених сигналів [1, 3].

Це визначає необхідність переходу до інформаційно-структурних методів оцінювання захищеності та розроблення моделей і методів захисту мовної інформації на основі мовоподібних активних завад [2, 6].

Постановка задачі. Метою дослідження є підвищення ефективності систем захисту мовної інформації від витоку акустичними та віброакустичними каналами шляхом розроблення моделей, методів та критеріїв оцінювання захищеності з урахуванням можливості цифрової реконструкції мовлення.

У роботі проаналізовано сучасні методи оцінювання захищеності мовної інформації та встановлено їх обмеження в умовах цифрової реконструкції мовлення. Розроблено модель оцінювання залишкової інформативності мовного сигналу та сформовано спектрально-інформативний критерій оцінювання рівня захищеності [4].

Розроблено моделі та методи синтезу мовоподібних активних завад скремблерного типу, досліджено вплив їх параметрів на розбірливість і реконструктивну придатність мовного сигналу та запропоновано підхід до інтеграції мовоподібних завад у системи технічного захисту інформації [6–7].

Результати досліджень. У роботі розроблено структурно-інформаційний підхід до оцінювання та забезпечення захищеності мовної інформації від витоку акустичними та віброакустичними каналами. На відміну від традиційних підходів, які переважно спираються на енергетичні або психоакустичні показники, запропонований підхід враховує можливість цифрової обробки, фільтрації, просторового комбінування та реконструкції

перехопленого мовного сигналу. Це дозволило перейти від оцінювання рівня зашумлення або ослаблення сигналу до оцінювання ступеня збереження його інформативної структури.

Для опису процесу формування сигналу в каналі витоку використано модель сигналу спостереження:

$$y(t) = x(t) * h(t) + n(t),$$

де $x(t)$ — мовний сигнал, $h(t)$ — імпульсна характеристика каналу поширення, $n(t)$ — адитивна завада.

Для умов багатоточкового перехоплення запропоновано багатоканальну модель:

$$y_m(t) = x(t) * h_m(t) + n_m(t), \quad m = 1, \dots, M,$$

де M — кількість каналів спостереження. Такий опис враховує можливість просторового комбінування перехоплених сигналів порушником, що є принципово важливим для сучасних умов реконструкції мовлення [4].

Для оцінювання рівня захищеності введено поняття залишкової інформативності мовного сигналу. На рис. 1 наведено структурну схему оцінювання залишкової інформативності мовного сигналу.

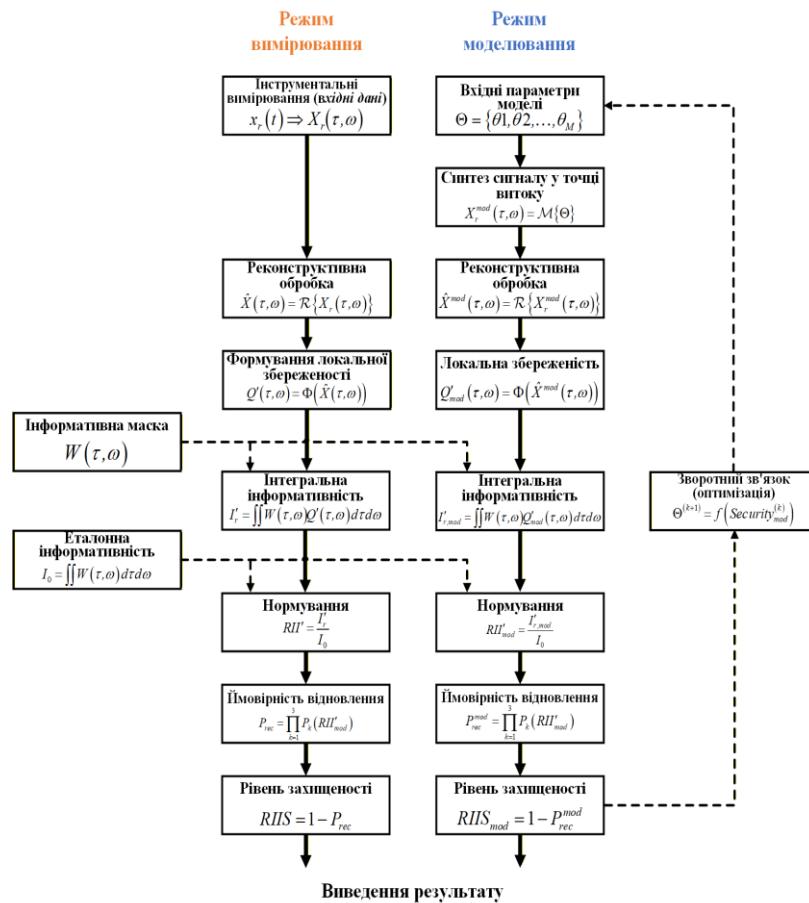


Рисунок 1 — Структурна схема оцінювання залишкової інформативності мовного сигналу

Схема відображає послідовність переходу від сигналу спостереження до інтегральної оцінки рівня захищеності на основі спектрально-формантного аналізу.

Інтегральний функціонал залишкової інформативності визначено як:

$$I = \iint \iint_{\Omega} M(t, f) \Psi(t, f) dt df,$$

де $M(t, f)$ — інформативна маска мовлення, $\Psi(t, f)$ — функція збереження інформативності після дії каналу та завад.

Нормований показник залишкової інформативності:

$$RII = I/I_0.$$

Для врахування лінгвостатистичних залежностей запропоновано спектрально-інформативний критерій [5]:

$$RIIS = \sum_{k=1}^K p_k RII_k,$$

де p_k — ймовірність появи мовного елемента. Запропонована шкала оцінювання рівня захищеності за критерієм $RIIS$ наведена у табл. 1.

Таблиця 1 – Шкала оцінювання рівня захищеності мовної інформації

Значення $RIIS$	Рівень захищеності
$RIIS \leq 0,2$	високий
$0,2 < RIIS \leq 0,6$	середній
$RIIS > 0,6$	низький

У роботі розроблено моделі та методи формування мовоподібних активних завад скремблерного типу. Формування завади описано як:

$$z(t) = \mathcal{S}\{x(t), \Theta\},$$

де Θ — множина керуючих параметрів. Оператор синтезу реалізує сегментацію, часові перестановки, спектральні перетворення та змішування сигналів [2, 6]:

$$z(t) = \sum_{i=1}^N a_i s_i(t - \tau_i) e^{j\varphi_i}.$$

Для забезпечення ефективного маскування запропоновано принцип спектральної узгодженості:

$$Z(f) \approx \alpha X(f), \quad f \in \Omega_F,$$

де Ω_F — область формантних частот. Приклад спектрального перекриття мовного сигналу та мовоподібної завади наведено на рис. 2.

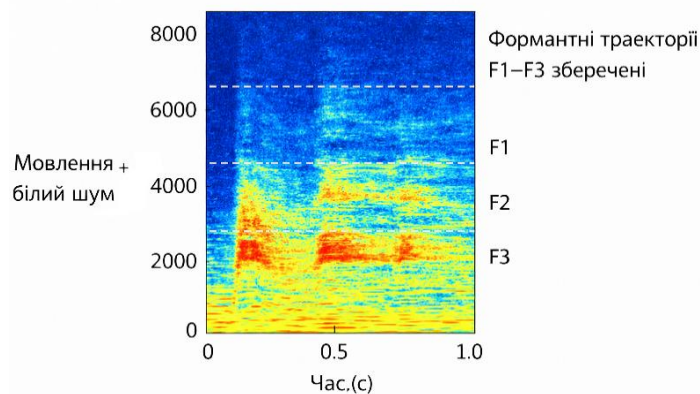


Рисунок 2 — Приклад спектрального перекриття сигналу та мовоподібної завади

З рисунка видно, що мовоподібна завада перекриває найбільш інформативні області спектра мовлення [7].

Встановлено, що використання мовоподібних завад забезпечує зменшення кореляції «мовлення–завада» на 40–60 %, зниження словесної розбірливості на 30–50 % та зменшення інтегрального показника реконструктивної придатності мовлення у 2–4 рази порівняно з використанням шумових завад [1–2].

Порівняльні залежності словесної розбірливості мовлення для шумових та мовоподібних завад наведено на рис. 3.

Практичну реалізацію запропонованого підходу виконано у вигляді генератора

мовоподібної завади ОССА. Основні технічні характеристики генератора наведено у табл. 2.

Таблиця 2 — Основні технічні характеристики генератора ОССА

Параметр	Значення
Частота дискретизації	16–44,1 кГц
Діапазон частот	20–4000 Гц
Тип сигналу	мовоподібний
Режим роботи	реального часу

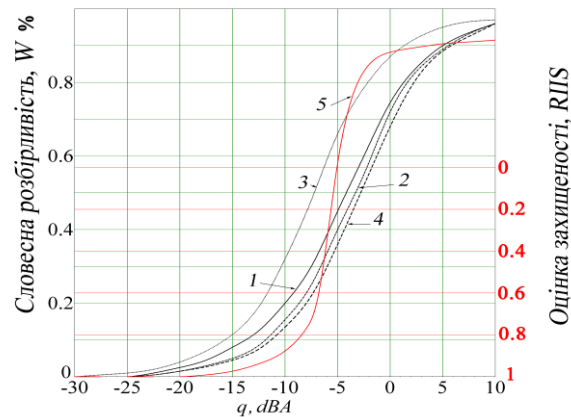


Рисунок 3 — Порівняльні залежності словесної розбірливості мовлення $W(q)$

Встановлено, що для мовоподібної завади поріг нерозбірливості досягається при $q \approx -6 \dots -7$ дБ, що відповідає виграшу 2–3 дБ за відношенням сигнал/завада порівняно з шумовими завадами.

Для інтеграції процедур оцінювання та керування параметрами завадового впливу розроблено систему підтримки прийняття рішень. Структурну модель СППР наведено на рис. 4. Система реалізує адаптивний вибір параметрів мовоподібної завади залежно від результатів аналізу мовного сигналу [4].

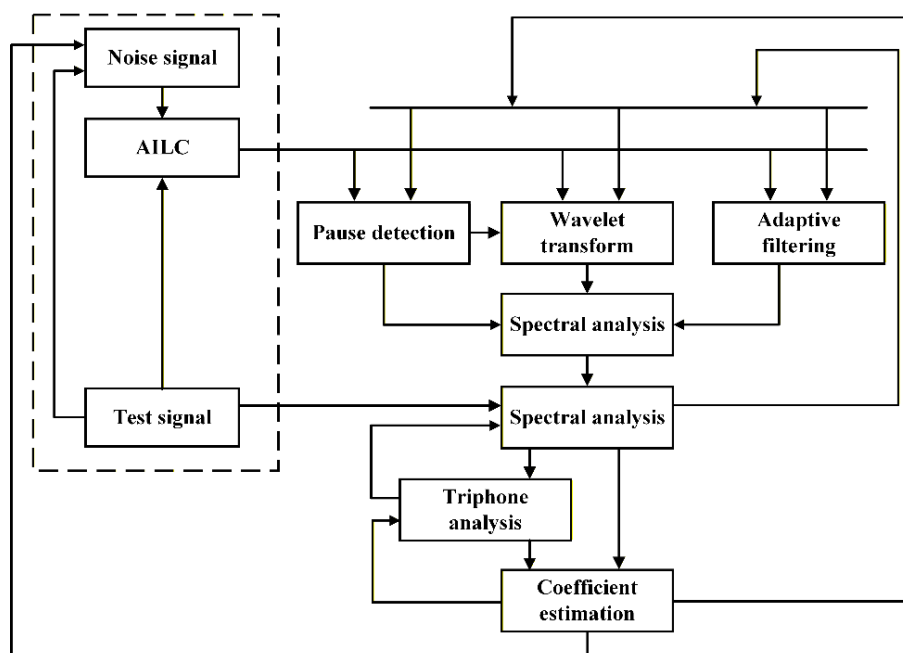


Рисунок 4 — Структурна модель СППР оцінювання та забезпечення захищеності мовної інформації

Порівняльний аналіз показав, що використання запропонованого підходу забезпечує підвищення точності оцінювання рівня захищеності на 15–25 % та чутливість оцінювання на рівні 5–10 % до змін формантно-спектральної структури мовлення. Отримані результати підтверджують ефективність використання мовоподібних активних завад для побудови сучасних систем захисту мовної інформації.

Висновки. Запропоновано структурно-інформаційний підхід до оцінювання та забезпечення захищеності мовної інформації від витоку акустичними та віброакустичними каналами з урахуванням можливості цифрової реконструкції мовлення. Запропоновано модель оцінювання залишкової інформативності мовного сигналу та спектрально-інформативний критерій *RIIS*, який забезпечує кількісне оцінювання рівня захищеності мовної інформації.

Розроблено моделі та методи синтезу мовоподібних активних завад скремблерного типу. Експериментально встановлено, що застосування мовоподібних завад забезпечує зменшення кореляції «мовлення–завада» на 40–60 %, зниження словесної розбірливості мовлення на 30–50 %, зменшення енергії формант на 20–40 % та збільшення ентропії мовних послідовностей на 15–30 %. Встановлено зменшення інтегрального показника реконструктивної придатності мовлення у 2–4 рази порівняно з використанням шумових завад.

Для мовоподібної завади поріг нерозбірливості мовлення досягається при $q \approx -6 \dots -7$ дБ, що відповідає виграшу 2–3 дБ за відношенням сигнал/завада порівняно з білим та кольоровими шумовими завадами. Розроблений підхід забезпечує підвищення точності оцінювання рівня захищеності на 15–25 % та чутливість оцінювання на рівні 5–10 % до змін формантно-спектральної структури мовного сигналу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Нужний С. М. Оцінювання ефективності завадових сигналів при захисті мовної інформації. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2017.
2. Nuzhnyi S. Development of methods for protecting speech information based on speech-like interference. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2019. Vol. 6, No. 9(102). P. 28–38. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.185585.
3. Нужний С. М. Методи аналізу мовної інформації у складнозашумлених умовах. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. 2017.
4. Nuzhnyi S. Improvement of methods for assessing speech information security in vibroacoustic channels. EUREKA: Physics and Engineering. 2020. No. 3. DOI: 10.21303/2461-4262.2020.001241.
5. Нужний С. М. Оцінювання залишкової інформативності мовного сигналу в умовах акустичних завад. Сучасні проблеми інформаційної безпеки на транспорті : матеріали XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю. Миколаїв, 2021.
6. Нужний С. М. Мовоподібні завади у системах технічного захисту інформації // Information Systems and Technologies (IST-2022) : Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. Odesa, 2022.
7. Нужний С. М. Аналіз ефективності мовоподібних завад в умовах цифрової реконструкції мовлення. Захист інформації і безпека інформаційних систем : матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції. Львів, 2017.

СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Продашук С.М., Кім К.В., Продашук М.В., Гасанов Р.Р.
Український державний університет залізничного транспорту
(Україна)

Вступ. У сучасних умовах мультимодальні перевезення відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного функціонування транспортно-логістичних систем. Поєднання різних видів транспорту — залізничного, автомобільного, морського та авіаційного — дозволяє оптимізувати маршрути доставки, скоротити витрати та підвищити швидкість перевезень.

Разом з тим, розвиток мультимодальних перевезень стримується низкою системних проблем, пов'язаних із недосконалістю нормативно-правового забезпечення. Наявність фрагментованого законодавства, неврегульованість відповідальності та складність митних процедур створюють додаткові бар'єри для ефективної організації перевізного процесу.

Актуальність досліджень. Мультимодальні перевезення в Україні регулюються не одним нормативним актом, а сукупністю законів і міжнародних документів. Закон «Про мультимодальні перевезення» [1] лише задає загальну конструкцію, тоді як реальні правовідносини формуються на перетині кількох груп документів: цивільного законодавства, транспортних законів (залізничного, автомобільного, морського), митного законодавства, законодавства про транспортно-експедиторську діяльність, а також міжнародних конвенцій і правил. Така багаторівнева структура не є узгодженою, що створює низку системних проблем.

Постановка задачі. Відповідно до [1, с. 3], застосовується Цивільний кодекс України [2], який і визначає загальні принципи договірних відносин, відповідальності сторін, відшкодування збитків. Наприклад, питання порушення зобов'язань, штрафів, форс-мажору регулюються не спеціальним законом, а саме цим кодексом. Це створює ситуацію, коли ключові аспекти мультимодального перевезення фактично «розкидані» по різних актах, і оператор змушений орієнтуватися одразу в кількох правових площинах.

Далі, галузеве транспортне законодавство. Закон [1, с. 3] прямо відсилає до законів «Про транспорт» [3], «Про залізничний транспорт» [4], «Про автомобільний транспорт» [5], а також до Кодексу торговельного мореплавства України [6]. Це означає, що кожна ділянка маршруту фактично регулюється «своїм» законом. Залізнична частина — за правилами залізничного транспорту, автомобільна — за правилами автомобільних перевезень, а морська — за нормами морського права. Але ці нормативні акти створювалися окремо і не узгоджені між собою під мультимодальні перевезення. У результаті різні вимоги до документів, різні строки відповідальності, різні підходи до претензійної роботи. Саме тому навіть при наявності єдиного договору [1, с. 10] фактичне виконання перевезення залишається фрагментованим.

Окремий блок — митне законодавство. Закон [1, ст. 3, 9, 13] прямо відсилає до Митного кодексу України [7]. Митні процедури є критичним елементом мультимодальних перевезень, особливо міжнародних. Навіть якщо логістика організована ефективно, затримки на митниці можуть звести переваги до нуля. Але закон лише частково вирішує це питання через механізм попереднього документального контролю [1, с. 9], він не усуває основну проблему — різні процедури залежно від виду транспорту та відсутність повної цифровізації. Тобто фактично митне регулювання залишається «вузьким місцем» системи.

Ще один важливий блок — законодавство про транспортно-експедиторську діяльність. Закон «Про транспортно-експедиторську діяльність» [8] фактично дублює частину функцій оператора мультимодального перевезення. Між експедитором і оператором мультимодального перевезення немає чіткого розмежування. У практиці часто це одна і та сама компанія, але правовий статус різний. Це створює невизначеність у

питаннях відповідальності та договорів.

Крім того, важливу роль відіграють міжнародні нормативні акти. У [1, с. 3] закріплено їх пріоритет. На практиці застосовуються CMR (для автомобільних перевезень), СМГС/СІМ (для залізничних) та коносаменти (для морських перевезень). Проблема полягає у відсутності єдиного універсального міжнародного документа для мультимодальних перевезень. Через це оператор змушений комбінувати різні правові режими в межах одного перевезення. Фактично це суперечить самій ідеї «єдиного перевезення».

Окремо слід враховувати закон України «Про перевезення небезпечних вантажів» [9], екологічні норми, ветеринарні та фітосанітарні вимоги. Ці акти додають ще один рівень складності, оскільки встановлюють додаткові процедури та обмеження.

Результати досліджень. Нормативну систему мультимодальних перевезень доцільно розглядати як п'ятирівневу модель, у межах якої правове регулювання формується через накладання взаємопов'язаних, але не повністю узгоджених рівнів.

Перший рівень – базовий. Це Закон України «Про мультимодальні перевезення» [1], який визначає основні правові засади: поняття [1, ст. 1], сферу дії [1, с. 2], організацію перевезень [1, с. 4] та відповідальність [1, ст. 19, 20]. Водночас він має рамковий характер і не деталізує механізми реалізації.

Другий рівень — договірно-цивільний. Формується нормами Цивільного кодексу України [2], які регулюють укладення та виконання договорів, відповідальність і відшкодування збитків. Через відсилку у [1, с. 3] цей рівень фактично забезпечує ключове регулювання, що свідчить про несамодостатність спеціального закону.

Третій рівень — галузевий транспортний. Включає закони «Про транспорт» [3], «Про залізничний транспорт» [4], «Про автомобільний транспорт» [5] та Кодекс торговельного мореплавства України [6]. Кожен із них регулює окрему ділянку перевезення, що призводить до різних правових режимів і суперечить принципу єдиного договору [1, с. 10].

Четвертий рівень — процедурно-спеціалізований. Охоплює Митний кодекс України [7], законодавство про експедиторську діяльність [8], небезпечні вантажі [9] та контрольні процедури. Незважаючи на спрощення [1, с. 9], зберігається складність і відсутність повної цифровізації.

П'ятий рівень — міжнародний. Має пріоритет [1, с. 3] і включає CMR, СІМ/СМГС, коносаментні форми. Відсутність єдиного міжнародного акту змушує комбінувати різні правові режими, що ускладнює визначення відповідальності.

Взаємодія зазначених рівнів не має системного характеру. Вони не інтегровані у єдину нормативну архітектуру, а функціонують як паралельні регуляторні підсистеми.

Висновки. Ефективний розвиток мультимодальних перевезень можливий лише за умови формування цілісної, узгодженої та сучасної нормативно-правової бази. Удосконалення нормативного забезпечення має здійснюватися за кількома напрямками. Необхідно забезпечити узгодження національного законодавства з міжнародними нормами, деталізувати положення закону на рівні підзаконних актів, уніфікувати підходи до відповідальності та документального оформлення, спростити митні процедури. Важливим є також розвиток інфраструктури мультимодальних терміналів і впровадження сучасних цифрових технологій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Про мультимодальні перевезення. Закон України від 17.11.2021 №1887-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text>
2. Цивільний кодекс України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/435-15#Text>
3. Про транспорт. Закон України від 10.11.1994 №232/94-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80#Text>
4. Про залізничний транспорт. Закон України від 04.07.1996 №273/96-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/273/96-%D0%B2%D1%80#Text>

5. Про автомобільний транспорт. Закон України від 05.04.2001 №2344-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text>
6. Кодекс торговельного мореплавства України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176/95-%D0%B2%D1%80/ed20210723#Text>
7. Митний кодекс України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4495-17#Text>
8. Про транспортно-експедиторську діяльність. Закон України від 01.07.2004 № 1955-IV. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1955-15#Text>
9. Про перевезення небезпечних вантажів. Закон України від 06.04.2000 № 1644-III. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1644-14#Text>

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ В ОБЕРТОВИХ МЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЯХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

¹Серебряков А.К., ¹Тарануха В.Ю., ²Бушма О.В.

¹ Інститут інформаційних технологій та систем Національної академії наук України
(Україна)

² Київський столичний університет імені Бориса Грінченка
(Україна)

Вступ. Стрімкий розвиток сучасних інформаційних технологій в сфері транспорту справив значний вплив на способи аналізу роботи двигунів, пристроїв та інших обертових механізмів рухомого складу в цілому. Розпізнавання несправного технічного стану таких елементів механічних систем є критично важливим для діагностики транспортних засобів, дає змогу своєчасно виявляти їх пошкодження, що сприяє безпеці руху та запобігає потенційним аваріям.

Сучасні промислові нейромережеві підходи до діагностики техніки демонструють високу точність класифікації ознак несправностей в обертових механізмах [1]. Проте, їх широке застосування ускладнюється істотними практичними обмеженнями. Такі рішення вимагають великих обсягів маркованих даних для навчання у різних експлуатаційних умовах. В той же час, нейромережі мінімального розміру та набору ознак демонструють порівняно невисоку якість розпізнавання [2]. Тому для оцінки технічного стану транспортних засобів є потреба у прикладній системі, здатній забезпечувати достатню надійність розпізнавання зі задовільною швидкістю. Вона має зберігати високу розрізняльну здатність і бути адаптованою під різні режими роботи обертових механізмів.

Актуальність досліджень. Питання розрізнення справних та пошкоджених пристроїв, класифікації їх несправностей, як правило, зводиться до оброблення спектру акустичного сигналу [3, 4]. У наявних роботах амплітудна модуляція не використовується як центральна компактна ознака в поєднанні з оцінкою виражених частот спектру. Така модуляція є наслідком впливу обертання механізму в робочому режимі на акустичний сигнал. Для її ефективного аналізу було запропоновано алгоритм Детекції Піків на Границях Циклів (ДПГЦ), який використовує дані про розподіл домінантних піків виражених частот акустичних сигналів для виявлення несправностей у механічних пристроях із двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ) за їх портретами [5]. Початкова версія засобу не використовувала спектральну інформацію повноцінно, спираючись на аналіз амплітудної модуляції за розподілом піків.

Однак, детальний аналіз алгоритму ДПГЦ та слуховий контроль акустичних сигналів двигунів мотоциклів показали, що розбіжність в частоті амплітудної модуляції поміж сигналами недостатня для того щоб пояснити, чому сигнали мають різне звучання. Поглиблене дослідження вказує на необхідність включення додаткової спектральної характеристики до формування портретів сигналів.

Постановка задачі. Для надійного аналізу акустичних сигналів двигунів, розрізнення їх справного та несправного станів є перспективним використання залежності поміж піками амплітудної модуляції та наявною спектральною інформацією. Для цього має бути виконано інтелектуальну інтеграцію репрезентативної ознаки спектру в портрет сигналу з урахуванням збереження мінімальної обчислювальної складності в рамках ресурсоефективного рішення.

Метою роботи є підвищення надійності акустичного виявлення несправностей в обертових механічних пристроях транспортних засобів шляхом врахування залежності основної частоти їх аудіосигналів від амплітудної модуляції, спричиненої роботою двигуна. На цій основі виконано об'єднання ознак в єдиний репрезентативний показник, на основі

якого оцінюється технічний стан відповідного пристрою.

У результаті запропоновано та протестовано покращений засіб виявлення несправностей в механічних пристроях, який використовує розширену за рахунок спектральних даних акустичних сигналів множину ознак технічного стану об'єкту. Для оцінки надійності результати виявлення несправностей протестовано за допомогою Байєсівського класифікатора [6].

Результати дослідження. Для аудіосигналів ДВЗ мотоциклів [5] були окремо взяті основні частоти із застосуванням функції *yin* python-пакету для аудіо-аналізу *librosa* [7]. Вона реалізує метод оцінки основної частоти з використанням автокореляції. Спочатку обчислюється нормалізована різницева функція за віконним обробленням сигналу з перекриттям. Далі, перший мінімум у різницевій функції нижче порогу обирається як оцінка періоду сигналу. Оцінений період уточнюється за допомогою параболічної інтерполяції перед перетворенням у відповідну частоту.

Отримані значення основної частоти разом із даними про розподіл піків за методом ДПГЦ об'єднано в розширену множину ознак для отримання портретів аудіосигналів, як це показано на рис. 1.

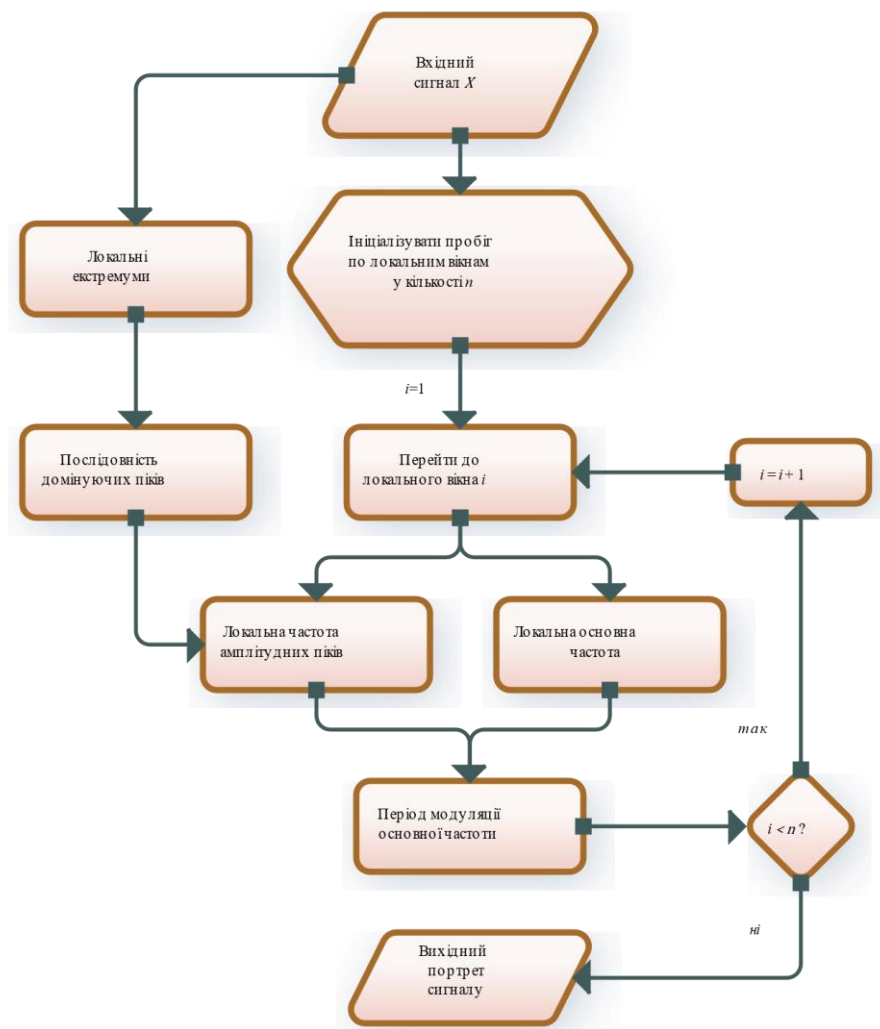


Рисунок 1 — Блок-схема підходу на основі періоду модуляції основної частоти

Отримані піки використано в якості ознаки, яка вказує на період модуляції основної частоти. Для порівняння з портретами аналогічне оброблення було виконано для решти вхідних сигналів. Результати аналізу розширеного датасету [6] на основі відстаней від значень портретів справних ДВЗ, виконаного аналогічним чином за розширеною множиною ознак, показано в табл. 1.

Таблиця 1 — Відстані від портретів аудіосигналів справних ДВЗ за розширеним показником

Модель мотоцикла	Справні				Пошкоджені			
	S51	ETZ	YZF	CBR	S51	ETZ	YZF	CBR
Simson S51 (S51)	1.7	2.9	18.4	17.1	25.6	14.8	10.0	6.2
MZ ETZ-250 (ETZ)	2.6	1.7	22.5	20.6	38.7	23.8	11.1	5.6
Yamaha YZF-R6 (YZF)	14.3	12.6	0.5	1.2	35.5	26.8	8.4	10.8
Honda CBR600RR (CBR)	21.8	19.0	2.0	1.3	56.5	42.3	12.3	16.2

Результати демонструють, що, по-перше, для портрету кожного двигуна проміжок до його справних аудіосигналів значно менший, аніж до несправних отже зберіглася можливість розрізнити стан «справний-пошкоджений». По-друге, підвищилась надійність розпізнавання двох- та чотирьох-тактних типів ДВЗ поміж собою, оскільки збільшився проміжок, який їх розділяє. Як для запропонованого класифікатора, так і для тих, що використовують SVM або похідні від них, більший проміжок – це більший запас стійкості рішення до нових або дещо збурених даних, що безпосередньо забезпечує підвищення надійності визначення стану об'єкту [8, 9]. Те саме стосується і моделей в межах типу – для них чисельні відстані теж збільшились. Це свідчить про доцільність поєднання частоти піків та основної частоти в єдиний показник, який характеризує період її модуляції. Хоча кожну з ознак можливо використовувати окремо, в такому випадку з високою ймовірністю очікується зниження надійності розпізнавання. Тому їх відокремлене застосування може виявитись недостатнім. В цілому, вдалося отримати покращений, ніж у [5], результат розпізнавання пошкоджених ДВЗ та підвищити надійність розмежування окремих моделей мотоциклів поміж собою.

Для оцінки ефективності розширеної множини ознак було застосовано Байєсівські класифікатори, аналогічно [6]. В дослідженні використано статистичні портрети від початкового (Б1) та розширеного (Б2) датасету. Порівняння було виконано також і у випадку переліку ознак для розширеного датасету (Б3). Експеримент із використанням класифікаторів на основі запропонованого показника показав, що, попри очікуване падіння точності через збільшення вибірки та збільшення кількості типів несправностей, перехід до нього мінімізує втрату в надійності розпізнавання. Розроблений засіб на основі розширеної множини ознак демонструє вищу надійність визначення несправностей і є більш робастним до розширення датасету.

Таким чином, метод Баєса та додатково розглянутий повний перелік ознак, а саме: середнє, дисперсія, медіана, медіана абсолютних відхилень, квантиль р10, квантиль р90, матсподівання, коефіцієнт варіації, автокореляція з затримкою [10, 11] не є необхідними для наявної вибірки записів звуків роботи двигунів щодо визначення їх стану.

В подальшій роботі слід виконати розширену апробацію запропонованої множини ознак. Вона може бути реалізована за рахунок збільшення датасету додатковими записами роботи двигунів автомобілів або інших типів ДВЗ з різною кількістю циліндрів та конфігурацією. До них має бути застосована аналогічна процедура отримання ознак. Передбачається, що запропонований засіб буде спроможний чітко розділяти справні та пошкоджені двигуни автомобілів за пороговим значенням, а також розрізняти автомобілі та мотоцикли. Важливим є використання оптимального методу визначення як основної частоти сигналу окремо, так і всього спектру. Слід розглянути інші прийнятні підходи для порівняння з використаною функцією *uip*. Суміжним важливим чинником є вибір оптимальної ширини полоси пропускання (довжини вікна, в якому виконується аналіз), що також вимагає подальших розвідок.

Висновки. Аналітично протестовано та виконано розширену апробацію засобу виявлення несправностей у механічних пристроях із ДВЗ. Показано, що покращений алгоритм аналізу акустичних сигналів та розроблений на його основі засіб формування їх

портретів надає більш повну інформацію для розпізнавання як несправностей, так і окремих моделей пристроїв. Описане розширення множини ознак для характеристики періоду модуляції основної частоти є доцільним для отримання більш надійних результатів. Запропонований показник слід застосувати до розширеного класу засобів для ідентифікації об'єктів та вирішення пов'язаних задач.

Ефективність засобу підтверджено експериментально на аудіозаписах роботи двигунів мотоциклів розширеного датасету [6]. При цьому, засіб зберігає робастність і залишається швидким в обчислювальному відношенні та може бути використаний для класифікації звукових портретів різних типів двигунів, апаратів, приладів, агрегатів та інших технічних об'єктів.

Подяка. Дослідження виконано за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту «Технологія акустичного виявлення та пеленгування об'єктів з використанням різних типів сенсорів» (реєстраційний номер 2025.05/0059).

ЛІТЕРАТУРА

1. Z. Ye, Liu Z., Wang H. Review on Sound-Based Industrial Predictive Maintenance: From Feature Engineering to Deep Learning. *Mathematics*. 2025. vol. 13. is. 11. pp. 1724.
2. Muthumala, Uditha, Yuxuan Zhang, Luciano Sebastian Martinez-Rau, and Sebastian Bader. Comparison of tiny machine learning techniques for embedded acoustic emission analysis. In 2024 IEEE 10th World Forum on Internet of Things (WF-IoT), pp. 444-449. IEEE, 2024.
3. Amarnath, M. and Krishna, I.P., 2014. Local fault detection in helical gears via vibration and acoustic signals using EMD based statistical parameter analysis. *Measurement*, 58, pp. 54- 64.
4. Kedadouché, M., Thomas, M. and Tahan, A.J.M.S., 2016. A comparative study between Empirical Wavelet Transforms and Empirical Mode Decomposition Methods: Application to bearing defect diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 81, pp.88- 107.
5. Compact Acoustic Signal Portraits for Resource-Efficient Mechanical Fault Detection / O. Volkov, and others. *Electronics Letters*. 2026. Vol.62, №1. pp. e70551.
6. Сєребряков А., Тарануха В., Бушма О. Тестування ресурсоефективного методу виявлення поломок механічних пристроїв за аудіосигналами. Матеріали 3-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні системи та технології: результати і перспективи» (Київ, 10 березня 2026 р.) Київ, 2026. С.126-129.
7. De Cheveigné, Alain, and Hideki Kawahara. YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music. *The Journal of the Acoustical Society of America* 111.4 (2002): 1917-1930.
8. Cortes, C. and Vapnik, V., 1995. Support-vector networks. *Machine learning*, 20(3), pp.273-297.
9. Du, K.L., Jiang, B., Lu, J., Hua, J. and Swamy, M.N.S., 2024. Exploring kernel machines and support vector machines: Principles, techniques, and future directions. *Mathematics*, 12(24), p.3935.
10. Kumar A., Solanki S. S., Chandra M. Hilbert spectrum based features for speech/music classification. *Serbian Journal of Electrical Engineering*. 2022. vol.19.2 p.239—259.
11. Amarnath M., Krishna IR P. Local fault detection in helical gears via vibration and acoustic signals using EMD based statistical parameter analysis. *Measurement*. 2014. vol.58. p.154–164.

ТРАНСПОРТНА ЗАДАЧА З ПРІОРИТЕТАМИ ПОСТАЧАЛЬНИКІВ ВАНТАЖУ

Славич В. П., Бабійчук К. О.

*Херсонський національний технічний університет
(Україна)*

Вступ. Ефективне управління транспортними потоками є одним із ключових факторів забезпечення стабільного функціонування сучасних логістичних систем. Задачі розподілу вантажів між постачальниками та споживачами виникають у багатьох сферах діяльності, зокрема в промисловості, енергетиці, аграрному секторі, торгівлі, медицині та гуманітарній логістиці. Для формалізації таких процесів широко використовується класична транспортна задача, основною метою якої є мінімізація сумарних витрат на перевезення за умови повного задоволення потреб споживачів і використання ресурсів постачальників.

Разом із тим, сучасні умови функціонування транспортно-логістичних систем характеризуються високим рівнем динамічності та неоднорідності учасників перевезень. У практичній діяльності часто виникають ситуації, коли окремі постачальники мають вищий рівень важливості порівняно з іншими. Це може бути пов'язано зі стратегічною значущістю вантажів, необхідністю дотримання жорстких термінів доставки, соціальними чинниками або забезпеченням безперервності критичних виробничих процесів.

У таких умовах використання лише критерію мінімізації витрат не завжди дозволяє отримати рішення, які є ефективними з практичної точки зору. Тому виникає необхідність розроблення моделей транспортних задач, у яких поряд із економічною ефективністю враховується ієрархія важливості постачальників вантажу.

Актуальність досліджень. Сучасні дослідження у сфері транспортної логістики орієнтовані на розширення класичних моделей транспортних задач шляхом врахування багатокритеріальності, невизначеності, адаптивності та динаміки транспортних процесів. Значна увага приділяється оптимізації маршрутів перевезень, скороченню витрат, зменшенню часу доставки та підвищенню стійкості логістичних систем.

Сучасні транспортні задачі лінійного програмування ускладнюються за рахунок багатокритеріальності, пріоритетності, невизначеності та динамічності логістичних систем.

Узагальнену математичну та інформаційну модель транспортної задачі для підвищення ефективності вантажних перевезень представлено в роботі [1], однак у ній не враховано дискретні пріоритети постачальників та їх ієрархічний вплив на формування плану перевезень.

У праці [2] розглянуто структурні особливості та групування постачальників, проте не передбачено лексикографічної оптимізації та механізму збереження пріоритетів.

У дослідженні [3] проаналізовано оптимізацію процесів доставки вантажів на рівні підприємств, але не розглянуто формальне введення ієрархії постачальників.

У статті [4] враховано використання різних типів транспортних засобів, однак пріоритетне обслуговування постачальників не досліджується.

У роботі [5] запропоновано багатокритеріальні моделі з нечіткими параметрами, але застосування вагових коефіцієнтів не забезпечує жорсткої ієрархії пріоритетів.

У праці [6] враховано пріоритетність замовлень у багаторівневій системі прийняття рішень, проте не модифіковано класичну транспортну задачу.

У дослідженні [7] розглянуто екологічні та стохастичні аспекти транспортного планування, але не запропоновано механізму збереження пріоритетної структури.

У роботі [8] представлено динамічні транспортні системи з адаптивною маршрутизацією, однак основну увагу приділено маршрутизації, а не розподілу вантажопотоків.

У праці [9] досліджено інтегровані системи комбінованих перевезень, проте

пріоритети постачальників у межах класичної транспортної задачі не формалізовано.

У статті [10] узагальнено методи штучного інтелекту для оптимізації логістичних процесів, але не запропоновано модель з чіткою лексикографічною структурою критеріїв.

У роботі [11] досліджено екологічно орієнтовані моделі маршрутизації, однак значущість постачальників не враховується.

У праці [12] запропоновано багатокритеріальні моделі доставки швидкопсувних товарів, але без урахування ієрархії постачальників.

У дослідженні [13] розглянуто прикладні алгоритми оптимізації у спеціалізованих логістичних системах, проте відсутня формалізація транспортної задачі з дискретними пріоритетами постачальників.

У статті [14] описано гібридні інтелектуальні системи маршрутизації, але не розглянуто модифікацію методу потенціалів для збереження пріоритетів.

У роботі [15] систематизовано задачі маршрутизації транспортних засобів, однак транспортна задача з лексикографічною оптимізацією та пріоритетами постачальників залишається недостатньо дослідженою.

Таким чином, аналіз сучасних наукових праць показує, що питання формального врахування пріоритетності постачальників у класичній транспортній задачі досліджено недостатньо. У більшості моделей усі постачальники вважаються рівнозначними, а основним критерієм оптимізації залишається мінімізація транспортних витрат. Це обмежує можливість використання таких моделей у системах, де необхідне першочергове обслуговування окремих категорій вантажів.

Особливо актуальним врахування пріоритетності є для перевезення гуманітарної допомоги, медичних препаратів, енергоресурсів, продукції з обмеженим терміном зберігання, а також для забезпечення функціонування критично важливих виробничих і транспортних систем. У таких випадках першочергове значення має не лише економічна ефективність, а й своєчасність та гарантованість перевезення вантажів від найбільш важливих постачальників.

У зв'язку з цим актуальним є розроблення математичних моделей транспортних задач, які дозволяють поєднати критерій мінімізації витрат із механізмом пріоритетного обслуговування постачальників.

Постановка задачі. Метою дослідження є розроблення концептуальної математичної моделі транспортної задачі з урахуванням пріоритетів постачальників вантажу та формування алгоритмічного підходу до її розв'язання.

У запропонованій моделі кожному постачальнику ставиться у відповідність певний рівень пріоритету, який визначає важливість першочергового перевезення вантажу від нього. На відміну від класичної транспортної задачі, у якій усі постачальники вважаються рівнозначними, запропонований підхід дозволяє формалізувати ієрархію учасників транспортного процесу.

Для розв'язання задачі використовується лексикографічний підхід до оптимізації. Основним критерієм є забезпечення максимально можливого перевезення вантажів від постачальників із вищим рівнем пріоритету. Другорядним критерієм виступає мінімізація сумарних транспортних витрат.

Таким чином, задача полягає у формуванні такого плану перевезень, який одночасно забезпечує задоволення потреб споживачів, враховує пріоритетність постачальників та дозволяє мінімізувати транспортні витрати без порушення ієрархії обслуговування.

Результати досліджень. У роботі запропоновано концептуальну модель транспортної задачі з урахуванням пріоритетів постачальників вантажу. Основою моделі є використання лексикографічного принципу оптимізації, який забезпечує домінування критерію пріоритетності над критерієм мінімізації витрат.

Запропонований підхід дозволяє уникнути використання вагових коефіцієнтів, які часто застосовуються у багатокритеріальних задачах та можуть призводити до суб'єктивності під час вибору параметрів моделі. Натомість у роботі використовується

чітка ієрархічна структура критеріїв, за якої покращення показників менш пріоритетних постачальників не допускається за рахунок зменшення обсягів перевезення для більш важливих учасників транспортного процесу.

Для побудови початкового плану перевезень розроблено модифікований алгоритм формування опорного плану. Його особливістю є поетапний розгляд постачальників відповідно до спадання рівня їх пріоритетності. У межах кожного рівня пріоритету вибір напрямків перевезення здійснюється за критерієм найменшої вартості доставки. Це дозволяє враховувати структуру пріоритетів уже на початковому етапі формування транспортного плану.

Подальше вдосконалення плану перевезень здійснюється за допомогою модифікованого методу потенціалів. У процесі оптимізації додатково перевіряється допустимість перерозподілу вантажопотоків між постачальниками різних рівнів пріоритетності. Зміна плану допускається лише у випадку, якщо вона не призводить до погіршення умов перевезення для постачальників із вищими пріоритетами.

Запропоноване обмеження на допустимі цикли перерахунку має евристичний характер і спрямоване на збереження пріоритетної структури задачі в процесі оптимізації. Такий підхід дозволяє забезпечити узгодженість між економічними критеріями та вимогами пріоритетного обслуговування.

Розроблена модель може бути використана під час планування перевезень у транспортно-логістичних системах різного призначення. Найбільш доцільним є її застосування у задачах, пов'язаних із перевезенням гуманітарних вантажів, медичних препаратів, енергоресурсів, швидкопсувної продукції та інших категорій вантажів, для яких важливим є забезпечення першочергового обслуговування окремих постачальників.

Висновки. У роботі запропоновано концептуальну математичну модель транспортної задачі з урахуванням пріоритетів постачальників вантажу. На відміну від класичної транспортної задачі, запропонований підхід дозволяє враховувати ієрархію важливості постачальників під час формування плану перевезень.

Основою моделі є лексикографічний підхід до оптимізації, який забезпечує домінування пріоритетності постачальників над критерієм мінімізації транспортних витрат. Це дозволяє формалізувати задачі, у яких економічна ефективність повинна поєднуватися з необхідністю першочергового перевезення критично важливих вантажів.

У роботі також запропоновано модифікований алгоритм побудови опорного плану та вдосконалений метод потенціалів, який враховує обмеження, пов'язані з пріоритетністю постачальників. Запропонований підхід дозволяє зберігати пріоритетну структуру задачі в процесі оптимізації транспортного плану.

Отримані результати можуть бути використані для побудови моделей управління транспортними потоками у логістичних системах різної складності. Перспективою подальших досліджень є врахування пріоритетів не лише постачальників, а й споживачів, а також розроблення динамічних моделей транспортних задач зі змінними рівнями пріоритетності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Slavych V. P. et al. (2025). Mathematical and information model of a special type of transport task as a tool for increasing economic efficiency of freight transportation. *Artificial intelligence as a tool to protect the economy from disinformation: innovative solutions and international practices*. Riga, Latvia: Baltija Publishing. 258 p. <http://doi.org/10.30525/978-9934-26-586-0>
2. Slavych V. P., Dobrova K. D. (2020). Model' ta metod znakhodzhennya opornoho ta optimal'nykh planiv modifikovanoyi transportnoyi zadachi u vypadku hrupuvannya postachal'nykiv vantazhu. *Prykladni pytannya matematychnogo modelyuvannya*. No 1. P. 187–193. <http://doi.org/10.32782/2618-0340/2020.1-3.19>
3. Ghosh S., Roy S. K., Fügenschuh A. (2022). The multi-objective solid transportation

problem with preservation technology using Pythagorean fuzzy sets. *International Journal of Fuzzy Systems*. Vol. 24. P. 2687–2704. <http://doi.org/10.1007/s40815-021-01224-5>

4. Slavych V. P., Yel'nyk V. V. (2023). Optymizatsiya protsesu dostavky vantazhu hazopostachal'noho pidpryyemstva. *Visnyk KhNTU*. No 2 (85). P. 84–89. <http://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.2.11>

5. Babaee Tirkolaee E., Aydin N. S. (2022). Integrated design of sustainable supply chain and transportation network using a fuzzy bi-level decision support system for perishable products. *Expert Systems with Applications*. Vol. 195. 116628. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116628>

6. Slavych V. P., Biloushchenko D. Yu. (2025). Model of the transport problem in the case of cargo delivery by two different types of vehicles. *Naukovyi visnyk KhDMA*. No 31. P. 178–186. <http://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.2.31.178-186>

7. Babaei A. et al. (2023). Sustainable transportation planning considering traffic congestion and uncertain conditions. *Expert Systems with Applications*. Vol. 227. 119792. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119792>

8. Danchuk V. et al. (2023). The optimization of cargo delivery processes with dynamic route updates in smart logistics. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 2 (3). P. 64–73. <http://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277583>

9. Hatzenbühler J. et al. (2023). Modular vehicle routing for combined passenger and freight transport. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. Vol. 173. 103688. <http://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103688>

10. Chen W. et al. (2024). Artificial intelligence in logistics optimization with sustainable criteria: a review. *Sustainability*. Vol. 16 (21). 9145. <http://doi.org/10.3390/su16219145>

11. Song R. et al. (2023). Optimizing freight vehicle routing in dynamic time-varying networks with carbon emission analysis. *Sustainability*. Vol. 15 (21). 15504. <http://doi.org/10.3390/su152115504>

12. Liang X. et al. (2023). Bi-objective multi-period vehicle routing for perishable goods delivery considering customer satisfaction. *Expert Systems with Applications*. Vol. 220. 119712. <http://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119712>

13. Ait Mamoun K. et al. (2024). Vehicle routing optimization algorithms for pharmaceutical supply chain: a systematic comparison. *Transport and Telecommunication*. Vol. 25 (2). P. 161–173. <http://doi.org/10.2478/ttj-2024-0012>

14. Daneshvar H. et al. (2023). Hybrid intelligent transportation system for routing optimization. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*. Vol. 6 (2). P. 907–932. <https://doi.org/10.31181/dma622023899>

15. Konstantakopoulos G. D. et al. (2022). Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification. *Operations Research International Journal*. Vol. 22. P. 2033–2062. <http://doi.org/10.1007/s12351-020-00600-7>

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ АЛГОРИТМІВ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ КАНАЛІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЕРТАННЯ РОТОРУ ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ

Тарасов С.В., Молотков О.Н.

*Інститут транспортних систем та технологій НАН України
(Україна)*

Вступ. Виробництво енергії з відновлюваних (або альтернативних) джерел зростає стрімкими темпами. Одним з таких невичерпних джерел енергії є вітер. Серед вітроенергетичних установок (ВЕУ) широке розповсюдження отримали вертикально-осьові ВЕУ. Можна перелічити такі переваги вертикально-осьових ВЕУ як незалежність функціонування від напрямку вітру, можливість заміни консольного кріплення осі ротора до двох опорного, можливість розміщення споживача енергії в основі ВЕУ, що знижує вимоги до висоти, міцності та жорсткості опори, спрощення конструкції лопатей та їх матеріалоемності тощо. При розробці будь-яких ВЕУ важливо використовувати максимальну доступну потужність вітру для досягнення її роботи на максимальній потужності, для забезпечення чого використовуються системи стабілізації (СС) обертання ротора навколо точки максимальної потужності. Перспективним напрямом створення конструкції таких систем є використання ротору Дар'є змінної конфігурації, підтримка роботи якого навколо точки максимуму потужності здійснюється керованими сумісними змінами довжини лопатей і траверс ротора. Розробки останнього десятиліття довели що вертикально-осьові ВЕУ невеликої потужності із ротором Дар'є змінної конфігурації можуть успішно функціонувати як на кришах домів так і на палубах окремих суден.

Актуальність досліджень. Особливості динаміки СС швидкістю обертання ротора вертикально-осьових ВЕУ, як об'єкта управління, що стабілізується одночасною зміною довжини лопатей і траверс – зміною конфігурації ротора ВЕУ — розглянуті в роботі [1]. Основною з розглянутих проблем є забезпечення працездатності каналів стабілізації при наявності залежності моменту інерції ротору від змін довжини траверс. Для її розв'язання запропоновані алгоритми та методика розподілу навантаження на канали стабілізації, доведені їх стійкість та можливість керування піковими та кінцевими значеннями довжини лопатей і траверс, що дозволяє зменшити зміни моменту інерції ротора при змінах довжини траверс. В роботі [2] досліджено функціонування системи розподілу навантаження каналів стабілізації обертання ротора Дар'є змінної конфігурації з урахуванням змін за часом коефіцієнтів лінеаризації моделі. Моделювання динамічних алгоритмів розподілу навантаження на канали стабілізації вітрової турбіни виконано в роботі [3], доведено суттєве покращення динаміки системи стабілізації — зменшення відхилень довжини траверс ротору від їх номінальних значень і, як слідство, практична незмінність моменту інерції ротора ВЕУ. Продовження робіт в цьому напрямку, а саме розробка ефективних алгоритмів стабілізації обертання ротора Дар'є вертикально-осьових ВЕУ є задачею актуальною, такою що має не аби який практичний інтерес. В роботі, що пропонується, на основі чисельного моделювання досліджуються нелінійні алгоритми розподілу навантаження каналів стабілізації обертання ротора ВЕУ, керованого сумісними змінами довжини лопатей і траверс. Доведені стійкість і працездатність запропонованих нелінійних алгоритмів. Результати досліджень можуть бути використані при обґрунтуванні конструктивних рішень при проектуванні вертикально-осьових ВЕУ із ротором Дар'є.

Постановка задачі. В роботі [3] проведена оцінка ефективності динамічних алгоритмів стабілізації обертів ротора із змінною довжиною лопатей та траверс шляхом дослідження рівнянь у відхиленнях

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = (k_1\Delta V + k_{2h}\Delta H + k_{2r}\Delta R - \Delta\omega) / T ,$$

$$\begin{aligned}\frac{d\Delta H}{dt} &= (k_{2h}K_2\Delta H + ((K_1T - K_2)\Delta\omega + k_1K_2\Delta V)(1-a))/T, \\ \frac{d\Delta R}{dt} &= (k_{2r}K_2\Delta R + ((K_1T - K_2)\Delta\omega + k_1K_2\Delta V)a)/T,\end{aligned}\quad (1)$$

де $\Delta\omega$ — відхилення швидкості обертів ротора змінної конфігурації, K_1 , K_2 — коефіцієнти зворотних зв'язків каналів стабілізації, T , k_1 , k_{2h} , k_{2r} — коефіцієнти лінеаризації, обчислені за конструктивними параметрами БЕУ та умовами її роботи, ΔV — зміна швидкості вітру, $a \in [0,1]$ — змінний за часом безрозмірний параметр розподілу навантаження на канали стабілізації. Значення a обчислюється згідно співвідношення

$$a(t) = \begin{cases} 1/2, & \text{якщо } |\Delta R / R_o| < 0,05 \\ 1/5, & \text{якщо } |\Delta R / R_o| \geq 0,05 \end{cases}, \quad (2)$$

де R_o — номінальне значення довжини траверс, або із співвідношення

$$a(t) = a_o + \Delta R(t), \quad (3)$$

де a_o — деяке незмінне початкове значення a з інтервалу $[0, 1]$.

В якості недоліків алгоритмів (2), (3) необхідно відмітити:

- скачко подібну зміну залежності параметру a від часу згідно алгоритму (2), що призводить до ударної зміни процесів стабілізації в системі;
- можливість перетворення значення a в алгоритмі (3) на від'ємне при значних від'ємних значеннях ΔV , що неприпустимо з точки зору умов роботи системи (1). Для усунення відміченого недоліку алгоритму (3) змінимо співвідношення (3) на

$$a(t) = a_o + \text{sign}(\Delta V(t)) \cdot \Delta R(t) = \begin{cases} a_o + \Delta R(t), & \text{при } \Delta V(t) \geq 0 \\ a_o - \Delta R(t), & \text{при } \Delta V(t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

і проведемо відповідне моделювання стосовно змін поведінки системи (1), (4). При цьому будемо вважати що зміни $\Delta H(t)$ і $\Delta R(t)$ викликають відповідні зміни моменту інерції J ротора БЕУ та коефіцієнтів лінеаризації T , k_{2h} , k_{2r} , а номінальні значення параметрів системи (1) вважаються незмінними і приймають значення, наведені в роботі [1].

Результати досліджень. При прийнятих припущеннях система рівнянь (1), (4) перетворилась на нелінійну, динаміка якої більш складна ніж вихідної лінійної. Традиційно динамічні властивості систем вивчають згідно їх реакцій на типові впливи, такі як одинична ступенева функція, лінійно наростаюча функція, імпульсна (дельта) функція, синусоїдальна гармонічна функція тощо. Аналіз реакцій системи (1), (4) на перелічені типові впливи і порівняння їх із реакціями вихідної лінійної системи дозволить отримати інформацію, яка може бути врахована в подальших дослідженнях. В усіх розрахунках значення коефіцієнтів зворотних зв'язків вважались дорівнюючими $K_1 = -6$, $K_2 = -30$, значення a_o та незмінне значення a вихідної лінійної системи вважались дорівнюючим $1/2$. Параметри вихідної лінійної системи дорівнювались номінальним.

Реакції системи $\Delta\omega(t)$ і $\Delta R(t)$ на одиничну ступеневу функцію $\Delta V(t) = 1(t)$ — перехідні функції — наведені на рис. 1 і 2. Цифрою 1 на них позначено реакції вихідної лінійної системи, цифрою 2 — реакції системи із нелінійною залежністю параметра a (4). Аналіз наведених залежностей дозволяє зробити наступні висновки:

- обидві системи демонструють стійку поведінку; статична помилка відсутня;
- пікове значення $\Delta\omega$ вихідної лінійної системи дещо менше за значення нелінійної системи;
- пікове та кінцеве значення ΔR нелінійної системи більше ніж у чотири рази менше за відповідні значення вихідної лінійної системи;

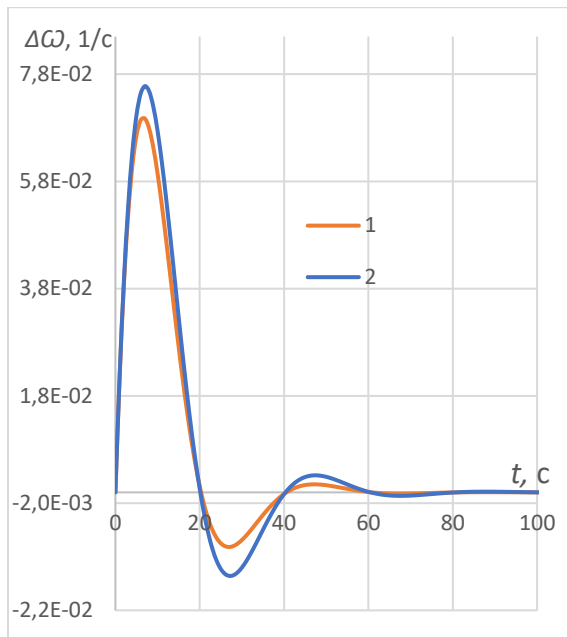


Рисунок 1 — Залежності $\Delta\omega$, $1/c$ і від часу t , c

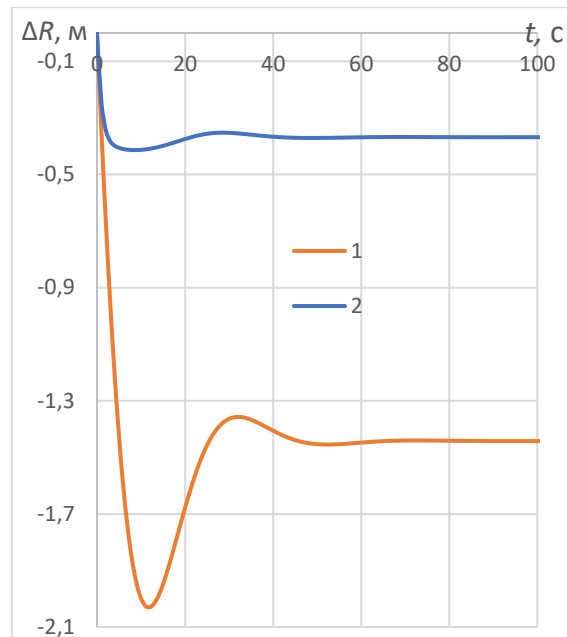


Рисунок 2 — Залежності ΔR , m від часу t , c

- довжина перехідних процесів практично незмінна, коливальність перехідної функції ΔR нелінійної системи суттєво зменшилась.

Реакції системи $\Delta\omega(t)$, $\Delta R(t)$ на лінійно наростаючу функцію $\Delta V(t) = t$ наведені на рис. 3 і 4 відповідно. Позначення наведених реакцій аналогічні попереднім.

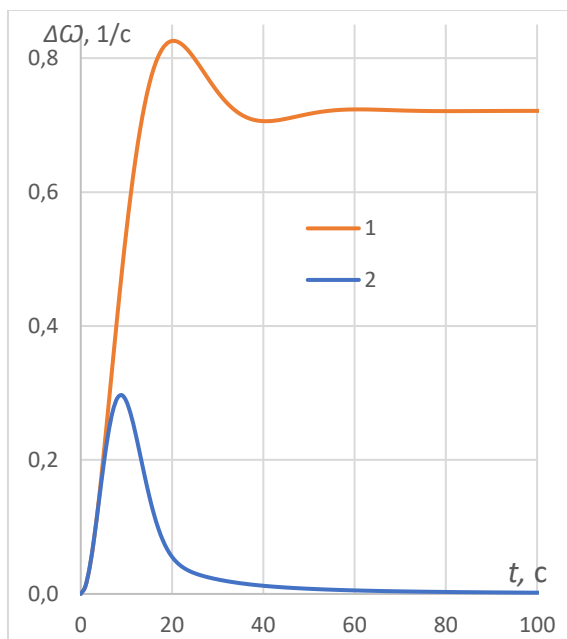


Рисунок 3 — Залежності $\Delta\omega$, $1/c$ і від часу t , c

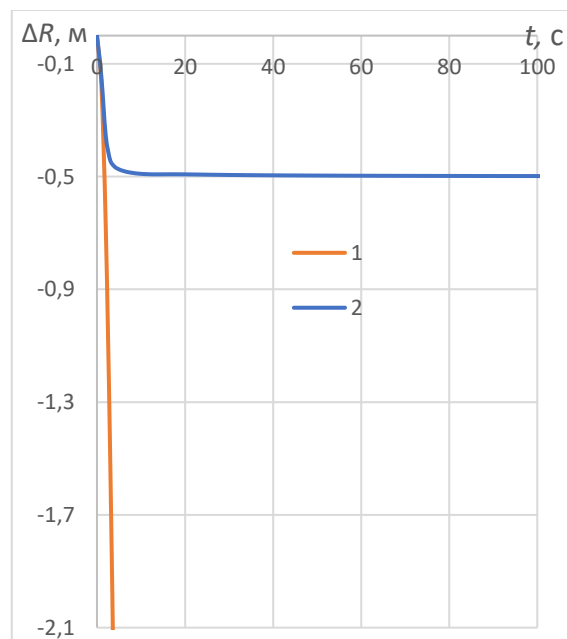


Рисунок 4 — Залежності ΔR , m від часу t , c

Аналіз наведених на рис. 3, 4 залежностей і додатково розрахованої залежності $\Delta H(t)$ дозволяє зробити наступні висновки:

- вихідна лінійна система (1) при впливі лінійно наростаючого сигналу втрачає працездатність в зв'язку із зростанням до нескінченності величин ΔR і ΔH ;
- система (1) із нелінійним алгоритмом (4) працездатна, має нульове кінцеве значення за змінною $\Delta\omega$ та обмежені кінцеві значення за змінними ΔR і ΔH ;

- залежність a від часу зберігається додатною при будь-яких значеннях ΔV .

Реакції системи $\Delta\omega(t)$, $\Delta R(t)$ на імпульсний вплив $\Delta V(t) = 1(t) - 2 \cdot 1(t - 50)$ із переключенням з +1 на -1 в момент часу 50 секунд наведені на рис. 5 і 6 відповідно. Позначення реакцій аналогічні попереднім.

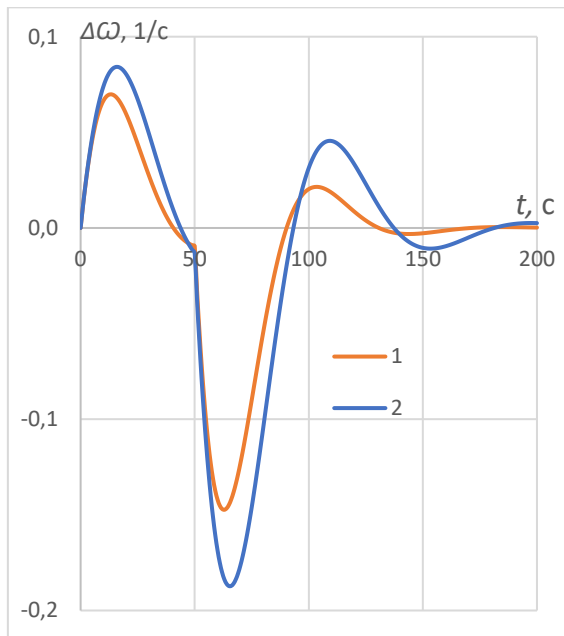


Рисунок 5 — Залежності $\Delta\omega$, 1/с і від часу t , с

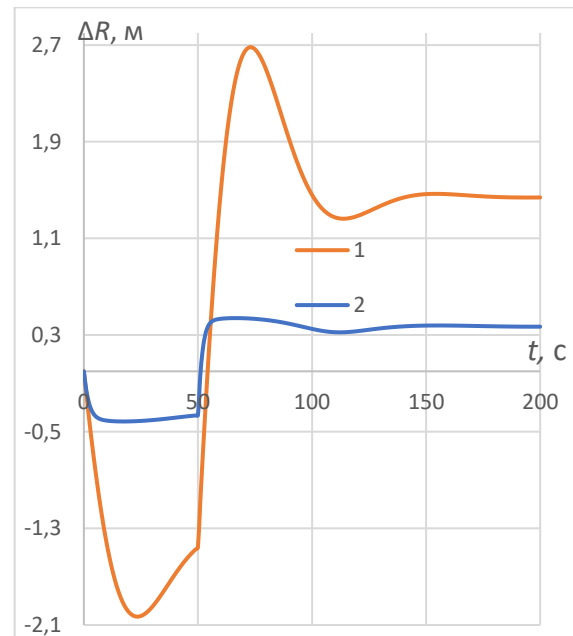


Рисунок 6 — Залежності ΔR , м від часу t , с

Наведені залежності доводять наявність ударних змін в реакціях системи, але вони пов'язані з ударними змінами вхідних впливів на неї. В цілому проведене моделювання дозволяє зробити загальний висновок про значно кращі властивості запропонованих нелінійних алгоритмів — пікові та кінцеві значення змін довжини траверс, а значить і моменту інерції ротора, зменшуються більше ніж в 4–6 разів, а недоліки динамічних алгоритмів роботи [3] відсутні.

Висновки. Проаналізовані нелінійні алгоритми розподілу навантаження каналів стабілізації обертання ротора ВЕУ змінної конфігурації, керованого сумісними змінами довжини лопатей і траверс. Проведене чисельне моделювання довело стійкість та працездатність нелінійних алгоритмів. Отримана інформація про їх динамічні властивості буде корисна в подальших дослідженнях вертикально-осьових ВЕУ із ротором Дар'є.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тарасов С. В., Молотков О. Н. Стабілізація обертання ротора Дар'є сумісними змінами довжини лопатей і траверс. Технічна механіка. 2024. № 2. С. 92–105. <https://doi.org/10.15407/itm2024.02.092>.
2. Тарасов С. В., Молотков О.Н. Моделювання процесів стабілізації обертання ротору Дар'є із змінними коефіцієнтами моделі перерозподілу навантаження каналів. Матеріали 17-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (MINTT-2025) 28–30 травня 2024р. Зб. наук. праць. – Одеса: Херсонська державна морська академія. 2025. С. 241–244.
3. Тарасов С. В., Молотков О. Н. Моделювання динамічних алгоритмів розподілу навантаження на канали стабілізації вітрової турбіни. Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (ITMM-2025), 23–24 квітня 2025 р. Зб. наук. праць. Дніпро: Український державний університет науки і технологій. 2025. С. 417–421. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2025.01.07415>.

SOFTWARE AND HARDWARE FOR MANAGEMENT OF MARITIME TRANSPORT LOGISTICS PROCESSES IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FORCES

Sharko O., Doroshenko O.

*Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)*

Introduction. Effective management of maritime transport requires constant exchange of current information and logistics data. Methods, means, software and hardware for management and decision support in maritime transport logistics are constantly being improved [1–4].

Relevance of the study. Against the background of the constant growth of international transport, the influence of the external environment is increasing, associated with variable navigation and weather conditions, the geopolitical situation, imperfect distribution of transport resources, which carry features of uncertainty, destructive functions and climatic risks. The creation of information and analytical software and hardware for managing maritime traffic in conditions of unpredictable stochastic changes in the environment is a necessary link in the general problem of increasing the efficiency of maritime transport. Information support for transport logistics is associated with computer programs that allow the user to interact via a touch screen, test processors, spreadsheets and other interfaces.

Problem statement. The tasks planned to be solved to achieve the goal of the work are: compiling an information and analytical database of maritime transport, developing methods and means of monitoring and adjusting transportation processes, forming an environment of system and application software for maritime transport, managing the processes of distributing operational resources of maritime transport under conditions of uncertainty, developing tools and technologies for constructing the distribution of transport resources while maintaining their overall balance and cost under stochastic changes in the impact of the external environment, developing mathematical models for managing complex logistics systems.

Research results. A scientific justification of the method of managing the distribution of transport resources of maritime transportation under conditions of uncertainty through the maximum flow of their use in a dynamic transport network is presented based on the synthesis of mathematical models of intellectual support for maritime transportation in complex transport logistics schemes. The proposed method was used to build a system of invariant interactions of operational resources during situational changes, which are synchronized with the moments of occurrence and expiration of the passage time of a route section with extreme environmental impacts. The formation of an interactive intellectual environment of system and software support for maritime transportation with the inclusion of innovative technologies and management methods in the process of knowledge organizations is proposed.

Scientific novelty of the work

The intellectual support of the information architecture and the concept of maritime transport management under conditions of uncertainty has been improved, which differs from the existing ones, by building a mental intelligence map that implements a diagram of connections and blocks of key management groups, allows you to cover a large amount of information, understand its relationship with associative manifestations and structure data in relation to their intended purpose.

The model for forming an interactive software and hardware intellectual environment for the management of the MTP has been further developed, which includes elements of dynamic support, which differs from the existing ones, by its orientation to a dialog mode of operation with a reference to the situation and allows for the integration and information exchange of elements of the transport logistics system with the justification of the necessary management tools.

Means of constructing methods of management of processes of maritime transport transportations are proposed, which are based on establishing analogies of resource redistribution

with the capacity of their movement routes and differ from existing ones by constructing an incidence matrix of key indicators of transport transitions with determination of probabilities of their formation, which allows synchronizing the distribution of transport resources with changes in the external environment.

The system of formation of intellectual resources of the maritime transport network in conditions of uncertainty and stochasticity of the influence of the external environment is improved, which consists in isolating the main components of transportation and differs from existing ones by the possibility of their distribution at different stages of situational management by preserving the general balance of resources and their cost during movements regarding the initialization of the residual network.

Conclusions. Based on the synthesis of mathematical models of intellectual support for maritime transport, the adaptation of mathematical models to complex transport logistics schemes has been carried out.

It is practically impossible to plan possible changes in the conditions of transitions in advance and decisions have to be made under conditions of uncertainty. Currently, a whole arsenal of methods and means of controlling fast-moving processes in conditions of uncertainty of external disturbances and influences on their parameters has been accumulated, which have their own advantages, disadvantages, features and limitations. Their practical application is hampered by a number of technical and methodological difficulties associated with the complexity of their implementation and their binding to specific tasks and situations. Therefore, any steps towards their improvement and the creation of new software and hardware tools and management models, implementation and timely adjustment of management processes and transportation technologies are of not only great scientific, but also undeniable practical interest.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sharko O., Buketov A., Klevtsov K., Sapronov O., Akimov O. Modeling of transport and logistics schemes of freight transportation under global risks. Problems of friction and wear. 2023, №3 (100), C.94–105.
2. Sharko O., Doroshenko O.: Increasing the efficiency of transport by optimising the management structure of complex logistics scheme. Modern technologies in mechanical engineering and transport, №1(24), PP. 89–101. (2025). DOI: 10.36910/automash.v1i24.1712
3. Sharko O.V., Doroshenko O.S.: Software and hardware tools for sea logistics transportation in uncertainty conditions. Bulletin of the Azov State University, Series: Technical Sciences, No 51. C. 331–339, (2025). DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.51.2025.344988>
4. Sharko O.V., Doroshenko O.S., Zhyshchynskyi Y. S.: Improving the efficiency of transport logistics in conditions of uncertainty and risk. Proceedings of the XVII International Scientific and Practical Conference «Modern Information and Innovative Technologies in Transport». MINTT-2025. May 28–30, 2025, Odesa, Ukraine, pp. 245–248 (2025).

СЕКЦІЯ:

**ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ,
ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ**

SECTION:

**RELIABILITY AND ENERGY SAVING, ENVIRONMENTAL
SAFETY AND RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES**

ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНОГО ЦИКЛУ РЕНКІНА В УМОВАХ ОБМЕЖЕННЯ НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Александровська Н.І.

*Одеський національний морський університет
(Україна)*

У сучасних умовах посилення міжнародних екологічних вимог до морського транспорту особливого значення набувають технології підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок. Відповідно до IMO GHG Strategy 2023, EEXI, CII та FuelEU Maritime судноплавна галузь повинна забезпечувати поступове скорочення викидів парникових газів та зниження вуглецевої інтенсивності перевезень. Одним із перспективних напрямів досягнення цих цілей є використання систем утилізації вторинної теплоти на базі органічного циклу Ренкіна (ORC), які дозволяють перетворювати низькопотенційну теплоту суднових систем охолодження у додаткову електроенергію.

Актуальність роботи пов'язана з необхідністю підвищення паливної ефективності суден без суттєвого ускладнення енергетичної установки та без переходу на дорогі альтернативні види палива. Особливий інтерес становлять компактні ORC-модулі обмеженої номінальної потужності, які можуть бути інтегровані у судову енергетичну систему без значної реконструкції машинного відділення. Однак ефективність таких систем значною мірою залежить від режимів експлуатації судна та кількості доступної вторинної теплоти.

У роботі досліджено екологічний ефект використання ORC-системи, інтегрованої з головним малооборотним судновим двигуном MAN 8G50ME-C10.7-HPSCR потужністю 13,76 МВт. Як прототип ORC-системи використано комерційний модуль Hydrocurrent™ ORC 125EJW компанії Calnetix Technologies, призначений для утилізації низькопотенційної теплоти суднових систем охолодження та генерації електроенергії на борту судна. Джерелом вторинної теплоти виступає вода системи охолодження двигуна.

Аналіз виконано з урахуванням реальних профілів експлуатації контейнеровозів, балкерів та нафтових танкерів на основі AIS-статистики навантаження головного двигуна. У дослідженні враховано обмеження максимальної електричної потужності ORC-модуля, що призводить до роботи системи у режимі обмеження вихідної потужності при високих теплових навантаженнях.

Результати аналізу показали, що вироблена ORC-системою електроенергія дозволяє частково замінити електроенергію, що генерується допоміжними дизель-генераторами або валогенератором. Це забезпечує скорочення споживання палива та викидів CO₂ під час експлуатації судна. Встановлено, що ефективність ORC-системи залежить від експлуатаційного профілю судна та характеру розподілу навантажень головного двигуна. Екологічний ефект (річне скорочення викидів CO₂) для балкерів та нафтових танкерів, які тривалий час працюють у діапазоні близько 50 % MCR, становить близько 285 т CO₂. Для контейнеровозів скорочення викидів нижче через переважну роботу двигуна на часткових навантаженнях та меншу кількість вторинної теплоти.

Показано, що використання ORC-систем забезпечує скорочення річних викидів CO₂ приблизно на 2,0 % для контейнеровозів та близько 1,75 % для балкерів і нафтових танкерів відносно викидів головного двигуна під час морської експлуатації. При цьому ORC-система дозволяє повернути до 2 % енергії палива головного двигуна у вигляді електроенергії. Встановлено, що режим обмеження номінальної потужності ORC-модуля суттєво впливає на результати оцінки екологічної ефективності. У випадках високих теплових навантажень система досягає межі максимальної електричної потужності, внаслідок чого подальше збільшення кількості доступної вторинної теплоти не приводить до зростання генерації електроенергії.

Отримані результати підтверджують доцільність використання ORC-систем як

одного з ефективних інструментів декарбонізації морського транспорту та підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Maritime Organization, 2023. 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships. London: IMO.
2. Feng, J., Gu, Y., Han, S., Zhao, X., Tang, Y., Zhu, S., Yuan, H. and Wang, G., 2025. Design of Organic Rankine Cycle Recovering Multi-Grade Waste Heat from a Two-Stroke Marine Engine. *J. Mar. Sci. Eng.* 13(9), 1679. <https://doi.org/10.3390/jmse13091679>
3. Yuksek, E. L., Mirmobin, P., 2015. Electricity generation from large marine vessel engine jacket water heat. *ASME 2015 Power and Energy Conversion Conference (PowerEnergy2015)*. San Diego, USA, June 28 July 2, 2015. 49226. <https://doi.org/10.1115/ES2015-49226>

ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧІ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ

Андрєєв А.А., Андрєєва Н.Б.

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету
кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Використання теплоти, відведеної інтеркулером (охолоджувачем наддувного повітря), дозволяє підвищити ефективність роботи морських дизельних двигунів. Сучасні теплоутилізуючі системи охолодження включають вискоефективні інтеркулери (Shell-&-Tube, пластинчасті) та декілька стратегій утилізації теплоти: органічні цикли (ORC), підігрів палива/повітря, системи опалення судна, опріснення води, а також абсорбційні та термоелектричні установки [1, 2]. Розглянуто термодинамічні основи інтеркулінгу, описано типові конструкції охолоджувачів, а також схеми рекуперації теплоти. Аналізуються питання інтеграції систем у низькообертові головні двигуни, методи керування, вибір матеріалів і проблеми корозії. Зазначено переваги (зниження витрат палива, викидів, підвищення потужності) і обмеження (висока вартість, вага, складність) теплоутилізуючих рішень. Висновки містять рекомендації щодо практичного впровадження таких систем.

Актуальність досліджень. Питання підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок набуває особливої актуальності в умовах посилення міжнародних екологічних вимог та зростання вартості палива. Згідно з сучасними нормативами, зокрема вимогами міжнародних організацій у сфері морського транспорту, судна повинні відповідати жорстким критеріям щодо скорочення викидів парникових газів. У цьому контексті впровадження тепловикористовуючих систем дозволяє не лише знизити витрати палива, але й зменшити викиди CO₂. Особливо ефективними такі рішення є для великотоннажних суден, де навіть незначне підвищення ККД приводить до суттєвої економії ресурсів.

Постановка задачі. Метою даної роботи є аналіз особливостей функціонування тепловикористовуючих систем охолодження наддувного повітря суднових дизелів, дослідження конструктивних рішень інтеркулерів, а також визначення найбільш ефективних напрямів утилізації відведеної теплоти. Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути термодинамічні основи процесу охолодження наддувного повітря, проаналізувати існуючі типи теплообмінників та оцінити техніко-економічну доцільність застосування різних методів рекуперації енергії.

Результати досліджень. *Термодинамічні принципи.* Охолодження повітря після компресора підвищує густину заряду, що зменшує роботу компресора і знижує питому витрату палива. За постійного масового потоку повітря $\dot{m}$ теплова потужність, знята інтеркулером, дорівнює $Q = \dot{m} c_p (T_{in} - T_{out})$. Наприклад, при $\dot{m} = 100$ кг/с, $c_p \approx 1.0$ кДж/(кг·К), охолодженні повітря з 140 °С до 50 °С вилучається ≈ 9 МВт теплоти. Зменшення остаточної температури досягається частішим проходженням через компресор без суттєвого підвищення тиску, що математично призводить до зниження роботи компресора (робота $\propto \int p dV$). Із термодинаміки відомо, що ідеальна робота на компресії з 140 °С до 50 °С (ізотермічно) була б менша на $\sim 10\%$ порівняно з адіабатною компресією до тієї ж остаточної температури. Таким чином, охолодження розвантажує турбіну: двигун отримує більше корисної потужності при тій же подачі палива. Ексергетичний аналіз WHR показує, що при низьких температурах (≤ 50 °С) важко отримати високу ефективність через малий термодинамічний напір, але будь-яка корисна теплова та/або електрична віддача є вигідною.

Конструкції інтеркулерів. Традиційні інтеркулери бувають водяні та рідше — повітряні. У суднових двигунах переважають водоохолоджувані shell-and-tube і

пластинчасті теплообмінники. Shell-and-tube містить сталевий корпус з пакетом мідно-нікелевих труб (Cu-Ni 90/10 або 70/30) — стійких до корозії й засмічення. Пластинчасті інтеркулери складаються з гофрованих титанових пластин між якими йде повітря, а вода тече у суміжних каналах. Титан — практично єдиний матеріал, який довго витримує агресивну морську воду. Пластини забезпечують дуже високу інтенсивність тепловіддачі при компактності. Такий інтеркулер менш важкий і займає менше місця, але коштує дорожче і складний у ремонті. Для малих двигунів (декілька МВт) використовують пластинчасті, а для великих (десятки МВт) — корпусні.

У більшості двигунів передбачено багатоступеневе охолодження. Наприклад, у двоступеневому турбонаддуві перший інтеркулер може бути водним з частковим використанням теплоти (високотемпературний ступінь), а другий — фінальний низькотемпературний з забортною водою. У трьохступневих схемах часто ставлять додаткові теплоутилізуючі модулі: наприклад, між першим і другим ступенями встановлюють абсорбційну або ежекторну холодильну машину (ХМ) для глибокого охолодження. У схемах заводських встановлень (MAN, Wartsila) кожен інтеркулер монтується у відведеному відсіку двигуна з власним насосом і регулятором потоку, що дає змогу тонко керувати температурою повітря незалежно від навантаження.

Методи утилізації теплоти:

- ORC (органічний цикл Ренкіна): низькопотенційна теплота (60–200 °C) використовується в випарнику органічної робочої рідини (хладон, силексан тощо) для вироблення електроенергії;
- термоелектричні генератори (TEG): напівпровідникові модулі встановлюють на нагріті труби випуску чи охолоджувальної води;
- абсорбційні та ежекторні холодильні машини: можуть використати теплоту наддуву для генерації холоду;
- підігрів палива/повітря: теплоту від інтеркулера передають для підігрівання палива (зменшує в'язкість мазуту, знижує витрати при пуску) або повітря в морозних умовах (щоб уникнути обмерзання);
- теплофікація (опалення): гаряча вода подається в систему опалення/гарячого водопостачання судна;
- опріснення морської води: теплоту від інтеркулера (понад ~80 °C) використовують для термодестилляції/випарника прісної води;
- комбіновані схеми: часто поєднують декілька вищезгаданих методів. Наприклад, теплота може спочатку йти в ORC, а залишок — на підігрів палива. Або спільно з холодильними технологіями (наприклад, суміщення охолодження наддуву і охолодження води випуску, подвійна ступінь ORC).



Рисунок 1 — Приклад великих shell-and-tube інтеркулерів наддувального повітря (компанія VRcooler)

Оцінка ефективності методів часто виражається відношенням:

$$\text{ККД системи} = \frac{\text{отримана енергія (електро-, тепло-, холод)}}{\text{витрачена теплова потужність}}.$$

За літературними даними, середній ККД великих ORC-систем для WHR становить 10–15% [1], у TEG – <5%, у абсорбційних ХМ з холодильними ефектами – $\zeta \approx 0.2$. При цьому пряме використання теплоти (опалення/підігрів) можна вважати практично 100 % (з невеликими втратами у трубопроводах), але воно не генерує енергії у вигляді електрики чи холоду.

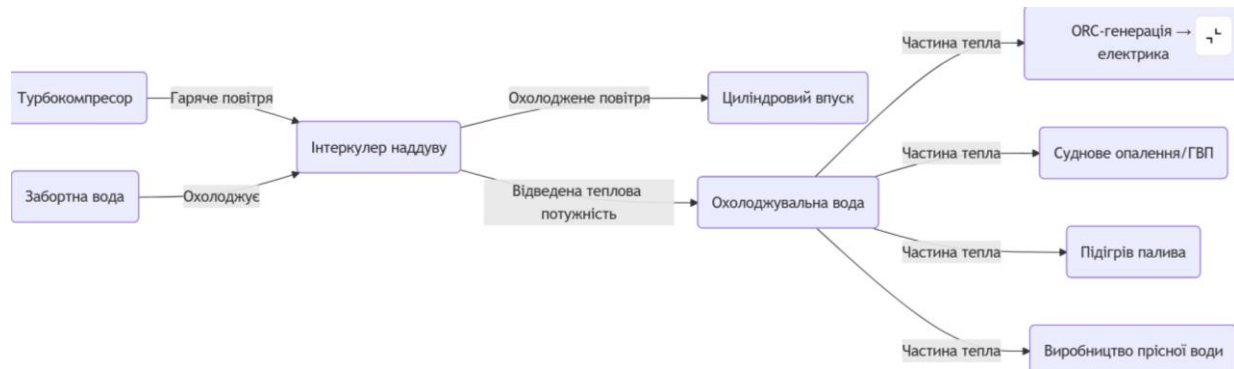


Рисунок 2 — Інтеграція охолодження наддуву і систем утилізації теплоти у низькообертовому судновому дизелі

Показники ефективності та формули. Для оцінки роботи охолоджувача користуються такими формулами і метриками.

Тепловий потік: $Q = \dot{m} c_p (T_{\text{гаряче}} - T_{\text{холодне}})$.

Ефективність охолоджувача: $\varepsilon = \frac{T_{\text{in}} - T_{\text{out}}}{T_{\text{in}} - T_{\text{окр}}}$ (де $T_{\text{окр}}$ — температура довкілля).

ККД двигуна (після модернізації): збільшується за рахунок зниження витрати палива b_e (г/кВт·годину). Пряма формула: $\eta_e = \frac{P_{\text{вих}}}{\dot{m}_{\text{пал}} Q_{\text{пал}}}$, де $\dot{m}_{\text{пал}}$ — масовий потік палива, $Q_{\text{пал}}$ — його теплота згоряння. Утилізація теплоти наддуву призводить до збільшення $P_{\text{вих}}$ або зменшення $\dot{m}_{\text{пал}}$.

Коефіцієнт трансформації теплоти: для ORC/ХМ $\zeta = \frac{Q_{\text{вих}}}{Q_{\text{вх}}}$ (зазвичай 0,1–0,3).

Техніко-економічні показники: річна економія палива $\Delta m_{\text{пал}} = (b_{e0} - b_{e1}) P t / 1000$, де витрати палива b_{e0} , b_{e1} — до і після модифікації; окупність $T_{\text{pay}} = \text{CAPEX} / (\text{економія палива в грн/рік})$.

Висновки. Тепловикористовуючі системи інтеркулінгу є перспективними рішеннями для підвищення паливної ефективності судових дизелів. Вони дозволяють отримати від 5% економії палива (реально) до 10–15% за умови комплексної оптимізації. При правильному технічному проектуванні та керуванні системи WHR підвищують рентабельність суден та зменшують екологічний вплив морської енергетики [4, 6].

ЛІТЕРАТУРА

1. Radchenko R.M., Bohdanov M.S. Fuel efficiency of the main marine diesel scavenge air cooling by the waste heat recovery chiller on the route line. Збірник наукових праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2016. № 3 (465). С. 43–50. DOI 10.15589/jnn20160308
2. Yang M.-H., Yeh R.-H. Thermo-economic optimization of an organic Rankine cycle system for large marine diesel engine waste heat recovery. Energy. 2015. Vol. 82, no. C. – P. 256–268. – DOI: 10.1016/j.energy.2015.01.036.
3. Miller T., Durluk I., Kostecka E., Kozlovskaya P., Jakubowski A. Waste Heat Utilization in Marine Energy Systems for Enhanced Efficiency. Energies. 2024. Vol. 17, No. 22. Article 5653. DOI:10.3390/en17225653
4. Черниш І.І., Кар'янський С. А., Оженко Є. М. Сучасні судові дизелі: особливості конструкції, експлуатації та автоматизованого управління. Одеса: НУ «ОМА», 2019. 217 с.

https://www.researchgate.net/publication/340032867_SUCASNI_SUDNOVI_DIZELI_OSOBLI_VOSTI_KONSTRUKCII_EKSPLUATACII_TA_AVTOMATIZOVANOGO_UPRAVLINNA

5. VRcooler Tech. Charge air cooler; waste heat recovery. Режим доступу: <https://vrcoolertech.com>

6. International Maritime Organization. Guidelines on energy efficiency (EEDI/EEEXI). Режим доступу: <https://www.imo.org>

7. Copper Development Association. Copper-nickel alloys in marine service. Режим доступу: <https://www.copper.org>

8. Alfa Laval. Plate heat exchanger in marine applications. Режим доступу: <https://www.alfalaval.com>

9. Андрєєв А. А., Пирисунько М. А., Година В. І. Тепловикористовуючі системи охолодження наддувного повітря сучасних суднових МОД. Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування. 14-а Міжнародна науково-практична конференція, 16-18 березня 2023 р. Херсон: Херсонська державна морська академія, 2023. С. 65–67. <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2023/05/Матеріали-СЕУТТОО-2023.pdf>

УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАДУВНОГО ПОВІТРЯ У СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛЯХ

Андрєєв А.А., Андрєєва Н.Б.

*Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування
імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Підвищення енергоефективності суднових енергетичних установок (СЕУ) є важливим завданням сучасного морського транспорту. У малообертових дизелях значні теплові втрати пов'язані з охолодженням надувного повітря, причому ця теплота зазвичай не використовується, незважаючи на її потенціал як вторинного енергетичного ресурсу. Її утилізація дозволяє знизити витрату палива, підвищити загальний коефіцієнт корисної дії установки та покращити екологічні показники судна.

Сучасні підходи до використання цієї теплоти охоплюють як прості теплообмінні рішення, так і більш складні системи, зокрема органічні цикли Ренкіна та холодильні машини. Водночас ефективність їх застосування визначається режимами роботи двигуна, конструктивними особливостями системи охолодження та економічною доцільністю впровадження. У зв'язку з цим дослідження утилізації теплоти охолодження надувного повітря є актуальним напрямом підвищення ефективності СЕУ [1–3]

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю забезпечення відповідності СЕУ як вимогам забезпечення паливної економічності, так і сучасним міжнародним екологічним вимогам. Використання систем утилізації теплоти сприяє зниженню викидів парникових газів і шкідливих речовин, а також підвищенню енергетичної ефективності відповідно до встановлених нормативів. У зв'язку з цим дослідження ефективних способів використання теплоти охолодження надувного повітря є важливим науково-практичним завданням.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження та обґрунтування ефективних способів утилізації теплоти охолодження надувного повітря у суднових малообертових дизелях. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: проаналізувати існуючі методи утилізації теплоти; дослідити особливості застосування теплообмінних систем, органічних циклів Ренкіна, абсорбційних та ежекторних холодильних машин; оцінити їх технічні та експлуатаційні характеристики; визначити вплив конструктивних і режимних параметрів на ефективність утилізації; а також розробити рекомендації щодо інтеграції відповідних систем у структуру СЕУ.

Результати досліджень.

Методи утилізації теплоти:

- прямі теплообмінники: найпростіший спосіб — використати теплоту охолоджувальної води після інтеркулера для опалення приміщень, підігріву паливо-мастильних матеріалів, питної або технічної води тощо;

- органічні цикли (ORC): впровадження ORC дозволяє конвертувати низькопотенційну теплоту (як правило, 80–250 °C) у електричну енергію [1, 2].

- абсорбційні/ежекторні холодильні машини (ХМ): встановлюють між першим і другим ступенем охолодження повітря. Наприклад, за допомогою ежекторної ХМ (з холодоагентом R134a або NH₃) можна «зміщувати» холод від вихідного теплоносія до охолодження повітря до температур нижче температури промивної води. Однак їхній тепловий коефіцієнт ζ невисокий (близько 0,3), тому для значної холодопродуктивності треба багато теплоти (велика площа теплообміну випарника). Цей метод дозволяє в умовах жаркого клімату знизити температуру повітря нижче за звичайну (збільшується продуктивність двигуна), але економія палива обмежена низьким ζ ;

- комбіновані системи: можуть поєднувати вищезначені методи. Наприклад,

трициркулярна схема, де частина теплоти надувного повітря живить один контур (вище за температурою) і виконує роль джерела холоду для другого (нижчого) контуру.

Приклади застосування. У невеликих головних дизелях теплота охолоджувальної води надуву традиційно використовується для підтримки температури палива та опалення приміщень. Сучасні проєкти великотоннажних суден впроваджують ORC або парову утилізаційну турбіну (традиційно з утилізаційним котлом) разом із теплообмінниками інтеркулера для підігріву приміщень чи виробництва прісної води [4].

Інтеграція системи в МОД і стратегії керування. На малообертових суднових дизельних двигунах охолоджувальна схема надувного повітря зазвичай є частиною системи охолодження двигуна (циклове охолодження і проміжні водяні контури). Інтеркулер розташовується між турбокомпресором і впускним трубопроводом, а теплообмінна вода з нього, зазвичай, відводиться до окремого резервуара або безпосередньо в відпрацювання (забортну воду). Для впровадження утилізації теплоти потрібно прокласти додаткові трубопроводи від інтеркулера до системи утилізації теплоти (WHR) (наприклад, до трубок випарника ORC чи теплообмінника). Важливо зберегти нормальне охолодження: при зупинці та розвантаженні двигуна частина або всі потоки можна відключати (байпасні клапани), щоб уникнути перегріву надувного повітря в зворотний бік.

Стратегії керування включають регулювання витрат води через інтеркулер з урахуванням навантаження двигуна і режиму роботи (активація WHR при високих температурах повітря), а також автоматичне налаштування ORC або абсорбційної ХМ на основі змін теплопродуктивності. Наприклад, при зменшенні навантаження двигуна може бути доцільно зменшити інтенсивність охолодження (щоб уникнути надмірного розігріву палива) або навіть відключити WHR, передаючи теплоту безпосередньо в систему охолодження двигуна. Системи САУ двигунів (клапани впуску, EGR, ПНБТ) можуть також враховувати температуру наддуву при розрахунку впорскування палива.

Матеріали, корозія та забруднення. Оскільки інтеркулери контактують із морською водою, критично важливо вибирати стійкі матеріали. Для трубок часто застосовують мідно-нікелеві сплави, у першу чергу марки 90/10 (МНЖ5-1) з 10 % Ni, або титан, що мають високу корозійно-біопридатність. Зокрема, CuNi-сплави відомі відмінною стійкістю до корозії й засолення. Титан традиційно використовується у пластинчастих теплообмінниках, оскільки він витримує агресивну морську воду без корозії. Корпуси охолоджувачів, що контактують із атмосферою або обробленою водою, зазвичай виготовляють із нержавіючої сталі (марок AISI 316L, AISI 317L) або легованих сплавів [4, 5].

Головною проблемою є біозабруднення — утворення накипу та органічної плівки знижує теплообмін. За відсутності запобіжних заходів (антифулінгові покриття, хімічна обробка води, регулярне промивання високим тиском) ефективність охолоджувача може впасти на десятки відсотків. Фірми-виробники рекомендують періодично застосовувати скребки чи ультразвукову очистку трубок. Також слід контролювати електрохімічні потенціали при різномірних сплавах, аби уникнути контактної корозії.

Безпека та нормативні вимоги. Впровадження систем утилізації теплоти на судні повинно відповідати вимогам безпеки та екологічним нормам. Установки ORC та абсорбційні ХМ використовують робочі рідини, які можуть бути горючими або токсичними. Слід обирати холодоагенти з низькими показниками GWP і ODP, а також з урахуванням класифікаційних вимог морських товариств. Наприклад, R245fa або R1233zd мають низький екологічний викид, але вимагають герметичності. Ежекторні системи на природних холодоагентах (CO₂, NH₃, вода) можуть бути безпечнішими, але потребують високого тиску (для CO₂ ~7–8 МПа) або відпрацьованих технологій.

У табл. 1 наведено характерні риси деяких технологій WHR.

Таблиця 1 — Порівняння технологій утилізації теплоти суднового двигуна

Технологія	Джерело теплоти	Продуктивність/ ККД	Переваги	Недоліки
Теплообмінники (Shell&Tube)	Система охолодження/відхідні гази	прямий нагрів води/повітря	Надійні, стійкі, компактні	Схильні до забруднення, потреба очищення
Пластинчасті охолоджувачі	Система охолодження	—	Компактні, легкі (титан: стійкий)	Дорожчі, можливе розгерметизація, зчеплення
ORC-цикл	Низькопотенційна теплота (80–250 °C)	~10–20 % (електроенергія)	Додаткова електрична потужність, гнучкість	Висока вартість, складність конструкції
Термоелектричний генератор (TEG)	Гаряча поверхня (>300 °C)	Низький (~5 %)	Без рухомих частин, компактний	Дуже низький ККД, значна маса для малої потужності
Ежекторна ХМ	Низькопотенційна теплота (40–80 °C)	$\zeta \approx 0,2-0,3$ (COP $\approx 0,3$)	Проста конструкція (не має компресора)	Низький ККД ζ , потрібно багато теплоти

Рекомендації для впровадження. При розробці системи утилізації теплоти надувного повітря слід виконати комплексний техніко-економічний аналіз: визначити тепловий баланс двигуна, можливі режимні зони, врахувати кліматичні умови експлуатації та вимоги замовника. Необхідно вибрати оптимальне співвідношення між ступенями охолодження (скільки забрати високопотенційної теплоти відразу, скільки спрямувати на кінцеве охолодження). Рекомендується починати з малого — наприклад, встановлення пластинчастого рекуператора забортної води і використання її в системі опалення, і лише після підтвердженої ефективності — розширювати систему (ORC, холодильні машини). Особливу увагу слід приділити сумісності з існуючими контурами охолодження і системою керування двигуном (наприклад, установка байпасних ліній та автоматів блокування). Оскільки перевага утилізації теплоти залежить від ціни на паливо, важливо також розрахувати показник окупності (IRR, NPV) з урахуванням зростання цін на паливо та можливих субсидій/кодексів «зеленого фрахту» [6–8].

Висновки. У результаті проведеного аналізу встановлено, що утилізація теплоти охолодження надувного повітря є ефективним засобом підвищення енергетичної ефективності суднових малооборотних дизелів. Найбільш простими та надійними у реалізації є системи прямого теплообміну, тоді як використання органічних циклів Ренкіна та холодильних машин дозволяє отримувати додаткову електричну або холодову енергію, проте потребує більших капітальних витрат і ускладнює конструкцію установки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Song J., Song Y., Gu C. Thermodynamic analysis and performance optimization of an organic Rankine cycle (ORC) waste heat recovery system for marine diesel engines. *Energy*. 2015. Vol. 82. P. 976–985. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.108>
2. Yang M.-H., Yeh R.-H. Thermo-economic optimization of an organic Rankine cycle system for large marine diesel engine waste heat recovery. *Energy*. 2015. Vol. 82, No. C. P. 256–268. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.036>
3. Miller T., Durluk I., Kostecka E., Kozlovska P., Jakubowski A.; Łobodzińska, A. Waste

Heat Utilization in Marine Energy Systems for Enhanced Efficiency. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 22. Article 5653. <https://doi.org/10.3390/en17225653>

4. Черниш І.І., Кар'янський С. А., Оженко Є. М. Сучасні суднові дизелі: особливості конструкції, експлуатації та автоматизованого управління. Одеса: НУ «ОМА», 2019. 217 с. https://www.researchgate.net/publication/340032867_SUCASNI_SUDNOVI_DIZELI_OSOBLI_VOSTI_KONSTRUKCII_EKSPLUATACII_TA_AVTOMATIZOVANOGO_UPRAVLINNA

5. Copper Development Association Inc. Copper Alloys for Marine Environments – An Overview. <https://copper.org/applications/marine/>

6. Kepekci H., Ezgi C. Thermodynamic analysis of a marine diesel engine waste heat-assisted cogeneration power plant modified with regeneration onboard a ship. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 9. Article 1667. <https://doi.org/10.3390/jmse12091667>

7. International Maritime Organization. Improving the energy efficiency of ships. <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/eexi-cii-faq.aspx>

8. Singh D. V., Pedersen E. A review of waste heat recovery technologies for maritime applications. *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 111. P. 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.073>

ГІДРОДИНАМІЧНІ ПРИСТРОЇ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ СУДНОВОГО ПАЛИВА

Андреев А.А., Вагін Ф.І., Гурин К.Ю.

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Сучасний розвиток судноплавства висуває особливо жорсткі вимоги до паливної економічності та екологічної безпеки судових енергетичних установок (СЕУ). У першу чергу ці задачі можуть бути вирішені шляхом забезпечення відповідної якості палив, що спалюються у елементах СЕУ: двигунах, котлах тощо [1, 2]. Останній час практично на всіх суднах морського та внутрішнього водного транспорту використовуються палива з в'язкістю 380...500 сСт та погіршеного фракційного складу. Особливістю таких палив є також присутність у них смолянистих утворень, які можуть бути у вигляді плівок, желеподібних згущень, мазеподібних агломератів, водопаливних емульсій тощо.

Враховуючи це, судові палива потребують застосування попередньої обробки у спеціальних пристроях. Вживані на суднах методи обробки палив можна розділити на дві основні групи: методи, що забезпечують зміну фізичного стану палива, та методи, що забезпечують зміну його фізико-хімічного складу.

Для зміни фізичного стану палива використовуються різноманітні методи теплової обробки (паровий, електричний, індукційний підігрів), а також гомогенізація палива. Групу методів, що змінюють фізико-хімічний склад палива, можна розділити на дві підгрупи: очищення палива від домішок і хімічна обробка палива.

Актуальність досліджень. Найбільш фундаментально у судових умовах експлуатаційні характеристики палива покращують саме методами зміни його фізичного стану. Це у першу чергу пов'язано із тим, що смолянисті утворення у паливі, маючи підвищену поверхневу активність, коагулюють навколо частинок механічних домішок і утворюють з водою стійку водопаливну емульсію (рис. 1).

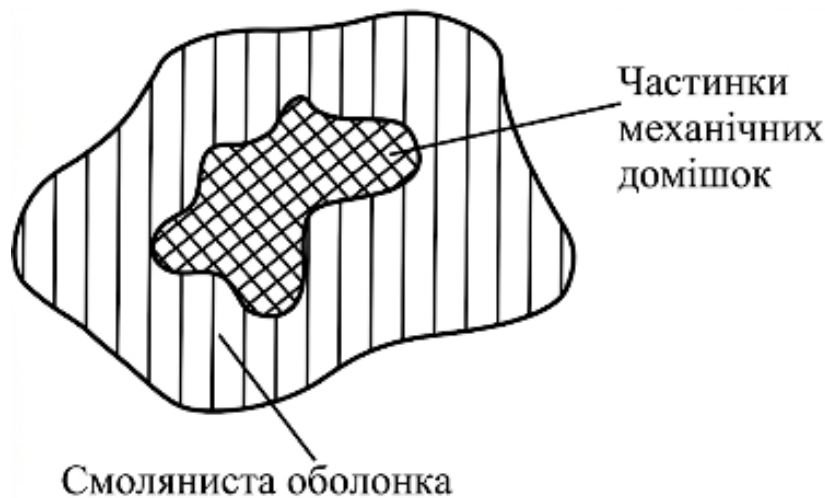


Рисунок 1 — Частинки механічних домішок у смолянистій оболонці (шубі)

При очищенні палива від механічних домішок і води смолянисті утворення переходять у відходи сепарації та фільтрації. Таким чином, при видаленні з палива негорючої абразивної частинки механічних домішок видаляється також і горюча оболонка (шуба), а це, у свою чергу, зменшує теплотворну здатність палива. Утримати ці утворення в паливі можна тільки шляхом їх руйнування – гомогенізацією. Застосування процесу гомогенізації забезпечує підвищення однорідності судового палива (рис. 2), збереження його теплотворної здатності шляхом зменшення кількості шлаків і видалення з ними горючих складових палива.

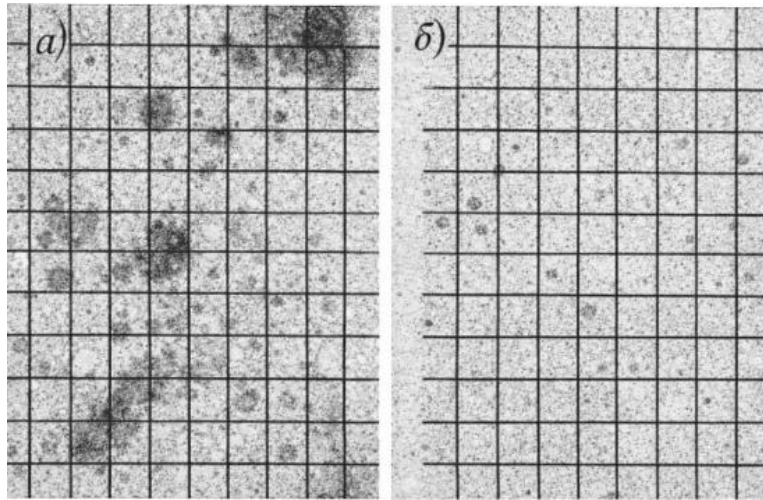


Рисунок 2 — Мікроструктура палива:
а) до гомогенізації; б) після гомогенізації

Якщо методи теплової обробки палива на судах використовуються достатньо активно, то гомогенізатори широкого поширення так і не отримали, хоча й випускалися як вітчизняними, так і закордонними виробниками. Насамперед це було викликано необхідністю витрат енергії для проведення гомогенізації, додатковими вібраційними навантаженнями від гомогенізаторів на конструкції машинного відділення та судові системи, і навіть необхідністю виконання регламентних робіт з обслуговування таких пристроїв [3].

Постановка задачі. У підгрупу методів гомогенізації входять такі засоби обробки палива: гідродинамічний; магнітний; електричний; ультразвуковий.

Хоча методи електричної, магнітної та ультразвукової гомогенізації палива вважаються перспективними, особливо у випадках, коли потрібно отримати мілкодисперсну двофазну систему «вода – паливо» (що дозволяє ефективно спалювати обводнені палива), питання їхнього впровадження на судах у даний час ще недостатньо вивчені. Вони знаходяться у стадії розробки і поки активно не застосовуються на практиці. Проте вже зараз є передумови до того, що вони знайдуть застосування, особливо у поєднанні з іншими відомими методами обробки судового палива [3, 4].

Таким чином, на сьогоднішній день особливої уваги вимагає питання ефективного використання на судах гідродинамічного методу обробки палива, який може використовуватися як у окремих спеціальних пристроях, так і у системах комплексної паливопідготовки [5, 6]. Це і визначило мету даного дослідження: проаналізувати перспективні конструкції гідродинамічних пристроїв гомогенізації судового палива.

Результати досліджень. Сутність гідродинамічного способу гомогенізації палива (заздалегідь стиснутого до 15...25 МПа) полягає в різкому зниженні його тиску шляхом редукування. При цьому завдяки гомогенізуючому ефекту смолистоасфальтові утворення, що містяться у паливі, руйнуються і рівномірно розподіляються в паливному середовищі.

За своїм характером гідродинамічна обробка палива подібна до процесу розпилювання палива у форсунці. Гомогенізатор гідродинамічного типу має багато загальних конструктивних елементів із системою подачі палива. У обох випадках високий тиск створюється насосом (як правило, плунжерним). Гомогенізуюча головка, в якій здійснюється редукування палива, нагадує розпилюючий пристрій форсунки.

Принципова схема роботи гідродинамічного гомогенізатора клапанного типу показана на рис. 3. Плунжери насоса гомогенізатора приводяться в дію через кривошипно-шатунний механізм від колінчастого валу. Останній приводиться в обертання через текстропну передачу від електродвигуна. Усі плунжери нагнітають паливо в загальний ресивер, з якого воно пропускається через гомогенізуючий клапан.

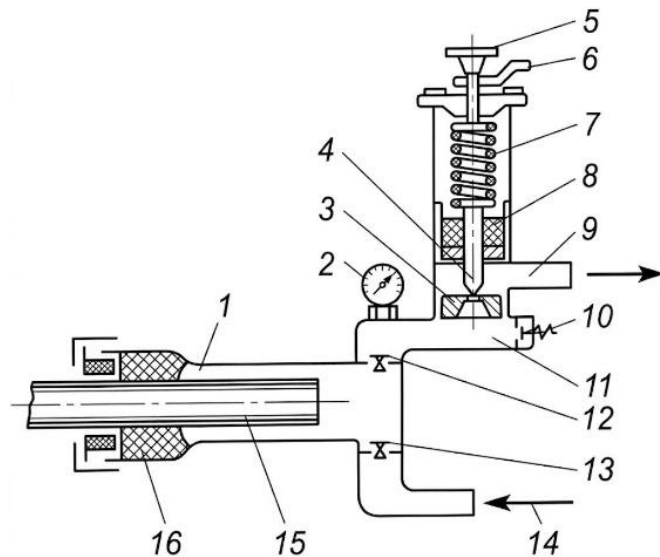


Рисунок 3 — Схема роботи гідродинамічного гомогенізатора клапанного типу:

1 — блок насоса; 2 — манометр; 3 — сідло гомогенізаційного клапана; 4 — гомогенізаційний клапан; 5 — регулюючий гвинт; 6 — стопор гвинта; 7 — пружина; 8 — сальникове ущільнення штока клапана; 9 — відвідна труба; 10 — запобіжний клапан; 11 — нагнітальна камера; 12 — нагнітальний клапан насоса; 13 — всмоктуючий клапан насоса; 14 — підведення палива; 15 — плунжер; 16 — ущільнення плунжера

Гідродинамічні гомогенізатори клапанного типу випускають продуктивністю від 250 до 10000 л/годину в трьох-, п'яти-, семиплунжерному (і більше) виконанні. Деякі закордонні фірми випускають гомогенізатори з підвищеним робочим тиском і двоступінчастим редукуванням.

У конструкції гомогенізатора роторного типу (рис. 4) гомогенізація палива здійснюється шляхом його пропускання через систему коліс з лопатями. Ротор складається з набору декількох коліс, що обертаються з великою швидкістю між нерухомими лопатями статора. Гідродинамічний ефект створюється застосуванням лопатей спеціального профілю, завдяки чому при обертанні лопатей ротора щодо нерухомих лопатей статора виникає пульсуючий високий тиск, що чергується з різкими його падіннями. Профіль лопатей показаний на рис. 5. При обертанні ротора паливо стискається між лопатями унаслідок зменшення зазору між ними. Коли лопаті розходяться, тиск різко падає і виникають кавітаційні явища, внаслідок чого руйнується смоляниста оболонка частинок механічних домішок.

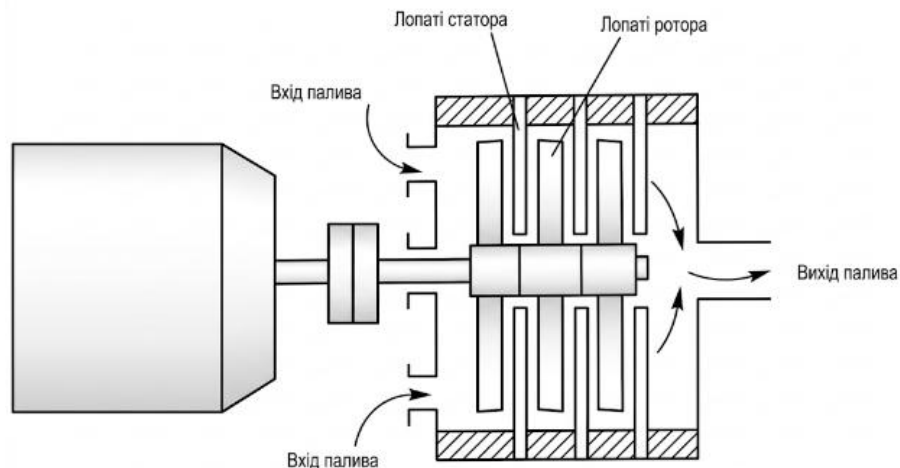


Рисунок 4 — Схема роботи гідродинамічного гомогенізатора роторного типу

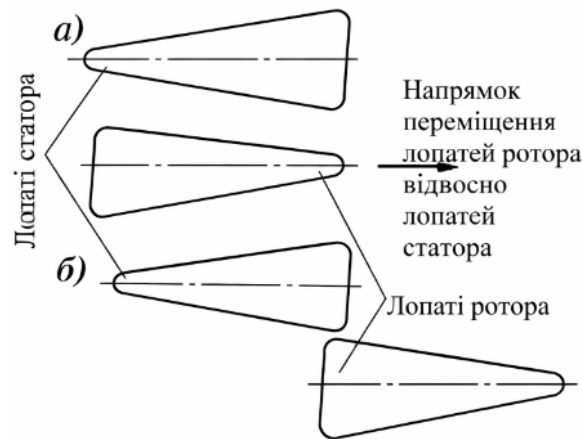


Рисунок 5 — Профіль лопатей ротора і статора гомогенізатора роторного типу:

- а) положення лопатей перед початком стискування палива;
- б) положення лопатей перед різким падінням тиску палива

Особливістю гомогенізатора вібромеханічного типу є використання для руйнування смолистоасфальтових утворень кавітаційних явищ, що виникають в наслідок вібрації пружини. Під дією вібрації витків пружини прямокутного перетину створюються місцеві локальні розрідження, що чергуються з підвищенням тиску паливного середовища, у результаті чого утворюються кавітаційні бульбашки, які при підвищенні тиску «закриваються», що і викликає руйнування смолистоасфальтових утворень.

Пристрій (рис. 6) містить пружину, витки якої мають прямокутний перетин. Пружина повинна стискатися так, щоб між витками встановлювався зазор 0,5...1,0 мм. При роботі пружина одержує через штовхач від кулачкової шайби, що обертається, зворотно-поступальний рух, відповідний частоті обертання кулачкового валу. Амплітуда цього руху визначається ексцентриситетом кулачкової шайби. Шляхом зміни частоти обертання валу і попереднього натягу пружини регулюється режим її вібрації. При зближенні витків пружини між ними виникають розрідження та різкі підвищення тиску, що чергуються. Паливо для обробки підводиться зовні і виходить через внутрішню порожнину пружини. Чим менше зазор між витками при вібрації пружини, тим ефективніше процес гомогенізації палива.

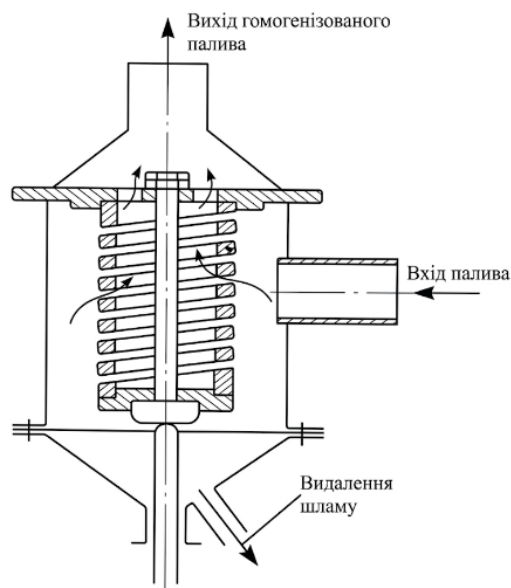


Рисунок 6 — Гомогенізатор вібромеханічного типу

Вібромеханічна обробка палива має низку переваг перед іншими способами обробки, головні з яких полягають в простоті гомогенізатора і відсутності необхідності високого тиску

палива.

Висновки. Підвищення паливної економічності та екологічної безпеки при експлуатації СЕУ потребують забезпечення відповідної якості палива. Найбільш фундаментально у суднових умовах експлуатаційні характеристики палива покращують методами зміни його фізичного стану. Застосування процесу гомогенізації забезпечує підвищення однорідності суднового палива, збереження його теплотворної здатності шляхом зменшення кількості шламів і видалення з ними горючих складових палива. На сьогоднішній день особливої уваги вимагає питання ефективного використання на судах гідродинамічного методу обробки палива, який може використовуватися як у окремих спеціальних пристроях, так і у системах комплексної паливопідготовки. Вібромеханічна обробка палива має низку переваг перед іншими способами обробки, головні з яких полягають в простоті гомогенізатора і відсутності необхідності високого тиску палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. Van Viet Pham (2019) Advanced Technology Solutions For Treatment And Control Noxious Emission Of Large Marine Diesel Engines: A Brief Review. Journal Of Mechanical Engineering Research And Developments, 42(5): 21-27. DOI : <http://doi.org/10.26480/jmerd.05.2019.21.27>
2. Behrendt C., Jasiewicz R., Szczepanek M., Szmukała M. (2021) Combustion of petroleum waste in the marine boilers – Waste preparation technologies and exhaust emission. Part 1: Preparation technologies and their influence on waste morphology. Fuel, Vol. 305, 1 December: 120966. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120966>
3. Руснак Д.Ю. (2024) Особливості комплектації суднових систем підготовки палива. Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Одеса: НУОМА, Вип. 49: 98-109. DOI : <http://doi.org/10.31653/smf49.2024.98-109>
4. Марченко О.О., Сагін С.В. (2021) Вдосконалення процесу очищення суднових важких палив. Суднові енергетичні установки: науково-технічний збірник. Одеса: НУОМА, Вип. 42: 75-79. DOI : <http://doi.org/10.31653/smf42.2021.75-79>
5. [Гурин К.Ю., Андреев А.А. (2023) Доцільність обробки палива суднових дизелів магніто-гідродинамічними активаторами. Суднова енергетика: стан та проблеми : матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф. Миколаїв : Вид. Торубара В. В.: 205-207. <https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/7679>
6. Huryn K., Andreiev A. (2024) Improving Fuel Efficiency and Environmental Compatibility of Marine Diesel Engines Through Fuel Treatment with Magneto-Hydrodynamic Activators. Сучасний стан та проблеми двигунобудування : матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф. Миколаїв : Іліон: 127-128. <https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/9986>

UDC 656.614.35

IMPROVING THE SAFETY OF VESSEL OPERATION WHEN WORKING WITH SOLID BULK CARGOES

Bezkrivnyi V.O., Kyrychenko K.V., Chaban V.O.
Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)

Introduction. Transportation of non-grain bulk cargoes — ore, ore concentrates — is associated with dangers that may arise during transportation due to the physical and chemical properties of these cargoes. World statistics show that a certain number of vessels carrying bulk cargoes, including new specialized vessels, die annually.

Relevance of research. The largest percentage of losses is associated with the process of cargo liquefaction. «The liquefaction and subsequent displacement of cargo continues to be a serious concern from the point of view of the safety of seafarers», the report notes. Disasters resulting from liquefaction and displacement of cargo account for 41.5% of the total volume of losses.

Formulation of the problem. The problem of ensuring the safety of transportation of solid bulk cargoes prone to liquefaction remains relevant due to a significant number of accidents associated with loss of stability and loss of vessels due to cargo displacement, which necessitates the improvement of cargo condition control, compliance with the requirements of the IMSBC Code, and increasing the level of training of ship crews during loading and transportation of such cargoes.

Research results. The most high-profile disasters were with the bulk carriers *Stellar Daisy* and *Emerald Star*. The Intercargo report on this matter states: The tragic losses of the bulk carriers *Stellar Daisy*, carrying iron ore, and *Emerald Star*, carrying nickel ore, raised questions about the general principles of transporting high-density cargoes transported by sea.

In terms of the class of vessels included in the Intercargo report, 41.5% of the total losses were accounted for by Handysize bulk carriers; another 20.8% of the losses were accounted for by Handymax class vessels (11 bulk carriers). 15.1% of the total losses were accounted for by Supramax class bulk carriers (8 bulk carriers); 13.2% were accounted for by Capesize class vessels (7 bulk carriers). Panamax class losses accounted for 9.4% of the total.

Cargo prone to liquefaction is very insidious, it is transported in any bulk carrier in a dry state, but when the moisture content of the cargo exceeds the transportable moisture limit, its displacement is possible [1]. It is impossible to stop this displacement by traditional means, such as the «stopping method», since the displacement does not occur on the surface of the stack, but inside it. As a rule, after displacement, the cargo does not return to its original state, which causes the ship to roll and capsize [2].

During loading and transportation of solid bulk cargoes, the ship's crew must adhere to a set of measures aimed at ensuring the safety of the ship and preventing emergency situations. In particular, cargo operations should not be started if the accompanying documentation is incorrect or incomplete [3]. To confirm the condition of the cargo at the time of loading, it is advisable to involve competent surveyors who have the necessary knowledge and are not under the influence of the shipper. The cargo should be loaded in accordance with the requirements of the IMSBC Code, as well as in accordance with local rules and guidelines. All certificates and certificates should be issued by recognized authoritative testing laboratories.

During cargo operations, the captain and the officer in charge of the watch must constantly monitor the loading process and, in case of obvious problems or violations, immediately suspend work. Loading during rain is not allowed, as this may lead to excessive moisture in the cargo and loss of its stability. In addition, it is necessary to regularly check the cargo holds for the presence of excess moisture that accumulates during loading. The bilge wells of the cargo holds must be inspected at least twice a day with appropriate entries made in the ship's documentation, while the

captain is obliged to control the correctness and reliability of such entries. At the same time, shipowners are recommended to increase the level of awareness of the crews about the risks associated with the carriage of cargoes prone to liquefaction, since it is the human factor and insufficient training that often become the causes of accidents during.

The shipper is obliged to provide the master of the vessel or his representatives with complete and reliable information about the cargo in advance, necessary to ensure proper stowage and safe transportation. Such information must be provided before loading begins in order to take all necessary precautions in a timely manner. For cargo such as Iron Ore Fines (IOF), the cargo group in accordance with the IMSBC Code must be indicated, in particular, belonging to group A — cargoes prone to liquefaction, the total quantity of cargo offered for transportation, as well as the stowage factor. In addition, the shipper must provide information on the need to carry out cargo stowage procedures and the features of its placement in the holds. The mandatory documents are the cargo moisture certificate (Moisture Content, MC) and the Transportable Moisture Limit (TML) certificate, which confirm the safe moisture level for transportation. The likelihood of wet bottom formation in holds due to moisture migration should also be indicated and information should be provided on the identification of actual cargo stocks intended for loading onto the ship.

Section 4.3.3 of the Code states that when a cargo which may liquefy is to be loaded into more than one cargo space on a ship, a certificate or declaration shall state the moisture content of each type of fine granular material to be loaded into each cargo space. Notwithstanding these requirements, if sampling is carried out at international or national level, accepted standard procedures show that the moisture content is uniform throughout the consignment, then a single certificate or declaration shall be issued indicating the average moisture content for all cargo spaces. In other words, each type of material to be loaded shall be sampled and tested for the formation of moisture point (FMP), TML and MC.

Visual inspection of the cargo planned for loading onto the vessel. Any parts of the material that appear contaminated or significantly differ from the cargo planned for loading onto the vessel in terms of characteristics or MC from the bulk of the batch should be sampled and analyzed separately.

When sampling a cargo, a number of factors must be taken into account that may affect the reliability of the test results and the safety of further transportation. In particular, the type of material, the method of its storage in stacks, railway wagons, containers or in transportation and handling systems such as conveyors, loading chutes, crane grabs, etc. are taken into account. An important aspect is the determination of the main characteristics of the cargo, in particular the moisture content (MC), transportable moisture limit (TML), bulk density and stacking coefficient. It is also necessary to take into account possible deviations in the distribution of moisture throughout the mass of the cargo, which may occur under the influence of weather conditions, natural drainage, the angle of natural slope, a decrease in the level of stocks in stacks or containers, as well as as a result of moisture migration. Special attention should be paid to changes in the properties of the material that may occur after its freezing. In cases where international or national standardized sampling procedures exist for specific types of cargo, such requirements must be strictly followed. In the absence of relevant standards, the recommendations given in section 4.6.4 of the IMSBC Code should be followed.

The number of sub-samples and the total sample size shall be determined by the competent authority or established in accordance with the requirements of the IMSBC Code depending on the volume of the consignment. For consignments weighing not more than 15,000 tonnes, one 200 g sample shall be taken for every 125 tonnes of the cargo to be shipped. For consignments weighing more than 15,000 tonnes but not more than 60,000 tonnes, one 200 g sample shall be taken for every 250 tonnes of the cargo. For consignments weighing more than 60,000 tonnes, one 200 g sample shall be taken for every 500 tonnes of the cargo to be shipped. This sampling procedure ensures the representativeness of the sample and the reliability of the determination of the physico-chemical characteristics of the cargo necessary for the assessment of the safety of its maritime transportation.

To prevent moisture loss from samples between the time they are taken and the time they are delivered to the testing laboratory, each sample should be clearly labeled and sealed tightly in plastic bags, preferably placed in a second bag or placed in plastic bottles. The sealed subsamples should be protected from bright sunlight to minimize heating and moisture loss/condensation in the bags.

MC testing should be carried out as soon as possible after sample collection to minimise moisture loss. MC determination should be carried out at a competent local laboratory to minimise the time required to send samples to the laboratory. It is recommended that as many sub-samples as possible are tested for MC. The best method of sampling a load is always during the movement of the load — either during the construction of the storage facility when the ore is being delivered to the stockpile or during the transfer of the ore from the stockpile for loading onto a barge. However, this is often not practical for many, as cargo information requirements are met prior to loading and/or due to the ore being exposed to rain in anticipation of shipment. Alternatively, sampling from the conveyor line is usually carried out, preferably during the construction of the stockpile, but if the ore is to be exposed to rain later or has been exposed to the open air for more than seven days, a further round of sampling should be carried out afterwards to demonstrate that the batch is still suitable for transport. Sampling while moving along the conveyor line during loading is unacceptable due to the requirement to provide a cargo certificate detailing TML and MC at the start of loading.

The amount of ore in the stockpile should be established either directly with the shipper or by estimating the length, width and height of the pile from which to calculate the total volume and assume a density of about 2 MT/m³. From the amount of ore, determine the number of samples required and then mentally divide the pile into smaller sections to simplify the sampling process. Calculate the number of subsamples to be taken from the smaller sections of the pile and plan exactly which parts to sample. Ideally, the stockpile should be flattened so that all parts of the pile are accessible and have the opportunity to be sampled. An excavator should be used to cut slots in the sides of the pile and holes dug from above to gain access to the core of the stockpile.

If an excavator is not available at all, this should be reported so that the sampling method can be adjusted. The most likely method would be to create the required number of holes dug into the pile surface to a depth of at least 50 cm by hand, and subsamples taken from the bottom of these holes. Care should be taken that the sample is not cross-contaminated with surface material.

For shallow sampling points around the pile, it may be sufficient to manually dig sample holes to a depth of approximately 50 cm. Where the pile is deeper, it is preferable to use ship-based equipment with a grab to dig deeper holes and sample them – provided, of course, that the barge is close to the ship's equipment. If any areas of the cargo hold are visually different from the rest of the cargo, these should be sampled and analysed separately.

The number of subsamples required should be determined based on the amount of cargo in the hold. As a minimum, each subsample should be taken by hand from a 50 cm deep pit dug, and care should be taken to ensure that surface material is not mixed in. If shipboard equipment is available, five pits should be dug, four in the corners and one in the centre of the hold, and samples should be taken from each pit at various levels from 50 cm below the surface.

The test is carried out using a half-filled jar of approximately 1 litre capacity containing a sample of the material to be tested. After noting the appearance of the sample, the jar is held in one hand and dropped sharply downward onto a hard, flat surface a total of 25 times from a height of approximately 20 cm at intervals of one to two seconds. The surface of the material is then examined for the presence of free moisture or liquid, e.g. a shiny flat surface. If these signs are indicated, the Code states that additional laboratory tests should be conducted on the material before it is accepted for loading.

It is important to note that the jar test is not intended to be used as a substitute for more accurate and reliable laboratory testing. In our experience, the interpretation of jar tests performed on iron ore (IOF), especially when the MC is around the TML but not significantly above the FMP, is difficult and requires considerable experience to interpret correctly. When the MC is above the

FMP, then the result is clearer and easier to recognize.

Conclusions. Transportation of solid bulk cargoes prone to liquefaction is accompanied by high risks of loss of vessel stability and emergency situations, which is confirmed by international statistics. The main risk factor is increased cargo humidity above the transportable limit, as well as insufficient control of the quality and condition of the cargo at the preparation and loading stage. Compliance with the requirements of the IMSBC Code, proper organization of sampling, timely laboratory determination of MC and TML, as well as completeness of information from the shipper are key conditions for safe transportation. Improving the professional training of ship crews and strict control of cargo operations significantly reduce the likelihood of accidents and contribute to increasing the overall level of safety of maritime transportation.

REFERENCES

4. Pie-Ya, Lu, and Chou Chien-Chang. Standard operating procedure for loading/unloading operations and navigational safety of bulk carriers as per charter party requirements. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, vol. 234, 2020, pp. 728–739. <https://doi.org/10.1177/1475090219875860>.
5. Kowalczyk, P., and S. Gourvenec. Solid bulk cargo liquefaction: numerical investigation and proposal of safety envelopes. Applied Ocean Research, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104607>.
6. Chen, Wei, et al. Modelling the stability of iron ore bulk cargoes during marine transport. Powder Technology, vol. 326, 2018, pp. 255–264. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.12.006>.

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Браташ К.Ю., Шубний О.Є., Суржик Ю.О.

*Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж Лозівська філія
(Україна)*

Вступ. Сучасне промислове виробництво є одним із ключових чинників економічного розвитку, проте водночас виступає значним джерелом антропогенного впливу на довкілля. Зростання обсягів виробництва, збільшення споживання сировини, енергії та води, і навіть утворення промислових відходів зумовлюють необхідність пошуку нових підходів до організації виробничих процесів. У цих умовах особливої актуальності набувають ресурсозберігаючі технології, що дозволяють знизити матеріаломісткість та енергоємність виробництва, зменшити викиди забруднюючих речовин, скоротити утворення відходів та забезпечити більш раціональне використання природних ресурсів [1; 3].

Впровадження ресурсозберігаючих технологій на промислових підприємствах сприяє не лише підвищенню економічної ефективності, а й формуванню екологічно безпечного виробничого середовища. У сучасних умовах все більшого значення набувають принципи сталого розвитку, ресурсозбереження та екологізації виробництва [2; 3].

Актуальність досліджень. Актуальність досліджень у галузі ресурсозбереження та екологічної безпеки обумовлена тим, що традиційні промислові технології характеризуються значним споживанням сировини, енергії та води, що призводить до виснаження природних ресурсів та зростання виробничих витрат [1]. Водночас промисловість залишається одним із основних джерел забруднення атмосферного повітря, водних об'єктів та ґрунтів, що негативно впливає на стан довкілля та здоров'я населення [3].

Сучасні вимоги до промислових підприємств передбачають необхідність впровадження енергоефективних, маловідходних та ресурсозберігаючих технологічних рішень, що сприяють зниженню техногенного навантаження на природне середовище [2; 4].

Постановка задачі. Метою дослідження є аналіз ролі ресурсозберігаючих технологій у забезпеченні екологічної безпеки промислових підприємств та визначення основних напрямів їхнього ефективного впровадження у сучасне виробництво.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. проаналізувати сутність та значення ресурсозберігаючих технологій у промисловості;
2. визначити основні напрями зниження ресурсоспоживання на підприємствах;
3. дослідити вплив ресурсозберігаючих заходів на екологічну безпеку виробничих процесів;
4. обґрунтувати перспективні шляхи впровадження сучасних ресурсозберігаючих рішень у діяльність промислових підприємств.

Результати досліджень.

Проведений аналіз показав, що ресурсозберігаючі технології є сукупністю організаційних, технічних і технологічних рішень, спрямованих на зниження споживання природних, енергетичних та матеріальних ресурсів при збереженні або підвищенні ефективності виробництва [1; 4].

Одним із ключових напрямів ресурсозбереження є енергозбереження. Для промислових підприємств це включає модернізацію енергоємного обладнання, застосування енергоефективних електродвигунів, автоматизованих систем управління технологічними процесами, теплоізоляції виробничих об'єктів, використання систем рекуперації та повторного використання енергії.

Другим важливим напрямом є матеріалозбереження. Воно передбачає зменшення

втрат сировини у процесі виробництва, застосування високоточних методів обробки, заміну токсичних та дефіцитних матеріалів безпечнішими аналогами, а також використання вторинної сировини [4].

Значний екологічний ефект забезпечує водозбереження. Впровадження оборотних та замкнених систем водопостачання, локальних очисних споруд та повторного використання очищених стічних вод дозволяє суттєво знизити водоспоживання та зменшити забруднення водних об'єктів [3].

На окрему увагу заслуговує скорочення утворення відходів та викидів. Впровадження маловідходних та безвідходних технологій, удосконалення систем сортування та переробки відходів, а також модернізація очисного обладнання дозволяють значно зменшити негативний вплив промисловості на довкілля [1; 3].

Важливою умовою ефективного впровадження ресурсозберігаючих технологій є системний підхід до управління екологічною та виробничою безпекою, що має поєднувати економічну доцільність, технічну модернізацію та дотримання екологічних вимог [2].

Висновки.

1. Ресурсозберігаючі технології є важливим напрямом модернізації промислового виробництва та основою екологічно безпечного функціонування підприємств.

2. Найбільш значущими напрямками ресурсозбереження є енергозбереження, матеріалозбереження, водозбереження та скорочення утворення відходів.

3. Впровадження ресурсозберігаючих технологій сприяє зменшенню забруднення навколишнього середовища, раціональному використанню природних ресурсів та підвищенню ефективності виробничих процесів.

4. Застосування сучасних ресурсозберігаючих рішень дозволяє підвищити екологічну безпеку та конкурентоспроможність промислових підприємств.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кубатко О. В., Ісмаков А. М. Концепція ресурсозбереження у контексті забезпечення еколого-економічної безпеки національної економіки. *Механізм регулювання економіки*. 2017. № 4. С. 56–65.

2. Замула І. В., Кірейцева Г. В. Економічна та екологічна безпека у контексті стійкого розвитку. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Економіка, управління та адміністрування*. 2011. № 1 (55). С. 196–198. DOI: 10.26642/jen-2011-1(55)-196-198.

3. Радченко О. О. Екологічна безпека сучасних держав в умовах глобальних викликів і загроз. *Публічне урядування*. 2021. № 3 (28). С. 109–118. DOI: 10.32689/2617-2224-2021-3(28)-11.

4. Білик В. В. Основні фактори, критерії і принципи ресурсозбереження машинобудівних підприємств в умовах сучасного господарювання. *Київський економічний науковий журнал*. 2025. № 11. С. 23–29. DOI: 10.32782/2786-765X/2025-11-4.

5. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Чинний від 2016-07-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMAL MANAGEMENT OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF AIR TRANSPORT OPERATION IN ACCORDANCE WITH INTERNATIONAL REQUIREMENTS

Belyaev M.O., Kalashnyk G.A.

*Ukrainian State Flight Academy
(Ukraine)*

Introduction. The current stage of air transport development is marked by rapid growth in transportation volumes, increasing complexity of air traffic, and a rise in the number of airfields and aircraft, which leads to a greater technogenic load on the environment. Aviation is among the sources of greenhouse gases, noise pollution, chemical impacts on the atmosphere, and also a factor in transforming natural ecosystems in areas surrounding airports. Therefore, the issue of environmental safety during the operation of air transport becomes systematically important and necessitates scientifically grounded management approaches.

International standards for environmental safety in aviation are established through the activities of the International Civil Aviation Organization (ICAO), particularly in Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation [1–3], which sets regulations for aircraft noise and emissions. Regionally, the environmental policy of aviation is aligned with the European Union's requirements to reduce the carbon footprint of the transport sector. Consequently, it is pertinent to develop a methodology for the optimal management of environmental safety in air transport operations, employing multi-criteria optimisation, systems analysis, and decision-making models.

Relevance of research. The increase in flight intensity results in: a rise in the concentration of nitrogen oxides, carbon dioxide, and aerosols in the surface layer of the atmosphere; expanded noise discomfort zones around airfields; higher aviation fuel consumption; and greater risks to public health in areas affected by airports. According to the global CORSIA initiative [4], implemented by ICAO, states are required to offset the increase in CO₂ emissions from international aviation. This creates a need for effective tools to assess and optimise the environmental parameters of flight operations. Modern studies [5; 6] demonstrate that the environmental safety of aviation should be viewed as a controlled system that integrates: aircraft technical characteristics, engine operating modes, flight paths, meteorological conditions, airport infrastructure features, and air traffic management. Therefore, it is necessary to formalise the task of optimal environmental safety management, considering multiple conflicting criteria.

Problem statement. The aim of this research is to develop a mathematical model for the optimal management of environmental safety in air transport operations. Let the environmental safety system be described by the state vector:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\},$$

where x_1 is CO₂ emission level; x_2 is NO_x emission level; x_3 is noise level; x_4 is fuel consumption; x_5 is flight duration.

The control parameters are:

$$U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\},$$

where u_i are the engine operating modes, flight altitude profile, speed, trajectory, take off and landing modes.

The task is to minimize the vector objective function:

$$F(X, U) \rightarrow \min,$$

within the limitations of flight performance, flight safety requirements and ICAO environmental standards.

Results. Let the control vector of the AT operational system be of the form:

$$u(t) = \left\{ u_1(t), u_2(t), \dots, u_n(t) \right\}$$

where $u_i(t)$ are parameters of flight modes, SID/STAR profiles, engine thrust modes, time constraints of operation.

Then the optimal control problem is formalized as a problem of minimizing the vector criterion:

$$\min_{u \in U} J \begin{bmatrix} J_{noise} \\ J_{emission} \\ J_{fuel} \\ J_{risk} \end{bmatrix},$$

where J_{noise} is integral indicator of acoustic impact (L_{den} , L_{night}); $J_{emission}$ is mass of NOx, CO₂, HC emissions; J_{fuel} is aviation fuel consumption; J_{risk} is environmental risk of exceeding standards.

To reduce the problem to a scalar form, we use the weighted sum method:

$$J_{\Sigma} = \sum_{k=1}^m \omega_k \vec{J}_k, \quad \sum \omega_k = 1,$$

where the weighting factors ω_k are determined based on sensitivity analysis and environmental policy priorities. Thus, a set of Pareto-optimal solutions is formed, which allows for a reasonable choice of compromise operating modes.

We consider the resource efficiency of aircraft as a dynamic characteristic that depends on flight modes, technical condition of the aircraft and air traffic organization. The fuel consumption functional is described by the equation:

$$F = \int_{t_0}^{t_f} \dot{m}_f(\vec{x}(t), \vec{u}(t)) dt,$$

where $\vec{x}(t)$ is the state vector of the system satisfying the equation of motion $\dot{x} = f(\vec{x}, \vec{u}, t)$.

The resource efficiency management problem can be reduced to a variation problem with constraints, for which the Pontryagin maximum principle is applied:

$$H = L(\vec{x}, \vec{u}) + \lambda^T f(\vec{x}, \vec{u})$$

where λ are conjugate variables.

The optimal controls obtained in this way provide: reduction of specific fuel consumption; reduction of CO₂ emissions; indirect reduction of acoustic load.

The ICAO CORSIA program defines global requirements for stabilization of CO₂ emissions at the level of the base period. Within the framework of this study, we interpret «green technologies» as: optimized aircraft flight profiles; implementation of CDA/NADP; use of sustainable aviation fuel SAF (in scenario analysis); digital decision support tools.

Compliance with CORSIA requirements is assessed by the indicator:

$$E_{net} = E_{actual} - E_{offset},$$

where E_{offset} are compensation measures.

The proposed optimization solutions allow to reduce without reducing transport efficiency.

To support decision-making, we will use a hierarchical management model that combines: strategic level (environmental policy); tactical level (Noise Action Plans); operational level (SID/STAR profiles).

The formalization of the hierarchical management model is carried out in the form of:

$$D = \arg \min_{d \in D} \bar{E}[J(d, \xi)]$$

where ξ – random factors (weather conditions, traffic).

The use of stochastic optimization allows to increase the robustness of management decisions.

The structure of a decision support system (DSS) is proposed, which integrates weather data, aircraft characteristics, environmental standards, and a multi-criteria optimization algorithm.

Conclusions. According to the results of the study, it was established that the environmental safety of air transport operation is a complex controllable system. A mathematical model of optimal management of the environmental safety of air transport operation is proposed, which can be the basis for creating a DSS in air navigation services. The multi-criteria approach provides a compromise between environmental friendliness and flight efficiency.

REFERENCES

1. ICAO. Environmental protection. Volume 1. Aircraft noise: Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. ICAO, Edition 3, July 2008, 258 pp. URL: <https://www.icao.int> (access 23.03.2026)
2. ICAO. Environmental protection. Volume 2. Aircraft Engine Emissions: Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. Edition 5, Document updated as of 01/01/2021. 93 p. URL: <https://www.icao.int> (access 23.03.2026)
3. ICAO. Environmental Technical Manual. Volume III. Procedures for the CO₂ emissions certification of aeroplanes (Doc 9501-3). 3rd Edition, 2023. 61 p. URL: <https://www.icao.int> (access 23.03.2026)
4. ICAO. 2024. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). URL: <https://www.icao.int/CORSIA> (дата звернення 23.03.2026)
5. Kalashnyk G.A., Belyaev M.O. Improving the criteria and methods for assessing the environmental safety of Ukrainian aviation transport in the context of European integration Science and technology today. №9 (50). S. 1223-1236. [https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-9\(50\)-1223-1236](https://doi.org/10.52058/2786-6025-2025-9(50)-1223-1236) [in Ukrainian].
6. Kalashnyk G.A., Belyaev M.O. Mechanisms for improving the environmental safety of Ukrainian civil aviation in accordance with international requirements and standards. Weapon systems and military equipment. 2025. № 1 (81). S. 103-109. <https://doi.org/10.30748/soivt.2025.81.13> [in Ukrainian].

МОДИФІКОВАНИЙ ЕПОКСИДНИЙ КОМПОЗИТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНО-РЕМОНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ

Букетов А.В., Соценко В.В., Рихтер М.О.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Розвиток транспортних технологій та транспортної індустрії в цілому потребує розробки і впровадження нових конструкційних матеріалів (КМ). Області застосування полімерних КМ, особливо при ремонтно-відновлювальних роботах засобів транспортного комплексу, постійно розширюються. При цьому з високою ефективністю застосовують термореактивні полімери на основі епоксидних смол завдяки поліпшеним фізико-механічним властивостям КМ [1, 2]. Властивості КМ регулюють хімічною природою інгредієнтів і технологічними режимами реакції тверднення. У цьому контексті цікавим є використання у комплексі хімічно-активних модифікаторів, синтезованих мікродобавок і дискретних волокон. На наш погляд, такі елементи забезпечать зміну структурної сітки полімеру на різних рівнях та етапах її формування, що дозволить покращити експлуатаційно-ремонтні характеристики матеріалів транспортного комплексу, які працюють під впливом агресивних середовищ.

Мета роботи — розробити модифікований епоксидний композит для підвищення експлуатаційно-ремонтних характеристик транспортного комплексу.

Результати досліджень. Розроблено науково-практичний метод підвищення експлуатаційно-ремонтних характеристик транспортного комплексу за рахунок застосування антикорозійного епоксидного композиту, який відрізняється від відомих встановленими закономірностями прогнозованого впливу фізично активних інгредієнтів на властивості реактопласту й обґрунтуванням механізмів міжфазової взаємодії компонентів при структуроутворенні матеріалу. Додатково розроблено модель проникнення агресивного середовища у захисне покриття, яка на основі ієрархічного поєднання структурних рівнів (мікро-, мезо- та макроструктура), що формуються після полімеризації матеріалу, пояснює механізм підвищення антикорозійних характеристик епоксикомпозиту із врахуванням режимів обмеженого набухання і стабілізації процесів хімічної деструкції.

Також розроблено математичну модель, що дозволила оптимізувати вміст модифікатора і дисперсного наповнювача у антикорозійному епоксидному композиті для підвищення експлуатаційно-ремонтних характеристик транспортного комплексу, яка відрізняється від існуючих тим, що враховує синергетичний ефект у підвищенні показників властивостей захисного покриття за критерієм руйнівних напружень внаслідок використання у комплексі вибраних компонентів.

Удосконалено процедуру технологічної схеми формування і полімеризації матеріалу для заливки (у випадку формування тривимірних об'єктів) або захисного покриття, яке відрізняється фунгіцидними властивостями і біологічною стійкістю до загальновідомих грибків та попереджує утворення продуктів метаболізму при експлуатації транспортних засобів.

Висновки. На основі проведених у роботі в комплексі експериментальних випробувань механічних і адгезійних властивостей, корозійної стійкості розроблено модифікований епоксидний композит для підвищення експлуатаційно-ремонтних характеристик транспортного комплексу. Розроблений матеріал можна використовувати у вигляді залитого у форму об'єкту (корпус механізму, підшипник, фундаментна підкладка), захисного антикорозійного покриття або спеціального клею з підвищеними характеристиками. Також удосконалено технологічну схему формування і полімеризації заливки у формі чи незалежно захисного покриття.

Область застосування полімерних матеріалів і захисних покриттів: водний

транспорт, морські порти, судно- та автомобілебудування, авіаційна, газотранспортна, нафтопереробна, хімічна промисловість, будівельні матеріали, військова техніка.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sandeep, V., Nandini, N., Kanaram, C. et al.: Investigation of Various Coating Resins for Optimal Anticorrosion and Mechanical Properties of Mild Steel Surface in NaCl Solution. Microstructure, Properties and Tribological Behaviour of Advanced Functional Materials. 2022. Article ID 2203717 (2022).
2. Hodul, J., Mészárosóvá, L., Drochytka, R.: Article recovery of industrial wastes as fillers in the epoxy thermosets for building application. Materials. 14 (13), 3490 (2021).

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗА РАХУНОК ВДОСКОНАЛЕННЯ ФОРМИ ОСЦИЛЮЮЧИХ СУДНОВИХ РУШІЙ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

*Воїнов О. П., Шостак В. П., Димо Б. В., Пацурковський П. А., Личко Б. М.
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Підвищення енергоефективності морського транспорту є одним із важливих завдань сучасного суднобудування. Значна частина енергії суднових двигунів витрачається не на створення корисної тяги, а на перемішування води та утворення турбулентних потоків.

Під час руху судна частина механічної енергії витрачається на утворення кільватерного сліду. Чим інтенсивніший цей слід, тим більші втрати енергії.

У природі водні організми переміщуються значно ефективніше. Спостереження за рухом риб показує, що вони практично не створюють помітного кільватерного сліду. Це свідчить про високий рівень ефективності такого способу руху.

Саме тому в сучасних дослідженнях все частіше застосовуються біоміметичні принципи, які передбачають імітацію руху гідробіонтів.

Одним із перспективних напрямків є використання осцилюючих пластинчастих рушіїв, які відтворюють рух хвостового плавника риб.

Актуальність досліджень. Проектування біоміметичних суднових рушіїв є складною інженерною задачею, оскільки ефективність їх роботи залежить від великої кількості взаємопов'язаних параметрів. До основних параметрів належать форма та площа пластини, жорсткість матеріалу, частота та амплітуда коливань, а також умови взаємодії рушіїв з водним середовищем.

Традиційні методи проектування передбачають проведення значної кількості експериментів і складних розрахунків, що потребує значних витрат часу та ресурсів. У зв'язку з цим у сучасних дослідженнях дедалі частіше застосовуються методи штучного інтелекту, які дозволяють значно прискорити процес оптимізації конструкцій.

Методи штучного інтелекту дають можливість аналізувати велику кількість варіантів геометрії рушіїв та визначати найбільш ефективні конструктивні рішення. За допомогою алгоритмів оптимізації можна моделювати різні форми плавникових рушіїв і оцінювати їхню ефективність у віртуальному середовищі.

Результати експериментальних досліджень можуть використовуватися для формування навчальних вибірок, на основі яких створюються моделі машинного навчання. Такі моделі здатні прогнозувати величину створюваної тяги залежно від геометричних параметрів рушіїв, властивостей матеріалу та режимів його роботи.

Застосування методів штучного інтелекту дозволяє значно скоротити час проектування пропульсивних систем, а також знайти конструктивні рішення, які складно отримати за допомогою традиційних інженерних методів.

Таким чином, використання технологій ШІ відкриває нові можливості для вдосконалення суднових рушіїв та підвищення енергоефективності суднових пропульсивних установок.

Для оптимізації геометричних параметрів пластинчастих рушіїв можуть використовуватися генетичні алгоритми та штучні нейронні мережі. Генетичні алгоритми дозволяють здійснювати пошук оптимальної форми рушіїв шляхом імітації еволюційних процесів, тоді як нейронні мережі можуть використовуватися для прогнозування величини тяги на основі експериментальних даних.

Актуальним є дослідження можливостей підвищення енергоефективності суднових пропульсивних установок шляхом вдосконалення форми осцилюючих пластинчастих рушіїв та застосування методів штучного інтелекту для їх оптимізації.

Постановка задачі. Для вирішення завдання енергозбереження шляхом вдосконалення форми осцилюючих суднових рушіїв необхідно розглянути теоретичні основи роботи пластинчастих рушіїв; проаналізувати можливість використання еластомічних матеріалів; розглянути конструкцію пропульсивного комплексу; обґрунтувати геометричні параметри плавникового рушія; спланувати та провести експериментальні дослідження.

Результати досліджень.

Використання еластомірних матеріалів

Раніше використання гнучких пластинчастих рушіїв було обмежене через відсутність матеріалів з необхідними механічними властивостями.

Сучасні еластомірні матеріали мають високу пружність; стійкість до багаторазових деформацій; довговічність; здатність працювати у водному середовищі. Тому вони можуть ефективно використовуватись для виготовлення пластинчастих рушіїв. У проведених дослідженнях модуль пружності еластомірних пластин змінювався в межах $2,42 \cdot 10^3$ – $56,2 \cdot 10^3$ Н/м². Це дозволило підібрати оптимальні характеристики матеріалу для створення рушіїв [1].

Конструкція пропульсивного комплексу

Пропульсивний комплекс складається з таких основних елементів: джерело енергії; електродвигун; механізм перетворення обертального руху у коливальний; пластинчастий рушій. Електродвигун створює обертальний рух, який за допомогою спеціального механізму перетворюється у коливальний рух пластини. Під час коливань пластина взаємодіє з водою і створює тягу, що забезпечує рух судна.

Для аналізу роботи системи була розроблена блок-схема пропульсивного комплексу.

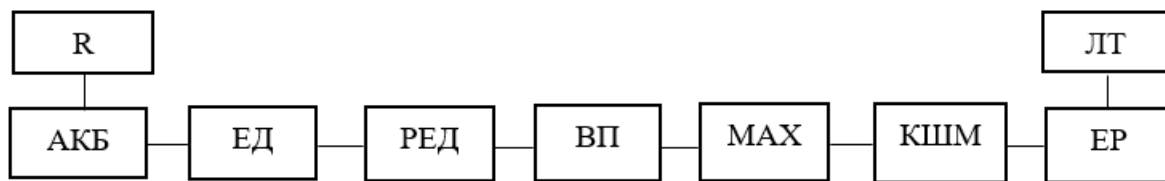


Рисунок 1 — Блок-схема пропульсивного комплексу з еластомірним рушієм:

R — регулятор обертів електродвигуна; АКБ - акумуляторна батарея; ЕД — електродвигун; РЕД — редуктор; ВП — валопровід; МАХ — маховик; КШМ — кривошипно-шатунний механізм; ЕР — еластомірний рушій; ЛТ — лазерний тахометр

Геометричні параметри плавникового рушія

Одним із важливих факторів ефективності осцилюючого рушія є його геометрична форма. У роботі розглянуто різні варіанти форми пластинчастих рушіїв, зокрема прямокутну та трапецієподібну. На рис 2 показано основні геометричні параметри рушія.

Матеріали для плавникових суднових рушіїв

Матеріали визначають ефективність та довговічність рушія. Для виготовлення еластомерних або плавникових рушіїв застосовуються такі матеріали:

- фторопласт ($\delta = 1$ – 2 мм), який має високу гнучкість, стійкість до води та солі;
- склотекстоліт ($\delta = 0,6$ – $1,8$ мм), марка СТЕФ-1, який є міцним, але менш гнучким; підходить для жорстких частин.
- «рідке скло» ($\delta = 1,5$ – $2,5$ мм);
- гума (резина) ($\delta = 1$ – $2,5$ мм), яка є оптимальною для сегментів, що створюють коливальну хвилю;
- текстоліт ($\delta = 0,5$ – 2 мм) — дешевий, але зносостійкий; використовується у проміжних частинах.

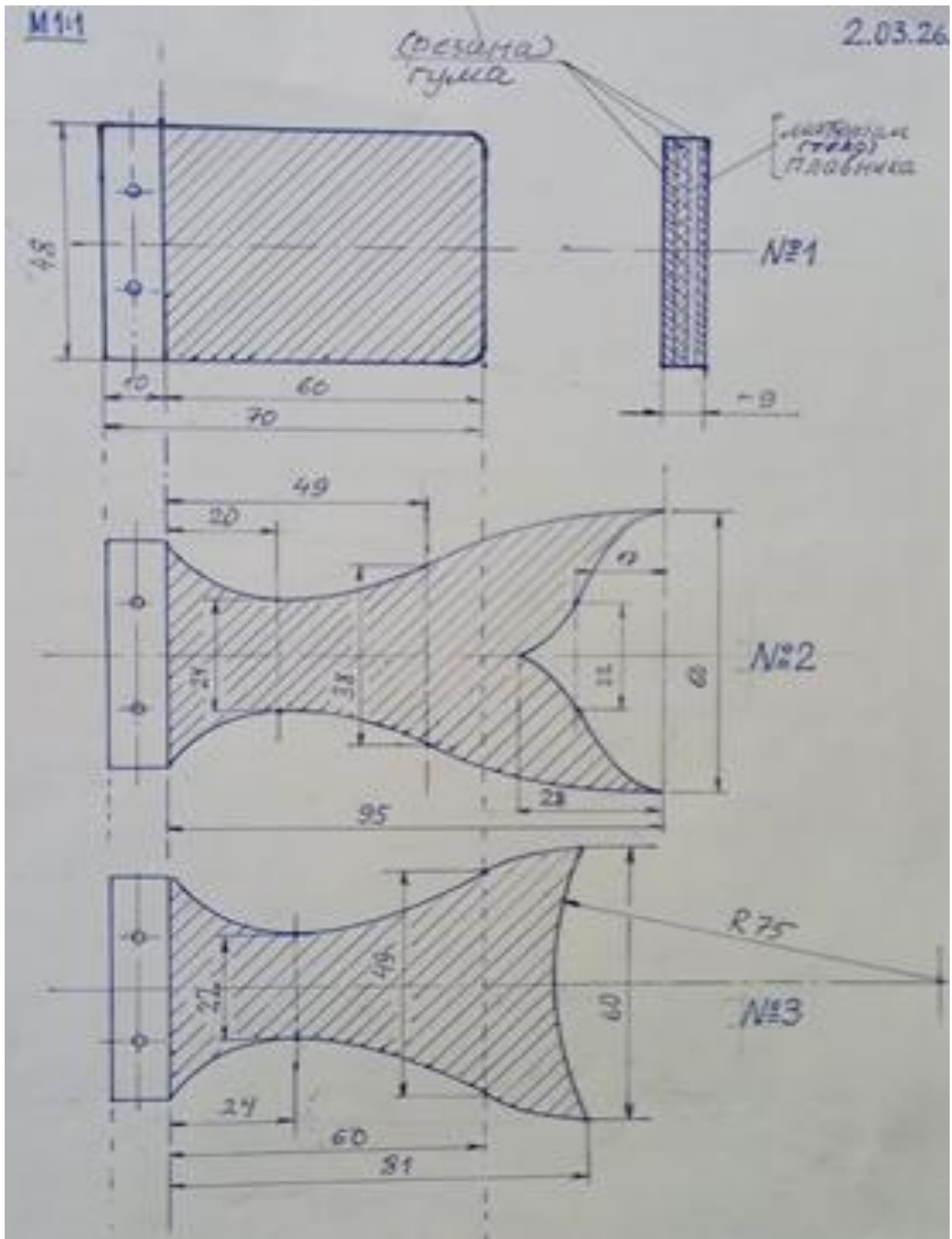


Рисунок 2 — Схема визначення геометричних параметрів пластинчастого рушіїв

Теоретичні основи роботи пластинчастих рушіїв

Одним із перших дослідників руху гідробіонтів був український інженер-кораблебудівник В.П. Костенко. Він розглядав хвостовий плавник риби як гнучку вібруючу пластину.

При коливальному русі пластини у воді виникають вихрові потоки та різниця тисків по обидві сторони пластини. Це призводить до утворення реактивної сили, яка забезпечує

рух вперед.

Пружні властивості пластини можуть бути визначені за законом Гука для пружної деформації пластини:

$$E = (F \cdot l) / (S \cdot \lambda),$$

де E — модуль пружності;

F — сила пружності;

l — довжина пластини;

S — площа поперечного перерізу;

λ — стрілка прогину.

Опис експерименту

У ході експериментальних досліджень були виготовлені та випробувані макети пропульсивних установок з пластинчастими рушійми різної геометричної форми, з метою визначення впливу форми рушія на величину створюваної тяги.

Випробування проводилися в лабораторних умовах із використанням динамометра для вимірювання сили тяги. Під час експериментів порівнювалися два варіанти пластинчастих рушіїв: прямокутної та трапецієподібної форми.

Отримані результати показали, що рушій трапецієподібної форми забезпечує більшу ефективність роботи пропульсивної установки. Зокрема, під час експериментів було встановлено, що трапецієподібний рушій створює тягу близько 0,3 Н, тоді як прямокутний рушій — близько 0,1 Н. Результати досліджень підтверджують, що геометрична форма пластинчастого рушія істотно впливає на ефективність створення тяги та загальні характеристики пропульсивної установки [2, 3].

Висновки. У результаті виконаного дослідження було розглянуто принципи роботи осцилюючих пластинчастих суднових рушіїв, що імітують рух хвостових плавників риб.

Досліджено вплив геометричних параметрів рушія на ефективність створення тяги. Проведені експериментальні дослідження показали, що форма пластинчастого рушія суттєво впливає на характеристики пропульсивної установки.

Встановлено, що використання трапецієподібної форми рушія дозволяє отримати більшу тягу порівняно з прямокутною формою. Це підтверджує доцільність пошуку оптимальної геометрії біоміметичних рушіїв.

Також показано перспективність використання еластомірних матеріалів для виготовлення гнучких пластинчастих рушіїв, які здатні ефективно взаємодіяти з водним середовищем.

Розглянуто можливість застосування методів штучного інтелекту для оптимізації геометричних параметрів рушія, що значно прискорює процес проєктування та підвищує ефективність суднових пропульсивних установок.

Отримані результати можуть бути використані у подальших дослідженнях біоміметичних рушіїв та при розробці енергоефективних пропульсивних систем для суден.

ЛІТЕРАТУРА

1. Використання еластомірних матеріалів для пластинчастих рушіїв рухової пропульсивної установки / В. Самохвалов та ін. XVII міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (MINTT - 2025) : Матеріали міжнар. науково-практ. конф., м. Одеса, 28–30 трав. 2025 р. 2025. С. 327–329. URL: <https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2025/05/Матеріали-MINTT-2025-p..pdf>.

2. Випробування макету пропульсивної установки з прямокутним вертикально-осцилюючим еластомірним пластинчастим рушієм. Вимірювання тяги. YouTube. URL: <https://youtube.com/shorts/oWEVrMen9fk>.

3. Випробування макету пропульсивної установки з трапецієподібним вертикально-осцилюючим еластомірним пластинчастим рушієм. Вимірювання тяги. YouTube. URL: <https://youtube.com/shorts/rNPPohNOLmM?>.

МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ МЕРЕЖІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ОЧИЩЕННЯ ПАЛИВА В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Врублевський Р. Є.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. У сучасних паливних системах ефективність очищення робочого середовища безпосередньо впливає на надійність та експлуатаційний ресурс двигунів. Традиційні алгоритми керування часто не справляються з динамічною зміною параметрів забруднення та нелінійністю процесів фільтрації. Дана стаття присвячена розробці та моделюванню нейро-нечіткої мережі (ННМ) ANFIS у середовищі MATLAB, яка поєднує переваги нечіткої логіки та здатність нейронних мереж до навчання для створення адаптивної системи контролю очищення палива.

Основна частина. MATLAB — це пакет прикладних програм і високорівнева мова програмування, яка використовується для чисельного аналізу, розробки алгоритмів, моделювання та візуалізації даних. Скорочення від «Matrix Laboratory» (Матрична Лабораторія), це потужний інструмент для науковців та інженерів, що працює з матрицями, виконує складні математичні графічні інтерфейси користувача [1].

ННМ прогнозування результату очищення палива (ОП) реалізовувалася за допомогою спеціального графічного редактора ANFIS у модулі Fuzzy Logic Toolbox системи MATLAB [2].

Редактор ANFIS дозволив: завантажити та створити модель ННМ, візуалізувати її структуру, виконати її навчання, налаштувати і змінити її параметри, а також використати налагоджену мережу при отриманні результатів (кількості алюмосилікатів).

Графічний інтерфейс редактора ANFIS викликається з командного рядка функцією `anfisedit` [3].

Вікно візуалізації даних займає основну частину графічного інтерфейсу, що розташований нижче головного меню.

Для створення гібридної мережі прогнозування результату ОП були завантажені дані, які були отримані під час експерименту. З цією метою був створений файл з початковими даними за допомогою редактора електронних таблиць MS Excel [4].

Генерація (кнопка `Generate FIS`) структури нечіткого виведення FIS (Сугено) здійснюється після завантаження файлу повчальних даних з диска комп'ютера з розширенням `*.dat`. Також у цьому діалоговому вікні можна вибирати необхідну функцію приналежності.

За допомогою змодельованої системи управління в середовищі пакета MATLAB визначалося, яка функція приналежності даватиме найменшу погрішність прогнозування. Для цього в даному вікні вибиратимемо наявні функції приналежності та генеруватимемо СНВ. Обирається така функція приналежності для якої буде мінімальна погрішність змодельованої залишкової намагніченість від отриманої при експерименті.

Механізм роботи розробленої системи:

Високий WП (шторм, вологість) → паливо забруднене, система очікує зростання Al+Si. Низька ефективність сепаратора → погане очищення → більше Al+Si.

Багато циклів очищення фільтра → фільтр перевантажений → більше домішок проходить.

Сисема комбінус ці фактори, щоб оцінити очікуваний вміст алюмосилікатів (Al+Si). Потім, у реальному застосуванні, результат можна подати як сигнал на: регулювання швидкості сепаратора чи запуск додаткового сепаратору, зміни тиску подачі палива, активацію додаткового циклу очищення автоматичного фільтру чи перехід на додатковий фільтр.

Вибираємо модель нечіткої системи для моделювання розробленої системи – Sugeno

(краще підходить для автоматичного керування, дає числові функції на виході – зручніше інтегрувати у Simulink) (рис.1).

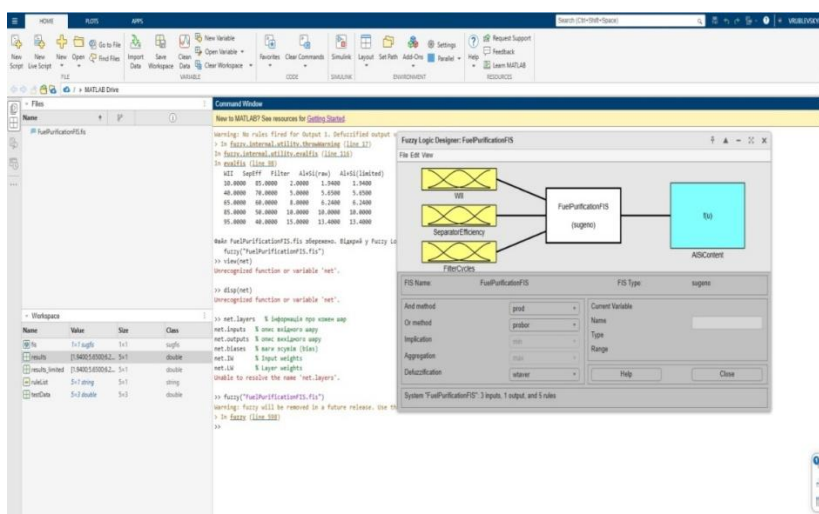


Рисунок 1 — Візуалізація ННМ прогнозування результату ОП в вікні MATLAB

Розроблений до запуску приклад MATLAB-скрипту, який створює повноцінну Fuzzy Logic систему контролю Sugeno для системи очищення суднового палива від алюмосилікатів залежно від:

Weather Impact Index (WII) — вплив погодних умов (0–100)

Separator Efficiency (%) — ефективність сепаратора (0–100)

Filter Cycles — кількість очищень автоматичного фільтра (0–20)

і видає оцінку вмісту Al+Si (мг/кг), обмежену ≤ 15 мг/кг.

Висновок. Моделювання та реалізація системи контролю за вмістом алюмосилікатів у паливі в середовищі MATLAB є важливим етапом для підвищення ефективності та надійності роботи паливопідготовчих систем суднових енергетичних установок. Завдяки використанню інструментів MATLAB, зокрема Fuzzy Logic Toolbox та Simulink, була створена математична модель, що враховує вплив основних параметрів — параметрів сепаратора, частоти самоочищення автоматичного фільтра та погодних умов.

Така реалізація дозволяє дослідити взаємозв'язки між цими параметрами, оцінити динаміку зміни вмісту алюмосилікатів у паливі та визначити оптимальні режими роботи системи очищення паралельно з проведенням експериментів на реальному обладнанні. Отримані результати будуть використані для автоматизації процесу очищення палива, зниження зносу деталей двигуна, економії енергоресурсів і забезпечення відповідності вимогам стандарту ISO 8217 щодо максимально допустимого вмісту алюмосилікатів (≤ 15 мг/кг).

Таким чином, моделювання та реалізація системи контролю в MATLAB є ефективним інструментом для прогнозування, оптимізації та підвищення якості паливної підготовки на морських судах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lembit Salasoo, J.Keith Nelson. Simulation and measurement of corona for electrostatic precipitation powered precipitators. Appl.Phys. 19'85 V.58. №8. P.2949–2957
2. MatLab based books (Neural/Fuzzy). Режим доступу: <http://www.mathworks.com/support/books/index.jsp?category=9> (дата звернення: 18.09.2025).
3. Michalewicz, Z. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. Springer, 1996.
4. North American Fuzzy Information Processing Society. <http://nafips.org>

АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЙСОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ МОРСЬКОГО СУДНА НА ОКЕАНСЬКИХ СПОЛУЧЕННЯХ

Голюков В. А., Голюкова В.В., Данилов К.С., Сінюта К.О.
Національний університет «Одеська морська академія»
(Україна)

Вступ. У сучасних умовах створення автоматичних систем забезпечення життєдіяльності людини у звичайних та екстремальних умовах стає актуальною багатоаспектною і міждисциплінарною проблемою. Це у повній мірі відноситься до життєдіяльності людини у Світовому океані. Вона містить не тільки задачі рішення оптимізації мікроклімату середовища помешкання, але і інші фізичні, хімічні і біологічні фактори. Тим не менш, традиційний підхід до рішення цієї проблеми обмежиться головним чином науковим обґрунтуванням і створенням систем кондиціонування повітря (СКП) тільки по метеорологічних параметрам на основі статистичних моделей мікроклімату.

Зміна характеристик і призначення суден, складу морського та річкового флоту, технологій перевезення вантажів, підвищення антропогенного забруднення повітряного середовища, єдність зон праці і відпочинку, швидке і часте переміщення судна з однієї кліматичної зони у іншу в динаміці рейсу, постійне перебування моряків у штучному середовищі, де каюти і безпосередньо судно призводять до навантаження адаптивних механізмів, зниженню компенсаторних ресурсів, працездатності людини, вимагаючи рішення задачі управління середовищем помешкання взагалі.

Завдяки комплексної автоматизації судових технічних засобів на базі сучасної електроніки і керуючись обчислювальних машин стало можливим не тільки підвищити ефективність роботи суден морського господарського комплексу України, але і вирішити задачу покращення умов помешкання екіпажів і пасажирів.

На сьогоднішній день, конфлікт між наукою і практикою виникає у встановленні адекватності моделей між власними експериментальними даними з даними інших дослідників при математичному моделюванні енергетичної системи «людина – судно – зовнішнє середовище» стосовно відкритих територій судна і кондиціонованих приміщень.

Основна частина. У сучасних дослідженнях задачі управління процесами кондиціонування повітря приділяється велика увага.

Так у посібнику [1] розглядаються сучасні вимоги до параметрів повітряного середовища в судових приміщеннях. Особлива увага приділена процесам кондиціонування та очищення повітря, а також технічним рішенням для комфортних умов помешкання екіпажу в обмеженому просторі.

Підручник [2] містить теоретичне обґрунтування важливості аероіонного складу атмосфери. Автор аналізує вплив техногенних факторів на деградацію іонного фону та описує методи штучної іонізації як спосіб покращення екологічного стану закритих приміщень судна.

У найсвіжішому дослідженні [3] аналізується якість повітря на великих пасажирських судах. Основний фокус направлений на ефективність сучасних систем вентиляції та інтегрованих технологій очищення повітря від мікрочастинок і біоаерозолів у реальних умовах експлуатації.

Наукова стаття [4] описує механізм впливу від'ємних іонів на осадження дисперсного пилу (РМ 2.5). Результати експериментів довели, що іонізація суттєво знижує дозу вдихуваних забруднювачів, що є критично важливим для кают і робочих зон судна.

У міжнародному стандарті ISO 7547:2022 «Ships and marine technology ...» (2022) [5] встановлені норми для проектування систем вентиляції. Він є базою для впровадження будь-яких додаткових пристроїв обробки повітря, зокрема іонізаторів на комерційних судах.

Стаття [6] присвячена гігієнічного аналізу умов праці моряків. Автори пов'язуючи стан здоров'я екіпажу з фізико-хімічними характеристиками повітря на борту, наголошуючи на необхідність вдосконалення систем життєзабезпечення.

У технічній документації виробника морського обладнання [7], яка описує впровадження біполярної іонізації в судових HVAC-системи. Наведені дані щодо нейтралізації вірусів, бактерій та неприємних запахів без утворення озону.

Для вирішення проблеми у СКП протягом 2021–2026 років на судах: «THALASSA TYNI», «THASSINI AVRA», «MSC ANITA», «MSC BERSNGERE» та «MSC NELA» були проведені експериментальні дослідження з іонного складу повітря судна.

При проведенні судових випробувань в рейсах, окрім штатного обладнання судна, були використані спеціально калібровані лабораторні термометри, психрометри, електроанемометри різного типу, секундоміри, манометри зразкові, барометри-анероїди та конденсаційний лічильник аероіонів у повітрі типу CPC.

Дослідження фізико-хімічної сутності процесів підготовки повітря у СКП, яких зазнає первинне атмосферне повітря, встановили його деіонізацію — зменшення вмісту іонів і зниження концентрації озону.

Слід відмітити, що суднове середовище у приміщеннях має значну різницю в іонному складі повітря порівняно із зовнішнім атмосферним:

- кількість аероіонів у ньому значно менша;
- ступінь іонізації у вентильованих приміщеннях більший;
- з підвищенням температури до 40...50 °C і зниженням відносної вологості до 20...30 % (котельні відділення) ступінь іонізації повітря знижується;
- у приміщеннях з підвищеним рівнем електромагнітного випромінювання спостерігається підвищення кількості аероіонів;
- іонний склад повітря у судових приміщеннях при штучній вентиляції може слугувати своєрідним тестом на ефективність вентиляції та забруднення повітря.

Ці якісні дані збігаються з даними вищезгаданих праць. Разом з тим, аналіз метеорологічних даних, проведений на основі 122 експериментів і 3660 вимірів, вказує на достатню стабільність погоди.

Відсоткове співвідношення нульових і позамежних значень легких іонів вкрай низьке (10 % нульових і 33 % позамежних). Легких позитивних іонів у морському повітрі виявилось вкрай мало. Ці іони з'являлися тільки в протоках, за наявності продуктів згоряння енергетичної установки судна, в порту на причалах, особливо під час роботи колісної техніки та біля берегової лінії.

Кількість легких іонів співвідносна з кількістю легких негативних. Результати статистичної обробки експериментальних даних дозволили отримати кореляцію концентрації іонів на палубі та в приміщенні, що кондиціюється - n_k :

$$n_k = 10^{\frac{\lg n_n - b}{a}} \quad (1)$$

Числові значення коефіцієнтів рівняння (1) наведено в табл. 1.

Спостерігається тривала відсутність легких позитивних іонів біля поверхні води та високі концентрації негативних іонів внаслідок балоелектричного ефекту під час взаємодії повітряних мас із водною масою та масою металу корпусу судна як основного накопичувача негативних зарядів.

Таблиця 1 — Значення коефіцієнтів рівняння (1)

Склад іонів	A	b	Коефіцієнт кореляції
Легкі негативні	0,42±0,02	3,77±1,0	0,49
Легкі позитивні	0,68±0,38	2,43±1,7	0,46
Важкі негативні	0,55±0,14	3,1±0,8	0,73
Важкі позитивні	0,78±0,22	1,34±0,12	0,80

Наведені результати досліджень дозволили виявити дуже важливі закономірності зміни іонного складу атмосферного повітря біля поверхні Світового океану та визначити стан мікроклімату повітряного середовища в приміщеннях суден.

Досить високі концентрації іонного складу повітря у водах Світового океану та в кондиціонованому повітрі приміщень дають змогу відмовитися від використання іонізаторів та озонаторів у системах підготовки повітря для житлових приміщень.

Висновки.

1. Достатньо високі концентрації аероіонів в акваторіях Світового океану та низькі — у повітрі житлових і службових приміщень судна створюють умови для застосування іонізаторів та озонаторів у системі підготовки повітря.

2. Відкрито можливості використання фізичних і хімічних факторів при розробці заходів безпеки повітряного середовища для членів екіпажів і пасажирів за біологічним фактором- шляхом мінімізації розповсюдження хвороботворних мікробів, продуктів деструкції полімерних матеріалів та переносників трансмісійних хвороб.

3. При моделюванні процесів у системі «людина — зовнішнє середовище — судно» у реальному часі необхідне застосування комплексного підходу, який полягає у використанні біполярних іонізаторів низької напруги, що не продукують озон, у поєднанні з достатнім зволоженням повітря. Це дозволяє наблизити мікроклімат закритих приміщень до відкритого морського повітря. Слід відмітити, що біполярні іонізатори (HVAC Retrofit) з дуже низьким енергоспоживанням (~10 Вт) використовуються у малих приміщеннях, а гідродинамічні аероіонізатори — у зонах відпочинку та великих приміщеннях.

4. Перспективи подальших досліджень спрямовані на розвиток судових систем життєзабезпечення, які ґрунтуються на інтеграції сенсорів іонного складу в загальне управління мікрокліматом (HVAC). Це дозволить автоматично підтримувати концентрацію аероіонів на рівні, наближеному до морського повітря.

ЛІТЕРАТУРА

1. Піщанська В. В., Подмазко О. С. Суднові системи мікроклімату комфортного призначення : навч. посіб. Одеса : ОНТУ, 2023. 132 с. URL: <http://ontu.edu.ua> (дата звернення: 07.05.2026).
2. Станкевич С. В. Техноекоекологія : підручник. Київ : Кондор, 2020. 338 с.
3. Mikula A., Brągoszewska E., Sówka I. Monitoring of indoor air quality at a large sailing cruise ship. *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 962. Art. 178444. DOI: doi.org.
4. Zhu J., Wang S., Fang Z. Effects of Negative Ion Purifiers on Indoor Particulate Dosage. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, No. 1. P. 264. DOI: doi.org.
5. ISO 7547:2022. Ships and marine technology — Air-conditioning and ventilation of accommodation spaces — Design conditions and basis of calculations. 3rd ed. Geneva : ISO, 2022. 28 p.
6. Шевченко С. М., Голіков В. В. Дослідження факторів, що впливають на стан здоров'я плавскладу. Сучасні проблеми морського транспорту та безпека мореплавства . Херсон : ХДМА, 2021. С. 18–25. URL: <http://promonograph.org> (дата звернення: 07.05.2026).
7. Breathe Ionizer for Marine HVAC Systems. Dometic Group Technical Reports. 2021. URL: <http://dometic.com> (дата звернення: 07.05.2026).

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ МОРСЬКОГО КОНТЕЙНЕРОВОЗА ШЛЯХОМ ВСТАНОВЛЕННЯ НОСОВОГО ЗАХИСНОГО ЕКРАНУ (НА ПРИКЛАДІ ULCV MSC NELA)

Данилов К. С.

Національний університет «Одеська морська академія»
(Україна)

Вступ. Сучасна морська галузь перебуває під тиском жорстких екологічних норм ІМО щодо зниження викидів парникових газів. Для ультравеликих контейнеровозів (ULCV), таких як MSC NELA (23,656 TEU), аеродинамічний опір палубного вантажу стає вагомим чинником перевитрати палива. Модернізація судна шляхом встановлення носового захисного екрана (windshield) є актуальним рішенням для покращення енергоефективності флоту та відповідності індексу СІІ [1, 2].

Основна частина. Об'єктом дослідження є контейнеровоз типу Megamax-24 — MSC Nela (IMO 9839296). Судно має довжину 399,75 м та ширину 61,03 м, що створює величезну площу лобового опору повітряному потоку [8, 10].

Технічне рішення модернізації полягає у монтажі сталевого аеродинамічного екрана на баку судна. Це дозволяє спрямувати потік повітря над першими штабелями контейнерів, ламінізуючи його та мінімізуючи зону турбулентності, яка зазвичай виникає перед надбудовою або вантажем [3, 4].

Розрахункова частина. Для розрахунку використано метод порівняльного аналізу сили аеродинамічного опору (R_a):

$$R_a = 0,5 \cdot \rho \cdot C_x \cdot A \cdot V^2, \quad (1)$$

де:

- $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$ — щільність повітря;
- $A \approx 2450 \text{ м}^2$ — площа лобової проєкції MSC NELA з повним завантаженням;
- C_x — коефіцієнт опору (знижується з 0.9 до 0.72 після модернізації [1]).
- V — швидкість вітру.

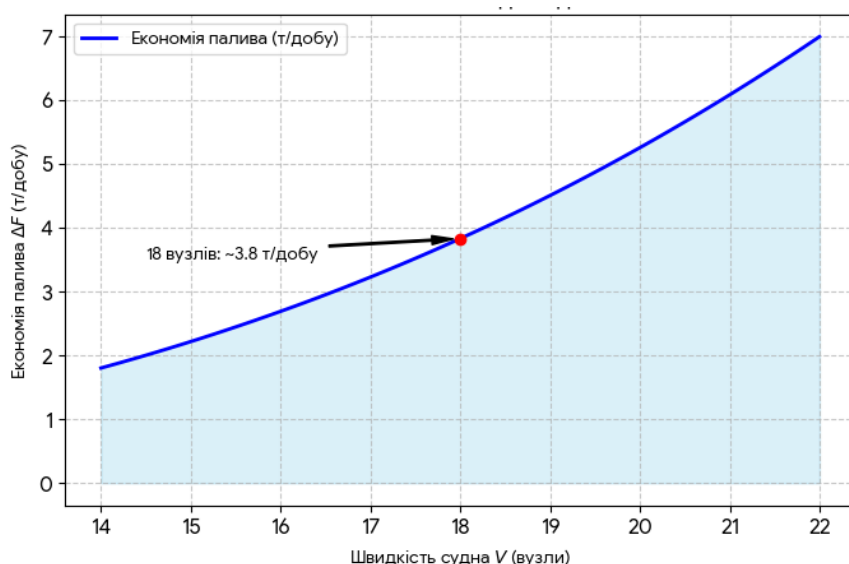


Рисунок 1. — Залежність економії палива від швидкості судна MSC NELA

Ця залежність (рис.1) нелінійна оскільки опір повітря зростає пропорційно квадрату швидкості V^2 , а потужність двигуна — кубу швидкості V^3 , ефективність екрана стає значно відчутнішою на високих швидкостях.

При швидкості 16 вузлів економія становить приблизно 2.8 тонни на добу, при проектній швидкості 18 вузлів економія досягає 3.8 – 4.2 тонни на добу, а на максимальних швидкостях (21-22 вузли) ефект може перевищувати 6 тонн на добу.

Результати моделювання. При середній швидкості 18 вузлів встановлення екрана призводить до зниження загального опору судна на 2.1–2.5%. Це еквівалентно зменшенню навантаження на головний двигун (потужність 66,220 кВт) на величину близько 1390–1650 кВт [9].

Обговорення результатів. Впровадження даної модифікації на MSC NELA демонструє економію палива у розмірі 3.8–4.2 тонни на добу при крейсерській швидкості. Протягом кругового рейсу (Азія — Північна Європа) загальна економія складає 35–45 тонн палива [5, 6].

Важливим супутнім результатом є захист контейнерів від гідродинамічних ударів хвиль та зниження вітрового тиску на кріплення (lashing) перших секцій вантажу [7].

Висновки. Аналіз результатів модернізації MSC NELA підтверджує високу ефективність носових екранів. Це технічне рішення дозволяє знизити експлуатаційні витрати та викиди CO₂, забезпечуючи судну рейтинг енергоефективності класу «А/В». Термін окупності проєкту за поточних цін на низькосірчисте паливо становить 2.5 роки.

Встановлення екрана найбільш виправдане на лініях Asia-Europe, де судна класу ULCV часто змушені збільшувати швидкість для дотримання розкладу (schedule recovery).

ЛІТЕРАТУРА

1. Li Y., Dong G. Optimization design of a windshield for a 12,000 TEU container ship. *Ocean Engineering*. 2024. Vol. 291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116413>
2. MSC Shipmanagement Ltd. Sustainability Report 2021. Limassol, 2022. 54 p. URL: <https://www.msc.com/-/media/files/sustainability/reports/2021-report.pdf> (дата звернення: 09.05.2026).
3. Chen Z. et al. Aerodynamic drag reduction of large container ships. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2021. Vol. 210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104515>
4. Wind shield device for container ship: pat. KR20210085432A Republic of Korea. DSME. 2021. URL: <https://patents.google.com/patent/KR20210085432A/en> (дата звернення: 09.05.2026).
5. DNV. Energy Efficiency and Decarbonization Report. Hamburg, 2023. URL: <https://www.dnv.com/maritime/publications/maritime-forecast-to-2050/> (дата звернення: 09.05.2026).
6. Malmek K., Rosén A. Wind resistance of container ships: Influence of container stowage and wind shields. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, Iss. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmse10070942>
7. ABS. Guide for Energy Efficiency Measures. Houston, 2022. URL: https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/design_and_analysis/297_energyefficiencymeasures/pub297_e-guide.pdf (дата звернення: 09.05.2026).
8. MSC NELA (IMO 9839296) - Technical Specs. MarineTraffic: [сайт]. 2024. URL: https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:5951663/mmsi:351052000/imo:9839296/vessel:MSC_NELA (дата звернення: 09.05.2026).
9. MAN Energy Solutions. Marine Engine Programme Data. 2023. URL: <https://www.man-es.com/marine/products/planning-tools-and-downloads/marine-engine-programme> (дата звернення: 09.05.2026).
10. The Motorship. MSC's focus on aerodynamics and retrofitting. 2023. URL: <https://www.motorship.com/mscs-focus-on-aerodynamics-and-retrofitting/> (дата звернення: 09.05.2026).

ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ В АГРЕГАТАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Добуш А. І., Матвієнко Р. М., Криштопа С. І.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
(Україна)*

Вступ. Важливою характеристикою якості агрегатів технологічного транспорту є висока енергоефективність, що відображає робочі властивості даних об'єктів, які закладаються в процесі проектування та виробництва машин, реалізуються при експлуатації та відновлюються за допомогою ремонту.

Актуальність досліджень. Головними причинами зниження енергоефективності коробок перемикання передач технологічного транспорту є втрати на тертя та втрати тиску [1]. Ці енергетичні втрати зростають як при збільшенні, так і при зменшенні в'язкості оливи і можуть призвести не тільки до зниження корисних зусиль в КПП, але і до повної втрати роботоздатності агрегатів, коли тиску оливи в агрегатах недостатньо [2].

Постановка задачі. Метою досліджень є встановлення у лабораторних умовах зв'язку температури робочої оливи агрегатів трансмісії на енерговитрати тертя КПП мобільних установок технологічного транспорту.

Результати досліджень. Експериментальні дослідження втрат потужностей в коробках перемикання передач полягало у визначення сумарних механічних і гідравлічних втрат на додання опору обертання шестерень КПП у залежності від температури трансмісійної рідини. При прокручуванні автоматичної (або механічної) КПП електродвигуном визначались напруга та струм, які споживались електродвигуном. На рис. 1 показано проведення досліджень в промислових умовах.



Рисунок 1 — Проведення промислових випробовувань на базі мобільного агрегату для гідравлічного розриву пластів мод. FC-2251

В експериментальних дослідженнях використовувалась МКПП насосного агрегату УН1-630×700 на шасі КрАЗ-260 та АКПП насосного агрегату FC-2251 на шасі Kenworth T800. Для визначення втрат потужності в коробках перемикання передач їхні КПП демонтовувались і поєднувались з електродвигуном постійного струму. Для прикладу на рис. 2 показана демонтована та зблокована з електродвигуном АКПП насосного агрегату FC-2251 на шасі Kenworth T800.

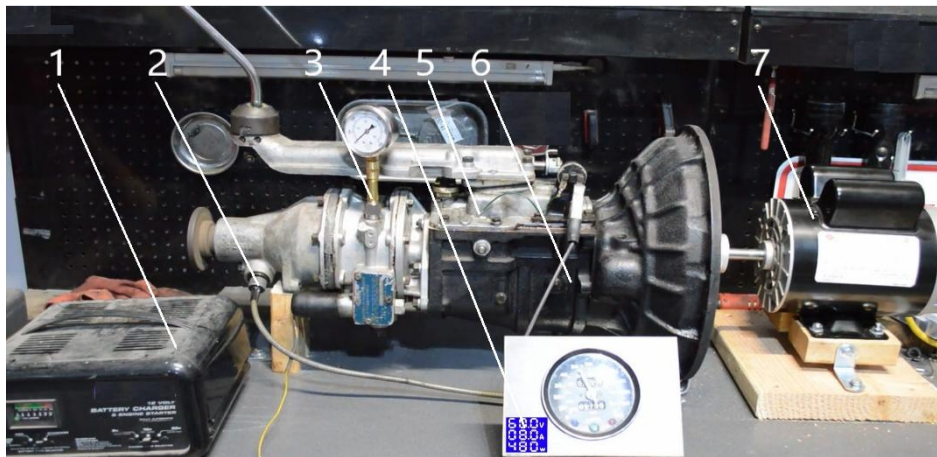


Рисунок 2 — Визначення втрат потужності в АКПП:

- 1 — блок живлення; 2 — датчик частоти обертання вихідного вала КПП; 3 — контрольний манометр; 4 — контрольно-вимірювальний блок з ватметром та тахометром; 5 — термопара; 6 — КПП агрегату; 7 — електродвигун

Вимірювання втрат потужності в коробках перемикання передач проводилось за різних температур КПП з обов'язковим встановленням потужностей механічних втрат, які втрачаються в самому електричному двигуні. Температури КПП визначались за показами термопари, зануреною в трансмісійну рідину в середині коробок перемикання передач.

У результаті експериментальних досліджень було визначено залежності втрат потужностей в коробках перемикання передач у залежності від температур трансмісійних рідин (рис. 3).

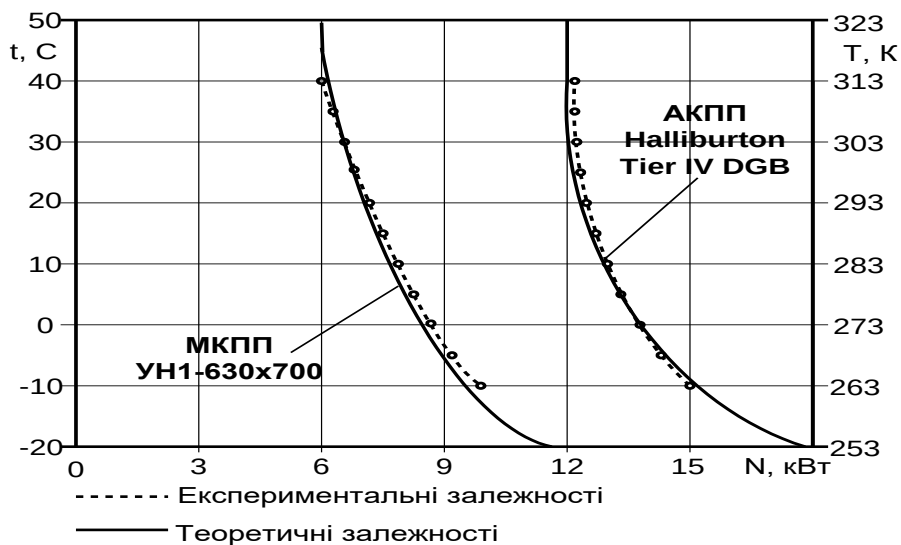


Рисунок 3 — Залежності втрат потужностей в коробках перемикання передач у залежності від температур трансмісійних рідин (олив)

Наприклад, потужність, яка витрачалась для прокручування валів коробок перемикання передач, за температури трансмісійної рідини мінус 10 °С для АКПП насосного агрегату FC-2251 на шасі Kenworth T800 склала 14,95 кВт, для МКПП насосного агрегату УН1-630×700 на шасі КрАЗ-260 — 9,92 кВт.

Висновки. Результати експериментів показали, що мінімальні значення втрат потужності для АКПП насосного агрегату FC-2251 на шасі Kenworth T800 досягались за температури трансмісійної рідини плюс 41 °С на рівні 12,2 кВт і при подальшому зростанні температури практично не змінювались. Мінімальні значення втрат потужності для МКПП насосного агрегату УН1-630×700 досягались за температури трансмісійної рідини плюс

49°C на рівні 5,9 кВт і при подальшому зростанні температури практично не змінювались.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wang, Z., Hu, S., Ji, H., Wang, Z., & Liu, X. (2018). Analysis of lubricating characteristics of valve plate pair of a piston pump. *Tribology International*, 126, 49–64.
2. Rundo, M. (2017). Models for flow rate simulation in gear pumps: A review. *Energies*, 10(9), 1261.

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ

Дощенко Г.Г.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Сучасний етап розвитку морського транспорту характеризується стрімким зростанням рівня автоматизації суднових технічних систем, зокрема електроенергетичних установок. Суднові електростанції є складними багаторівневими комплексами, що забезпечують безперебійне енергопостачання всіх споживачів на борту судна, включаючи рушійні установки, навігаційне обладнання та допоміжні системи. Надійність і ефективність їх функціонування безпосередньо впливають на безпеку судноплавства, економічність експлуатації та екологічні показники судна.

У зв'язку з ускладненням структури суднових електроенергетичних систем і підвищенням вимог до їх функціонування, зростає роль систем автоматичного управління, які забезпечують контроль, регулювання, захист та оптимізацію режимів роботи енергетичного обладнання. Такі системи повинні функціонувати в умовах змінних навантажень, перехідних режимів, а також можливих відмов окремих елементів, що висуває високі вимоги до їх надійності, адаптивності та інтелектуальності.

Особливої уваги потребують перехідні режими роботи суднових електростанцій, під час яких найбільш імовірно виникнення аварійних ситуацій, спричинених як технічними несправностями, так і помилками обслуговуючого персоналу. У таких умовах традиційні підходи до управління не завжди забезпечують необхідний рівень ефективності, що обумовлює необхідність впровадження нових методів аналізу та підтримки прийняття рішень.

Одним із найбільш ефективних інструментів дослідження та вдосконалення систем автоматичного управління є математичне моделювання. Воно дозволяє відтворювати роботу суднових електроенергетичних систем у різних режимах експлуатації, оцінювати вплив зовнішніх і внутрішніх факторів, аналізувати поведінку системи при відмовах та оптимізувати алгоритми управління без ризику для реального обладнання. Крім того, моделювання створює можливості для підготовки фахівців, формуючи практичні навички дій у нештатних ситуаціях. [1]

Актуальним напрямом розвитку систем автоматичного управління є інтеграція інтелектуальних методів, зокрема систем підтримки прийняття рішень та елементів нечіткої логіки, які дозволяють враховувати невизначеність, неповноту інформації та людський фактор. Використання таких підходів сприяє підвищенню якості управління, зниженню аварійності та забезпеченню більш ефективного розподілу енергетичних ресурсів судна.

Таким чином, дослідження аспектів моделювання систем автоматичного управління суднових електроенергетичних станцій є важливим і актуальним завданням, спрямованим на підвищення надійності, безпеки та енергоефективності сучасних суден, а також на вдосконалення підготовки фахівців морської галузі.

Актуальність досліджень. Сучасні судна оснащуються складними автоматизованими електроенергетичними системами, від надійності та ефективності яких безпосередньо залежить безпека експлуатації судна. Зростання рівня автоматизації та ускладнення технічних комплексів підвищує вимоги до підготовки обслуговуючого персоналу, а також до методів аналізу та прогнозування роботи систем. Особливої актуальності набуває дослідження перехідних режимів роботи та можливих аварійних ситуацій, які часто виникають через відмови обладнання або помилки операторів.

Моделювання систем автоматичного управління дозволяє не лише дослідити поведінку суднових електроенергетичних станцій у різних режимах роботи, але й своєчасно

виявити їхні слабкі місця, оцінити надійність і ефективність функціонування. Крім того, використання моделей систем підтримки прийняття рішень та сучасних математичних методів, зокрема нечіткої логіки, сприяє зниженню аварійності та підвищенню енергоефективності суднових установок.

Постановка задачі. Задачею даної роботи є підвищення ефективності та надійності функціонування суднових електроенергетичних станцій шляхом удосконалення систем їх автоматичного управління на основі моделювання.

Для досягнення поставленої задачі необхідно вирішити такі питання:

- проаналізувати структуру та принципи функціонування систем автоматичного управління суднових електроенергетичних станцій;
- дослідити особливості роботи систем у перехідних режимах та при виникненні аварійних ситуацій;
- розробити або вдосконалити модель системи автоматичного управління з урахуванням можливих відмов і помилок операторів;
- інтегрувати до моделі блок підтримки прийняття рішень для зниження аварійності;
- оцінити надійність системи на основі математичного моделювання та визначити її слабкі місця;
- проаналізувати ефективність запропонованих рішень щодо підвищення продуктивності та енергоефективності суднової електростанції.

Результати досліджень. Встановлене на судах обладнання автоматизації забезпечує виконання широкого кола завдань управління, контролю та сигналізації, які пов'язані із рухом судна та функціонуванням усіх технічних засобів. Моделювання таких систем сприяє закріпленню навичок вирішення критичних ситуацій, що можуть виникати внаслідок раптових відмов основних компонентів судна [1].

Автоматичне управління головним двигуном зазвичай включає:

- комплекс датчиків і виконавчих механізмів, встановлених безпосередньо на головному двигуні (ГД);
- блоки керування двигуном і пристрої його контролю;
- систему дистанційного керування та контролю.

Спільна робота цих засобів забезпечує виконання основних функцій управління, контролю та захисту ГД:

- підготовка до пуску;
- пуск і зупинка;
- вимірювання та відображення контрольних параметрів;
- аварійно-попереджувальна сигналізація;
- захист у всіх режимах роботи як шляхом автоматичної аварійної зупинки, так і за допомогою блокувальних засобів.

Система дистанційного керування і контролю головним двигуном (ГД) забезпечує передачу всієї необхідної інформації до реєстратора рейсу та вирішення завдань дистанційного управління, контролю і сигналізації.

Комплекс засобів також забезпечує управління та моніторинг електроенергетичної станції: роботу дизель-генератора в місцевому й дистанційному режимах, його автоматичну зупинку за сигналом «Аварія», а також контроль мереж змінного і постійного струму.

Окрім автоматизації головних енергетичних установок і електроенергетичних станцій, система забезпечує керування та контроль великої кількості загально суднових систем.

Засоби контролю при цьому відіграють важливу роль у забезпеченні безпечної експлуатації судна, запобігаючи накопиченню відмов і зменшуючи ймовірність порушення основних функцій системи. Усі технічні засоби контролю утворюють ієрархічну структуру, яка тісно пов'язана із загальною структурою комплексу.

У підсистемі контролю забезпечуються всі необхідні способи відображення інформації:

- індикація параметрів і сигналізація про нормальний стан;
- попереджувальна сигналізація при виході параметрів за робочі межі;
- аварійна сигналізація при перевищенні допустимих значень.

Під час моделювання застосовуються різні методи, які спрямовані на підвищення ефективності системи. Одним із них є використання моделі системи підтримки прийняття рішень для зменшення кількості аварій у перехідних режимах.

Запропонований метод підвищення продуктивності енергетичної установки ґрунтується на зменшенні кількості помилок персоналу шляхом інтеграції в систему автоматичного управління блоку моделювання та блоку підтримки прийняття рішень. Блок моделювання дозволяє прогнозувати параметри ще до їх фактичної появи, а блок підтримки рішень — оцінювати результати на основі нормативів і критеріїв якості роботи.

Також застосовується математичний апарат нечіткої логіки для зниження аварійності та підвищення ефективності. Для цього досліджуються перехідні режими, що виникають через помилки операторів під час рейсів.

У результаті впровадження такої системи підвищується продуктивність суднової електростанції [1].

Окрему увагу приділяють моделюванню надійності суднової електростанції. На основі прогнозування визначаються слабкі місця системи, а за допомогою структурних схем і математичних моделей обчислюється середній час напрацювання на відмову за різних умов експлуатації [2].

Під час проектування моделей систем управління необхідно аналізувати енергетичні профілі судна, компоновку силових установок і систем управління. Енергетичні профілі поділяються на складові, що дозволяє встановити їх зв'язок із призначенням судна та розробити алгоритми їх розрахунку. Також досліджується взаємозв'язок між профілем потужності та структурою енергетичної установки.

На основі цього розробляється модульний рівень управління, який забезпечує досягнення необхідних параметрів автоматизації шляхом поєднання стратегій мінімізації енергоспоживання та автоматичного перемикання [3].

Результати моделювання використовуються для оцінки ефективності запропонованих інновацій, аналізу стабільності компонентів та вдосконалення системи управління. Запропонований підхід забезпечує модульність і може бути застосований для прогнозування енергетичних характеристик нових суден [4].

Висновки. У результаті проведеного дослідження розглянуто особливості побудови та функціонування систем автоматичного управління суднових електроенергетичних станцій, а також проаналізовано їх роботу в штатних, перехідних і аварійних режимах. Встановлено, що ефективність і надійність таких систем значною мірою залежать від якості алгоритмів управління та здатності враховувати можливі відмови обладнання і помилки обслуговуючого персоналу.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність використання математичного моделювання як інструменту дослідження та оптимізації роботи суднових електроенергетичних систем. Запропоновано підхід до вдосконалення систем автоматичного управління шляхом інтеграції блоку моделювання та системи підтримки прийняття рішень, що дозволяє прогнозувати поведінку системи в перехідних режимах і завчасно оцінювати наслідки керуючих впливів.

Показано, що застосування методів нечіткої логіки та сучасних підходів до обробки інформації сприяє зниженню рівня аварійності та підвищенню якості управління. Проведена оцінка надійності дозволила виявити потенційно слабкі елементи системи та визначити напрямки їх удосконалення.

Отримані результати можуть бути використані як при підготовці фахівців морської галузі, так і при проектуванні та модернізації суднових енергетичних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Improving the Ship's Power Plant Automatic Control System by Using a Model-Oriented Decision Support System in Order To Reduce Accident Rate Under the Transitional and Dynamic Modes of Operation / I. Voytetsky, T. Voytetskaya, L. Vyshnevskiy, I. Kozyryev, O. Maksymova, M. Maksymov, V. Kryvda. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 3(2) (111) С. 57–66.
2. Дощенко Г.Г., Наговський Д.А. Моделювання і дослідження систем автоматичного управління в судновій енергетиці. Матеріали п'ятої Міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми сталого розвитку морської галузі - PSDMI-2025», 03-04 грудня 2025 р. Одеса. С. 12–15.
3. Дощенко Г.Г., Наговський Д.А. Методологія прогнозування стану електрообладнання за показниками параметричних відмов. Науковий журнал «Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки». Том 37 (76), № 1, частина 1. Київ: Видавничий дім «Гельветика». 2026. С. 334–343.
4. Sujesh, G., Ramesh, S. (2018). Modeling and control of diesel engines: A systematic review. *Alexandria Engineering Journal*, 57 (4), 4033–4048. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aej.2018.02.011>.

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ БПЛА НА ВСІХ ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

Калашник Г.А., Бублик А.С.
Українська державна льотна академія
(Україна)

Вступ. Безпілотні повітряні літальні апарати (БПЛА) стали невід’ємним елементом сучасних авіаційних систем, виконуючи широкий спектр завдань — від моніторингу та аерофотозйомки до спеціальних і військово-прикладних завдань. Стрімкий розвиток технологій автономного управління, цифрових каналів зв’язку, бортових обчислювальних комплексів і систем навігації зумовлює підвищення вимог до їхньої надійності та безпеки експлуатації. Нормативна база, зокрема положення International Civil Aviation Organization (ICAO) та European Union Aviation Safety Agency (EASA), визначає загальні принципи забезпечення льотної придатності та управління ризиками, однак специфіка БПЛА (високий рівень автоматизації, відсутність екіпажу на борту, складна програмна складова) потребує адаптації та удосконалення традиційних методів оцінки надійності на всіх етапах життєвого циклу [1; 2].

Актуальність досліджень. Актуальність досліджень зумовлена такими чинниками, як зростання інтенсивності застосування БПЛА в цивільному та оборонному секторах; ускладнення архітектури систем, що включають програмно-апаратні комплекси, системи штучного інтелекту та мережеву взаємодію [3]; підвищення вимог до безпеки польотів у спільному повітряному просторі, включаючи інтеграцію з пілотованою авіацією; необхідність переходу до ризик-орієнтованого підходу у технічному обслуговуванні та управлінні ресурсами. Існуючі традиційні методи оцінки надійності (статистичний аналіз відмов, середній наробіток на відмову, інтенсивність відмов) часто не враховують вплив програмного забезпечення, кіберзагрози, алгоритмічні помилки автономних систем, деградаційні процеси сенсорів та електроніки [4]. Отже, необхідна удосконалена інтегрована методика, яка поєднує класичну теорію надійності з методами системної інженерії, аналізу ризиків та цифрового моніторингу.

Постановка завдання. Метою дослідження є розроблення та обґрунтування удосконаленого підходу до оцінки надійності БПЛА на всіх етапах їх життєвого циклу. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати існуючі методи оцінки надійності авіаційної техніки; визначити специфічні особливості БПЛА, що впливають на показники надійності; розробити удосконалену інтегровану модель оцінки надійності з урахуванням структурної складності системи, програмної складової, експлуатаційних факторів, впливу середовища; запропонувати алгоритм переходу до прогнозової моделі технічного обслуговування; сформулювати критерії оцінювання ефективності впроваджених удосконалених методів.

Результати. Життєвий цикл БПЛА охоплює етапи концептуального проєктування, розроблення, виробництва, випробувань, експлуатації, технічного обслуговування та утилізації. На кожному з цих етапів виникають специфічні ризики відмов, що потребують комплексної методології оцінки та прогнозування надійності. Виконана систематизація факторів, що впливають на надійність БПЛА [5], дозволяє поділити їх на такі класи: 1) конструкторські (резервування каналів управління, модульність архітектури), 2) технологічні (якість виробництва, контроль параметрів), 3) програмні (помилки алгоритмів, оновлення програмного забезпечення (ПЗ)); 4) експлуатаційні (умови навколишнього середовища, режими польоту); 5) організаційні (якість технічного обслуговування).

Для розробки інтегрованої моделі оцінки надійності важливим є врахування усіх класів факторів. Тому запропонована багаторівнева модель оцінка надійності, яка послідовно враховує на першому рівні структурну надійність за допомогою методів аналізу

дерева відмов, аналізу видів і наслідків відмов; аналізу блок-схем надійності БПЛА. На другому рівні оцінюється програмна надійність шляхом використання метрик складності коду, аналізу тестування та статистичних моделей відмов ПЗ. На третьому рівні експлуатації пропонується оцінювати експлуатаційну надійність за допомогою впровадження моніторингу параметрів у режимі реального часу, оцінки деградації компонентів, моделей прогнозування ресурсу. На четвертому рівні модернізації для переходу від регламентного технічного обслуговування до стан-орієнтованого на сьогодні найбільш ефективним є створення моделі прогнозування відмов на базі використання цифрового двійника певної моделі БПЛА, яка акумулює дані телеметрії, формує тренди деградації, здатна визначати критичні відхилення та прогнозувати імовірність відмови за допомогою алгоритмів машинного навчання. Комплексне застосування такої багаторівневої інтегрованої моделі дозволить знизити імовірність критичних відмов, скоротити непродуктивні простой, оптимізувати витрати на технічне обслуговування та підвищити загальний рівень експлуатаційної безпеки для БПЛА. Кількісні критерії оцінювання повинні включати такі показники, як коефіцієнт готовності, середній час безвідмовної роботи, імовірність безвідмовної роботи за заданий період часу, показник експлуатаційного ризику.

Додатково запропоновано використовувати формалізовану кількісну декомпозицію показників надійності відповідно до етапів життєвого циклу БПЛА (табл. 1).

Таблиця 1 — Кількісна декомпозиція надійності БПЛА за етапами життєвого циклу

Етап	Основні показники	Методи оцінки	Вихідні дані
Проектування	Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$, структурна надлишковість	Аналіз дерева відмов, видів і наслідків відмов, блок-схем надійності	Удосконалені схеми систем, логічні зв'язки
Виробництво	Показник технологічної надійності	Статистичний контроль якості	Дані контролю
Випробування	Інтенсивність відмов $\lambda(t)$	Прискорені ресурсні випробування	Протоколи тестів
Експлуатація	Коефіцієнт готовності K_g	Аналіз експлуатаційної статистики	Телеметрія, журнали ТО
Модернізація	Індекс деградації	Порівняльний трендовий аналіз	Дані цифрового двійника

При виконанні БПЛА польоту за маршрутом, ймовірність виконання польотного завдання описується як [5; 6]:

$$P = \prod_{i=1}^n P_i,$$

де $P_1 = P(\Delta x_i < \Delta_{i_{\text{нред}}}), (i = \overline{1, n})$; $P_2 = P(t_{\phi} < t_3)$; $P_3 = P(a_i < a_{i_{\text{нред}}})$; Δx_i — відхилення i -ї — ої координати вектору стану; $\Delta_{i_{\text{нред}}}$ — гранично допустимі відхилення за i -юю координатою; t_{ϕ} та t_3 — фактичний і заданий час досягнення необхідної дальності польоту БПЛА; a_i — деякі параметри навігаційного модуля БПЛА; $a_{i_{\text{нред}}}$ — гранично допустимі значення параметрів навігаційного модуля БПЛА. Тоді умови для виконання основного польотного завдання БПЛА будуть мати наступний вигляд:

$$\Delta x_i(t) < \Delta_{i_{\text{нред}}} (t), (i = \overline{1, n});$$

$$t_{\phi} = \frac{L(t)}{V_{\text{сеп}}} \leq t_3,$$

де $\Delta x_i(t) = x_{i_{\text{зад}}} (t) - x_i(t)$ є відхиленням координат вектора стану від заданого $x_{i_{\text{зад}}} (t)$.

БПЛА є системою з n з'єднаних підсистем (автопілоту, навігаційного модуля, каналу передачі даних), надійність $N_{\text{sys}}(t)$ якої визначається, як:

$$N_{\text{sys}}(t) = \prod_{i=1}^n N_i(t),$$

Для резервованих каналів управління БПЛА надійність будемо визначати як:

$$N_{\text{res}}(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - N_i(t)),$$

Це дозволяє вже на етапі проєктування оптимізувати конфігурацію резервування автопілоту, навігаційного модуля та каналу передачі даних та забезпечити системну надійність БПЛА.

Ризик виникнення відмови певної підсистеми БПЛА визначимо як:

$$R = P_f \cdot C,$$

де P_f — ймовірність відмови, C — тяжкість наслідків відмови.

Використаємо структурно-функціональну модель БПЛА, яка враховує взаємозалежність трьох ключових контурів: контур управління польотом, який включає автопілот, модульний блок ІНС, блок СНС, сервоактуатори; контур енергозабезпечення, який включає акумулятори, силову установку; контур зв'язку та обміну даними, що поєднує радіоканал, супутниковий канал, телеметрію. Будемо використовувати трирівневу шкалу оцінки критичності стану для БПЛА, яка включає катастрофічний рівень критичності, тобто повна втрата БПЛА; критичний рівень — переривання роботи БПЛА; незначний рівень — локальне відхилення параметрів роботи. Це дозволяє ранжувати відмови за пріоритетністю усунення. Це, по суті, є використання ризик-орієнтованого підходу до аналізу відмов, більш удосконаленого у порівнянні з традиційними методами.

Програмна надійність і безпека програмного забезпечення (ПЗ) БПЛА є критичними, оскільки збої або відмова можуть призвести до втрати БПЛА та створити загрозу для людей. Архітектура ПЗ має передбачати багаторівневий захист, що включає контроль цілісності даних, виявлення й обробку помилок, відмов, резервування ключових функцій та автоматичний перехід у безпечний режим. У разі критичних відхилень система повинна виконувати безпечні сценарії для БПЛА, зокрема автоматичну посадку, повернення до точки старту або передачу керування оператору. Обов'язковим є ведення детальних журналів для аналізу інцидентів і вдосконалення алгоритмів.

Енергоефективність особливо важлива для малих БПЛА з обмеженим ресурсом акумулятора. ПЗ має бути оптимізоване за споживанням процесорних і пам'яттєвих ресурсів, використовувати адаптивну частоту обробки даних та динамічне керування живленням підсистем для максимізації тривалості польоту. Для ПЗ БПЛА потрібно передбачити автоматичну конфігурацію базових параметрів, майстри початкового запуску, зрозумілу документацію та розвинені засоби діагностики для швидкого виявлення й усунення відмов та збоїв [7].

Для БПЛА малого та середнього розміру будемо враховувати деградацію ПЗ $\lambda_{\text{ПЗ}}(t)$ як стохастичний процес:

$$\lambda_{\text{ПЗ}}(t) = \lambda_0 + k \cdot U(t),$$

де $U(t)$ — інтенсивність використання процесорного ресурсу, k — коефіцієнт накопичення помилок у ПЗ. Це дозволить прогнозувати збільшення ризику програмних збоїв при тривалих місіях БПЛА.

Впровадження цифрового двійника БПЛА дозволяє підвищити експлуатаційну безпеку, зменшити ризик відмов та забезпечити відповідність сучасним вимогам авіаційної безпеки. До цифрового двійника БПЛА пропонуємо включити математичну модель аеродинаміки, електротехнічну модель енергосистеми, алгоритмічну модель автопілоту, базу історичних відмов. Алгоритм роботи цифрового двійника БПЛА буде включати:

1. Збір телеметрії в режимі реального часу.
2. Фільтрація шумів (фільтр Калмана).
3. Побудова трендів деградації ПЗ.
4. Прогноз залишкового корисного терміну служби (ЗКТЛ).
5. Формування попереджувального сигналу.

Залишковий корисний термін служби (ЗКТС) — це прогнозний час, протягом якого обладнання, компонент БПЛА працюватиме ефективно та безпечно, перш ніж вийде з ладу або потребуватиме заміни. Це ключовий показник у прогнозному технічному обслуговуванні (ТО), що базується на поточних даних щодо стану певного обладнання, а не на стандартних графіках проведення ТО. Фактично, ЗКТС це час від поточного моменту (спостереження) до закінчення терміну служби. Використання ЗКТС допоможе максимізувати термін служби компонентів, оптимізувати витрати на ремонти або модернізацію ПЗ. ЗКТС змінюється залежно від умов експлуатації, навантаження та реального стану обладнання БПЛА. Модель ЗКТЛ реалізуємо через регресійний аналіз:

$$ЗКТС = \frac{X_{crit} - X(t)}{\dot{X}(t)},$$

де $X(t)$ — поточний параметр (наприклад, внутрішній опір акумулятора), X_{crit} — критичне значення.

Порівняльний аналіз регламентного, реактивного, за фактичним станом та прогнозованого підходів до ТО БПЛА показав (табл. 2), що використання саме прогнозованого підходу до ТО на базі оцінки ЗКТС знижує незаплановані відмови на та витрати на ТО і час простою.

Таблиця 2 – Результати аналізу підходів до технічного обслуговування БПЛА

Підхід	Характеристика	Недоліки та переваги
Регламентний	ТО через фіксований інтервал	Надмірні витрати
Реактивний	Після відмови	Високий ризик
Залежний від стану	За фактичним станом	Потребує аналітики
Прогнозний	На основі прогнозу	Найбільш ефективний

У результаті дослідження сформовано математично обґрунтовану модель оцінки надійності БПЛА, інтегровано програмну та апаратну складові в єдину систему оцінювання, розроблено механізм прогнозування відмов на основі використання цифрового двійника, обґрунтовано ефективність використання прогнозованого технічного обслуговування БПЛА. Таким чином, розроблено удосконалений підхід, якій дозволяє перейти від фрагментарної оцінки надійності до системного управління життєвим циклом БПЛА з кількісно вимірюваними показниками ефективності.

Висновок. За результатами дослідження встановлено, що традиційні методи оцінки надійності авіаційної техніки потребують адаптації до специфіки БПЛА, зокрема з урахуванням програмно-апаратної інтеграції та автономності систем. Запропоновано використання інтегрованої багаторівневої моделі оцінки надійності, яка охоплює всі етапи життєвого циклу БПЛА від проєктування до експлуатації та модернізації Обґрунтовано

доцільність впровадження цифрового двійника та алгоритмів прогнозування ресурсу для переходу від експлуатаційного до стан-орієнтованого технічного обслуговування БПЛА. Запропонований підхід дозволяє підвищити експлуатаційну безпеку, зменшити ризик відмов та забезпечити відповідність сучасним вимогам авіаційної безпеки.

Перспективами подальших досліджень є інтеграція кібербезпеки в модель надійності та формування єдиної цифрової платформи управління життєвим циклом безпілотних авіаційних систем.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гришин В.М., Шульгін А.А. Економічні аспекти обґрунтування експлуатаційних витрат на підтримання справності авіаційної техніки впродовж строку її служби. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. 2019. Випуск 15 (22). С.144–147.
2. Калашник Г. А., Калашник-Рибалко М. А. Ознаки та критерії функціональної стійкості інтегрованого комплексу бортового обладнання сучасного повітряного судна та перспективні напрямки його розвитку. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних сил*. 2021. №2 (42). С.7–15. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.68.01>
3. Jarraya I., Al-Batati A., Bilal Kadri M., Abdelkader M., Ammar A., Boulila W. & Anis Koubaa A. Gns-denied unmanned aerial vehicle navigation: analyzing computational complexity, sensor fusion, and localization methodologies. *Satellite Navigation*. 2025. 69. <https://doi.org/10.1186/s43020-025-00162-z>
4. Ahmad M. W., & Akram M. U. Uav sensor failures dataset: Biomisa arducopter sensory critique (basic). *Data in Brief*. 2024. 52, 110069. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.110069>
5. Калашник-Рибалко М. А., Калашник Г. А. Удосконалення методу синтезу оптимально розподіленої структури інтегрованого комплексу бортового обладнання літального апарата за показниками функціональної стійкості. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних сил України*. 2021. №1(42). С.41–49. <https://doi.org/10.30748/nitps.2021.42.05>
6. Tymochko O., Fustii V., Kolesnyk G., Olizarenko S., Kalashnyk G., Kulish R., Tymoschuk O., Galinskji D. Inter-Object Navigation of Unmanned Aerial Vehicles to Increase the Efficiency and Accuracy of Inspection of Power Lines. *Problemele Energeticii Regionale*. 1(57). 2023. P.28–38. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2023.1-57.03>
7. Wang A., Guo Y., Chen H. Sensor Data Fusion Optimization in UAV Integrated Navigation Based on Matrix Factorization. *Array*. 2025. 7. 524 <https://doi.org/10.1016/j.array.2025.100524>

ФОРМУВАННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА МІКРОСТРУКТУРА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПРИ LHW ТА EBW ЗВАРЮВАННІ

Кирилах С. В.

*Національний університет «Запорізька політехніка»
(Україна)*

Вступ. У сучасних умовах розвитку транспортного машинобудування підвищення експлуатаційної надійності та довговічності зварних конструкцій є одним із ключових науково-технічних завдань. Залишкові напруження (σ_{res}), що формуються під час зварювання, істотно впливають на міцність, тріщиностійкість і ресурс елементів конструкцій, особливо у випадку використання високоміцних матеріалів, зокрема титанових сплавів (Ti-6Al-4V) [1].

Для сплавів системи Ti-6Al-4V характерні значні температурні градієнти та високі швидкості охолодження під час зварювання, що зумовлює формування неоднорідного термонапруженого стану, локальних пластичних деформацій і складних фазових перетворень ($\alpha \leftrightarrow \beta$). Це призводить до виникнення значних залишкових напружень, які можуть знижувати механічні характеристики та стабільність геометрії виробів [1–3].

Сучасні дослідження зосереджені на застосуванні висококонцентрованих джерел енергії, зокрема лазерно-гібридного (LHW) та електронно-променевого зварювання (EBW). Ці технології забезпечують локалізований тепловий вплив, зменшення зони термічного впливу (HAZ) та покращений контроль мікроструктури зварного шва (WM) у порівнянні з традиційними методами (TIG, MIG). Це сприяє зниженню залишкових напружень (σ_{res}) і підвищенню стабільності з'єднань [4].

Моделювання методом скінченних елементів (FEM) у поєднанні з експериментальними даними дозволяє прогнозувати температурні поля, напружено-деформований стан і фазові перетворення, а також встановлювати зв'язок між параметрами процесу, мікроструктурою та σ_{res} . Актуальним залишається аналіз термомеханічної поведінки зварних з'єднань Ti-6Al-4V. Метою роботи є оцінка впливу технологічних параметрів LHW та EBW на термонапружений стан і підвищення надійності та довговічності транспортних конструкцій.

У роботі [5] досліджено термомеханічну поведінку зварних з'єднань Ti-6Al-4V із застосуванням сучасних висококонцентрованих джерел енергії. Для вирішення проблеми залишкових напружень і контролю мікроструктури у зварних з'єднаннях Ti-6Al-4V застосовано лазерно-гібридне GTA зварювання, яке поєднує лазерне та дугове джерела енергії, забезпечуючи глибоке проплавлення, стабільний тепловий внесок і зменшення зони термічного впливу (HAZ) [6]. Вузькозасорна конфігурація та коаксіальне розташування джерел енергії (рис. 1) забезпечують контроль теплового градієнта, стабілізацію зварної ванни та зниження концентрації залишкових напружень.

Інтеграція експериментальних досліджень і FEM-моделювання показала, що лазерно-гібридний процес забезпечує більш рівномірний розподіл температурного поля порівняно з традиційним TIG-зварюванням, а максимальні залишкові напруження концентруються в центральній зоні шва. Оптимізація технологічних параметрів (потужність лазера, струм GTA та швидкість зварювання) дозволяє зменшити σ_{res} і забезпечити повне проплавлення з'єднання.

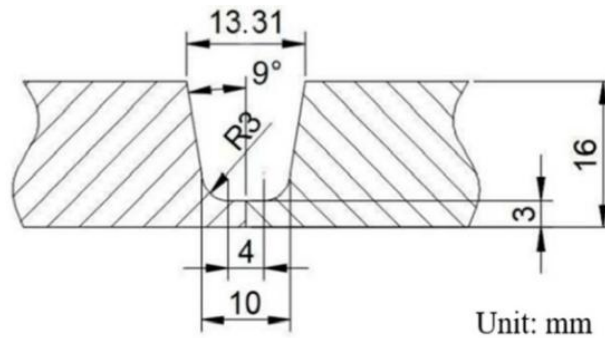


Рисунок 1 — Схема лазерно-гібридного зварного шва [6]

Мікроструктурний аналіз встановив формування дрібнозернистої α -структури в металі шва (WM) з поступовим переходом до зони термічного впливу (HAZ) та основного металу (BM). У WM спостерігається однорідна дрібнозерниста структура з підвищеною міцністю, тоді як у HAZ відбувається ріст зерна, що сприяє локальній концентрації залишкових напружень, а BM зберігає стабільну крупнозернисту морфологію.

Порівняльний аналіз показав, що лазерно-гібридне зварювання забезпечує зменшену ширину HAZ, більш рівномірний розподіл σ_{res} і вищу структурну однорідність порівняно з традиційним TIG-зварюванням, тоді як електронно-променеве зварювання (EBW) забезпечує повне проплавлення та мінімальну HAZ, але має обмежену технологічну гнучкість через вакуумні умови.

Для узагальнення результатів проведено порівняння структурних і технологічних характеристик лазерно-гібридного та електронно-променевого зварювання Ti-6Al-4V, що демонструє переваги LHW у стабільності процесу та контролі залишкових напружень при збереженні високої якості зварного з'єднання (табл 1) [6].

Таблиця 1 — Основні структурні характеристики зони WM / HAZ / BM

Зона	Морфологічна особливість	Орієнтовні параметри
WM (метал шва)	дрібнозерниста α -структура, можлива часткова β -фаза	Морфологія більш однорідна, менший градієнт структури
Перехідна зона	змінні розміри зерен, неоднорідна структура	Плавний перехід між WM і HAZ
HAZ	зерна зростають, термічний вплив	Збільшення зерен уздовж напрямку тепла
BM	крупнозерниста структура	Типова структура для необробленого металу

Аналіз таблиці показує, що у WM формується дрібнозерниста α -структура з частковою β -фазою, що забезпечує підвищену однорідність і міцність шва. У перехідній зоні спостерігається поступове збільшення зерен, що впливає на розподіл залишкових напружень. У HAZ відбувається ріст зерна, тоді як BM зберігає стабільну крупнозернисту структуру, що визначає загальні механічні властивості зварного з'єднання.

Загалом встановлено, що лазерно-гібридне зварювання є більш універсальним для складних транспортних конструкцій, тоді як EBW ефективне для високоточних з'єднань у контрольованих умовах.

Висновки. У результаті порівняльного аналізу експериментальних і числових даних встановлено, що формування зварних з'єднань Ti-6Al-4V визначається типом джерела тепла та його енергетичними параметрами. Електронно-променеве зварювання забезпечує глибоке проплавлення з вузькою зоною шва, тоді як лазерно-гібридне характеризується більш рівномірним тепловим розподілом і кращим контролем зони термічного впливу. Зміна потужності джерела безпосередньо впливає на геометрію шва, температурні градієнти та рівень залишкових напружень. Ультразвукова постобробка сприяє ефективній

релаксації залишкових напружень, особливо у поверхневих шарах зварного з'єднання. Мікроструктурний аналіз показав, що лазерно-гібридний процес формує більш дрібнозернисту та однорідну структуру порівняно з електронно-променевим зварюванням, що забезпечує кращий баланс міцності та пластичності.

Порівняльні результати показали, що лазерно-гібридний процес формує більш однорідну та дрібнозернисту структуру порівняно з електронно-променевим зварюванням, що забезпечує кращий баланс міцності та пластичності. Отримані закономірності між технологічними параметрами, мікроструктурою та залишковими напруженнями створюють основу для оптимізації зварювальних процесів у транспортному машинобудуванні. Зазначені результати узгоджуються з сучасними дослідженнями [7], де підтверджено, що залишкові напруження та мікроструктурна неоднорідність є ключовими факторами, які визначають механічну поведінку лазерно-зварених з'єднань Ti-6Al-4V у висококонцентрованих зварювальних процесах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Donachie M.J. Titanium: A Technical Guide. 2nd ed. Materials Park, OH: ASM International, 2000. 343 p.
2. Wang Y., Guo J., Zhang B., Ge K., Li L., Lv F. Effect of residual stress on the ultimate bearing capacity of titanium alloy pressure spherical–cylindrical-combined shells. *Metals*. 2024. Vol. 14, no. 1. P. 123. <https://doi.org/10.3390/met14010123>
3. Wu Q., Bo C., Sun K., Li L. Redistribution of residual stresses in titanium alloy butt-welded thick plates due to wire-cut electrical discharge machining. *Metals*. 2025. Vol. 15, no. 7. P. 750. <https://doi.org/10.3390/met15070750>
4. Li G., Wang Y., Liang Y., Gao P., Liu X., Xu W., Yang D. Microstructure and mechanical properties of laser welded Ti-6Al-4V (TC4) titanium alloy joints. *Optics and Laser Technology*. 2024. Vol. 170. P. 110320. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110320>
5. С. Кирилах Термомеханічна поведінка та мікроструктура лазерно-гібридних і електронно-променевих зварних швів титанових сплавів. *Journal of Rocket-Space Technology*. 2025. Том. 34. №. 4, С. 69-77. DOI: <https://doi.org/10.15421/452548>
6. Cheng Z., Lang Q., Zhang Z., Song G., Liu L. Study on microstructure and stress distribution of laser-GTA narrow gap welding joint of Ti-6Al-4V titanium alloy in medium plate. *Materials*. 2025. Vol. 18, no. 13. P. 2937. <https://doi.org/10.3390/ma18132937>
7. Sun W., Niu H., Xia Y., Miao K., Jiang X., Chen M., Patel M., Fan G. Combined effects of local residual stresses, internal pores, and microstructures on the mechanical properties of laser-welded Ti-6Al-4V sheets. *Journal of Materials Science & Technology*. 2025. Vol. 216. P. 178–191. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2024.05.087>

ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ ПАР ТЕРТЯ МОБІЛЬНИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ

Копильців Д. В., Мисів О. О., Криштопа С. І.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
(Україна)*

Вступ. Сучасні мобільні насосні агрегати достатньо досконалі за конструкцією і мають необхідні експлуатаційні якості. Незважаючи на значні вдосконалення сучасних насосних агрегатів технологічного транспорту, їхній ресурс в даний час залишається недостатньо високим.

Актуальність досліджень. Ресурс насосів високого тиску в експлуатаційних умовах у ряді випадків не досягає 2000 мотогодин, проти нормативного — 2500–5000 мотогодин [1]; згідно з дослідженнями ресурс насосів високого тиску (НВТ) становить 55...60 % від встановленого. Під час експлуатації НВТ мобільного агрегату ресурс насосу, переважно, характеризується технічним станом його плунжерних пар. В результаті зношування плунжерних пар збільшуються зазори і, отже, падає тиск насосу та знижується об'ємний ККД, що призводить до зниження продуктивності насосу та його відмови на кінцевому етапі [2].

Постановка задачі. В зв'язку з вищевикладеним на кафедрі автомобільного транспорту Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу було прийнято рішення про проведення досліджень з встановлення у лабораторних та промислових умовах зв'язку температури робочої оливи гідросистеми на інтенсивність зношування поверхонь НВТ мобільних насосних агрегатів.

Результати досліджень. Випробування проводились у лабораторних умовах на машині тертя моделі УМТ 2168. Як зразки, що використовувалися при проведенні лабораторних випробувань на машині тертя моделі УМТ 2168 (рис. 1), було обрано циліндричні ролики, виготовлені зі сталі 25Х5М, та колодки — зі сталі 20Х, так як з вищевказаних матеріалів виготовлені плунжерні пари НВТ GD-2500 мобільного агрегату для гідравлічного розриву пластів FC-2251 на шасі Kenworth T800. Твердість поверхні плунжерів зі сталі 25Х5М складає HRC 58-59, а твердість поверхні втулок зі сталі 20Х — HRC 61-62.

Ролики та колодки для проведення експериментів шліфувалися, шорсткість поверхні після обробки складала $Ra = 1,25$ мкм. Діаметр ролика, на якому проводилися виміри зношування, становив 50 мм. Ширина контактної поверхні, що дозволяла досягти навантажень у контакт, відповідних навантаженням у реальному поєднанні плунжерних пар насосу високого тиску 4Р-700 (питоме навантаження — $1,45 \cdot 10^6$ Н/м²), дорівнювала робочій частині колодки і становила $0,43 \cdot 10^3$ мм². Ширина ролика складала 12 мм. Це дозволило наблизити умови випробування зразків до умови роботи реальних плунжерних пар насосу високого тиску мобільного агрегату для гідравлічного розриву пластів FC-2251 на шасі Kenworth T800. Результати досліджень зношування пар тертя в залежності від температури оливи насосу високого тиску зображені на рис. 2.

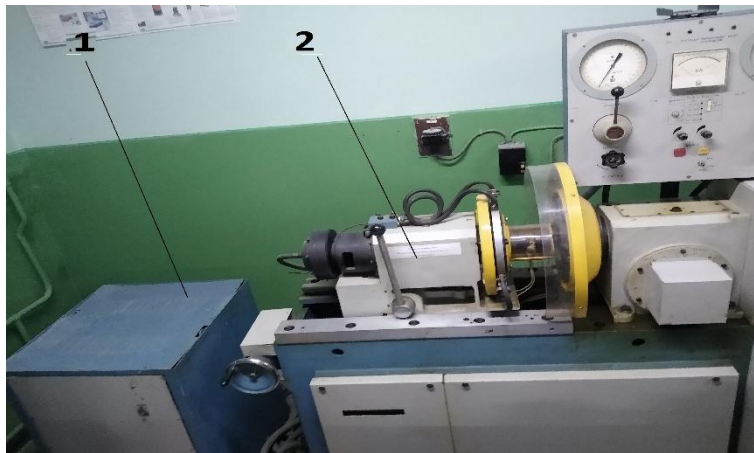


Рисунок 1 — Виконання експериментальних досліджень на машині тертя УМТ 2168:
1 — силовий пульт машини тертя; 2 — випробувальна установка

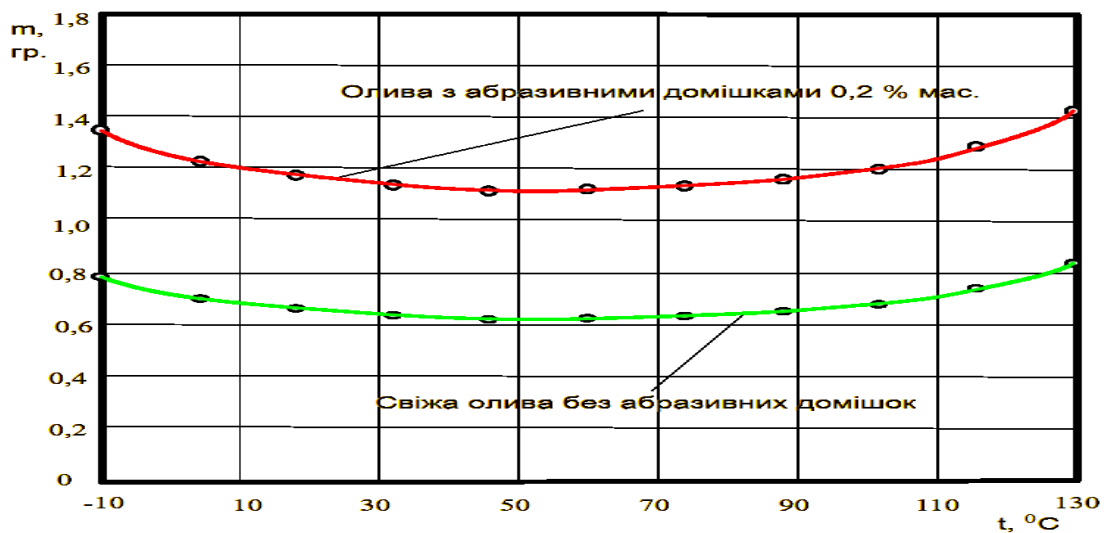


Рисунок 2 — Експериментальні залежності зношування пар тертя в залежності від температури оливи НВТ

Зниження величини зношування пар тертя при збільшенні температури оливи до 45...65 °C пояснюється кращим надходженням малов'язкої оливи в зону тертя, кращим видаленням продуктів зносу від поверхонь тертя та інтенсивнішим тепловідведенням. При підвищенні температури вище 65°C зношування зразків тертя починає зростати, що пов'язано з порушенням гідродинамічного режиму оливи, значним зниженням товщини і міцності, а також наступним руйнуванням оливного шару, що розділяє поверхні тертя.

Для визначення впливу терміну використання оливи на зношення пар тертя були проведені відповідні експерименти. Були відібрані проби зі зливої при ТО оливи з НВТ та з'ясовано, що вміст абразивних домішок коливався в межах 0,16...0,23 % мас. Тому для дослідження зношування пар тертя від температури при використанні старої оливи в змащувальне середовище також додавався абразивні домішки в кількості 0,2 % мас. Результати експериментів показали, що при суттєвому зростанні зношування пар тертя оптимальний температурний режим залишився той самий: 45...65 °C.

Висновки. З одержаних результатів зношування пар тертя можна зробити висновок, що для забезпечення максимального ресурсу НВТ його не можна прогрівати під навантаженням, а необхідно спочатку насос в статичному стані прогріти до 45...50 °C і вже після того його запускати. Висока робоча температура насосу є гіршим чинником, ніж низька, оскільки призводить до підвищеного спрацювання або руйнування пар тертя. Тому, при зростанні робочої температури насосу до 65 °C, необхідно обов'язково вживати заходів

для її автоматичного зниження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Saheban Alahadi, M. J., Shirneshan, A., & Kolahdoozan, M. (2017). Experimental investigation of the effect of grooves cut over the piston surface on the volumetric efficiency of a radial hydraulic piston pump. *International Journal of Fluid Power*, 18(3), 181–187.
2. Tang, H. S., Li, J., & Yin, Y. (2017). Power loss characteristics of slipper/swash plate pair in axial piston pump. *J. Cent. South Univ.(Sci. Technol.)*, 48, 361–370.

INVESTIGATION OF CORROSION OF CONDENSING HEAT-EXCHANGE SURFACES WHEN WATER-FUEL EMULSION COMBUSTION

Kornienko V., Kobalava H., Samokhvalov V.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding
Kherson Educational-Scientific Institute
(Ukraine)*

The performance of a power plant, including a ship power plant, depends not only on how efficiently its components work but also on the amount of heat lost through exhaust gases and cooling water. An exhaust gas boiler is a key heat recovery unit that significantly improves the efficiency of thermal power plants [1, 2]. The use of condensing heat-exchange surfaces increases both economic and environmental performance. When fuel oil is burned, low-temperature corrosion is high (up to 1.2 mm/year at wall temperatures above 130°C) for heat-exchange surfaces [3]. However, when a water-fuel emulsion with 30% water is used, corrosion decreases to about 0.25 mm/year due to a protective passive film [4]. This allows the use of condensing surfaces at lower temperatures (65–70 °C) and enables efficient recovery of heat from water vapor and sulfuric acid condensation [5].

The scientific and applied problem is the reduction of low-temperature corrosion on exhaust gas boiler heat-exchange surfaces during the combustion of water-fuel emulsions while maintaining high heat recovery efficiency.

The goal of the research is to improve the reliability, durability, and efficiency of condensing heat-exchange surfaces in marine exhaust gas boilers under water-fuel emulsion combustion, based on experimental investigation of low-temperature corrosion.

Investigating corrosion on an industrial scale is difficult because it requires strict control of operating conditions and fuel composition. Therefore, short but reliable experiments were carried out using a specialized setup.

The experimental setup allows us to analyze how flue gases interact with different materials at lower temperatures.

The experimental setup consists of the main elements: combustion chamber, burner, fuel preparation system, gas pipeline, working sections, samples for studying of pollution. Samples are used to observe and study the effects and mechanisms of condensation and corrosion under the conditions simulated within the setup. A working section of pipe samples for low-temperature corrosion research was installed at the flue gas temperature level of 350 °C. The pipe samples were simultaneously placed in the gas duct, which were then removed sequentially after the lapse of time intervals τ (2, 4, 8, 12 hours).

Before the experiments, the samples were weighed on an analytical scale. The sample mass is designated as m_1 . After the experiments pipe samples with corrosion products were weighed (mass m_2). Then, the sample was washed, dried and weighed again (mass m_3).

The metal mass loss ΔG was determined as

$$\Delta G = \frac{m_1 - m_3}{F}. \quad (1)$$

The corrosion rate K was determined as

$$K = \frac{\Delta G}{\tau}. \quad (2)$$

Approximation of the experimental results describing metal mass loss (corrosion depth) was performed using a power-law relationship, which is widely applied in corrosion studies in the form $\Delta G = A \cdot \tau^n$; where A and n are empirical constants defining the curvature of the kinetic dependence. The determination of these coefficients was carried out using standard numerical tools available in the Microsoft Office software suite, primarily Microsoft Excel.

The derived approximation functions made it possible to establish the time-dependent behavior of corrosion characteristics, including metal mass loss $\Delta G = f(\tau)$, instantaneous corrosion rate $K = f(\tau) = (\Delta G)'$, and corrosion acceleration $K' = f(\tau) = (\Delta G)''$.

Regression equations, corresponding coefficients of determination R^2 , and analytical expressions obtained from experimental data processing are presented in Fig. 1 for two characteristic combustion modes: WFE combustion with a water content of 30% ($S^r = 1.5\%$, $\alpha = 2.9$), corresponding to minimum corrosion intensity, and conventional fuel oil combustion ($S^r = 1.5\%$, $\alpha = 2.9$), at which the maximum corrosion level was recorded.

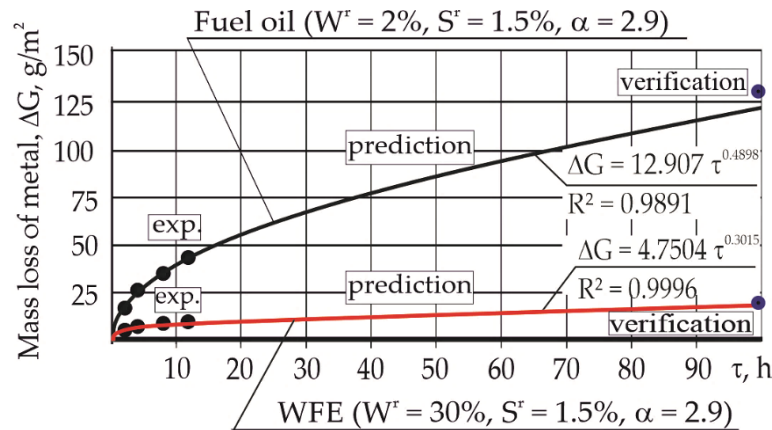


Figure 1 — Study of the kinetics of corrosion processes

The experimental results indicate that stabilization of the LTC process occurs after approximately 2–3 hours of exposure. This observation enables the extrapolation and prediction of metal mass loss ΔG for longer operational periods under identical conditions.

Experiments with exposure durations shorter than 2 hours were not conducted. Consequently, the corrosion behavior in the initial interval from 0 to 2 hours can only be hypothesized, as the process may follow a transient function. Nevertheless, this assumption is justified because experimental data obtained at exposure times of 2, 4, 8, and 12 hours for all 25 investigated operating modes and for the principal modes over extended durations are accurately described by the power-law dependence $\Delta G = A \cdot \tau^n$, passing through the point $\tau = 2$ h with high values of R^2 .

The role of the initial corrosion stage in determining final mass loss was evaluated using 8-hour experiments, which served as the basis for comparing the effects of WFE water content (W^r), fuel sulfur content (S^r), and excess air coefficient (α) on corrosion intensity. Using these data, relationships describing metal mass loss ΔG as functions of S^r , α , and W^r were derived.

To validate the predictive capability of the derived models, control experiments with a duration of 100 hours were conducted for both fuel oil combustion ($W^r = 2\%$, $S^r = 1.5\%$, $\alpha = 2.9$) and conventional WFE combustion ($W^r = 30\%$, $S^r = 1.5\%$, $\alpha = 2.9$).

Long-term prediction accuracy was further evaluated by calculating average corrosion rates over the 100-hour period.

For water–fuel emulsion combustion, the experimental rate was ~ 0.2 g/(m²·h), differing from calculations by only 6.6% at 110 °C. For fuel oil combustion, the rate was ~ 1.28 g/(m²·h), with less than 5% deviation from predicted values.

In real conditions, excess air and wall temperature increase corrosion. Fuel oil combustion shows a strong corrosion rise («acid peak»), especially at low excess air. In contrast, water–fuel emulsion (30% water) keeps corrosion much lower, with the peak nearly absent due to a protective layer.

The critical temperature range is 80–130 °C. At 105–110 °C, corrosion drops from 0.56 g/(m²·h) (fuel oil) to 0.06 g/(m²·h) with emulsion. Increasing water content further reduces corrosion (e.g., to ~ 0.1 mm/year at 30%), improving protection and extending equipment life.

The allowable corrosion rate can be defined for different wall temperatures, with a critical point at 115 °C, where corrosion reaches its maximum (“acid peak”). At other temperatures, corrosion is generally lower (except near 70°C). These results also define the required water content in water–fuel emulsion to maintain safe corrosion levels. For an allowable rate of 0.25 mm/year, about 17% water is needed, enabling safe operation at flue gas temperatures $\leq 110^{\circ}\text{C}$.

Conclusions. Analytical and experimental studies of fuel and water-fuel emulsion combustion, as well as corrosion processes on heating surfaces, were carried out to achieve the research goals.

The results show that low-temperature corrosion stabilizes within 1–2 hours under steady water-fuel emulsion combustion. This makes it possible to predict long-term corrosion behavior using short experiments (2–12 hours).

The analysis also shows that increasing the water content in water-fuel emulsion to about 30% significantly reduces corrosion due to surface passivation.

An optimal wall temperature range of 70–140 °C was identified, with low corrosion rates (0.15–0.25 mm/year).

Using water-fuel emulsion allows deeper cooling of exhaust gases, better heat recovery, and longer service life of heat-exchange surfaces.

REFERENCES

1. Tuński, T., Behrendt, C., Szczepanek, M. (2019). Mathematical modeling of the working conditions of the ship's utilization boiler in order to evaluate its performance. *Energies*, 12(16), en12163105. <https://doi.org/10.3390/en12163105>
2. Yang, Z., Kornienko, V., Radchenko, M., Radchenko, A., Radchenko, R., Pavlenko, A. (2021). Capture of pollutants from exhaust gases by low-temperature heating surfaces. *Energies*, 15, 120. <https://doi.org/10.3390/en15010120>
3. Kornienko, V., Radchenko, R., Bohdal, Ł., Kukielka, L., Legutko, S. (2021). Investigation of condensing heating surfaces with reduced corrosion of boilers with water-fuel emulsion combustion. *Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. 188, 300–309. https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_25
4. Melchers, R.E., Ahammed, M. (2021). Estimating the long-term reliability of steel and cast-iron pipelines subject to pitting corrosion. *Sustainability*, 13, 13235. <https://doi.org/10.3390/su132313235>
5. Kornienko, V., Radchenko, R., Radchenko, M., Radchenko, A., Pavlenko, A., Konovalov, D. (2022). Cooling cyclic air of marine engine with water-fuel emulsion combustion by exhaust heat recovery chiller. *Energies*, 15, 248. <https://doi.org/10.3390/en15010248>

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ККД НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Криштопа С. І., Криштопа Л. І., Сем'янчук А. І.

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
(Україна)*

Вступ. Температурний режим роботи насосів високого тиску насосних установок технологічного транспорту (УТТ) визначається в'язкістю — однією з найважливіших характеристик робочої рідини, що зумовлює внутрішнє тертя рідини. Зі збільшенням температури в'язкість оливи зменшується, зростають витоки через ущільнення та сполучення агрегатів.

Актуальність досліджень. Час підйому навісного механізму збільшується, швидкодія гідросистем знижується [1]. Значне підвищення температури може призвести до руйнування оливної плівки між поверхнями тертя, що призводить до істотного зростання енерговитрат і, навіть, до виходу з ладу насоса. Руйнування оливної плівки призводить до напівсухого тертя, що ще більше сприяє перегріву поверхонь, що труться. При зниженні температури в'язкість збільшується, проте збільшуються і опори потоку оливо в трубопроводах, погіршується заповнення всмоктувальної порожнини насоса. Має місце інтенсивне піноутворення, продуктивність насоса знижується, енерговитрати — збільшуються [2].

Постановка задачі. Отже, на роботу насосів високого тиску насосних УТТ впливає безліч несприятливих факторів, що призводять до зростання енерговитрат, тому визначення енергетичних витрат та об'ємного ККД насосів високого тиску мобільних УТТ є ефективним інструментом енергозаощадження. Тому на кафедрі автомобільного транспорту Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу були проведені дослідження з встановлення у промислових умовах впливу температури робочої оливи гідросистеми насосів високого тиску насосних УТТ на об'ємний ККД насосів високого тиску.

Результати досліджень. Промислові дослідження проводились на експериментальній установці, що була створена на базі мобільного агрегату для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB на шасі Мерседес 4150 (рис. 1) транспортного цеху Управління транспорту ПАТ «Укрнафта» в м. Надвірна. Агрегат Halliburton Tier IV DGB на шасі Мерседес або Кенворт широко використовується в НГВУ «Надвірнанафтогаз», «Долинанфтогаз» та інших НГВУ для гідророзриву пластів.

Експериментальні значення об'ємного ККД насосів високого тиску НТ-400 насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB та насосів високого тиску 4P-700 насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів УН1-630×700 в залежності від температури робочої оливи насосів та порівняння їх із розрахунковими значеннями наведено на рис. 2.

Аналіз отриманих результатів теоретичних досліджень шляхом порівняння з даними експериментальних досліджень показав наступне. Згідно даних заводів-виготовників об'ємний ККД нового справного насоса високого тиску НТ-400 насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB складає 0,96; об'ємний ККД нового справного насоса високого тиску за даними математичної моделі складає 0,94.



Рисунок 1 — Проведення випробовувань на базі мобільного агрегату для гідророзриву пластів мод. Halliburton Tier IV DGB на шасі Мерседес 4150 (8x8)

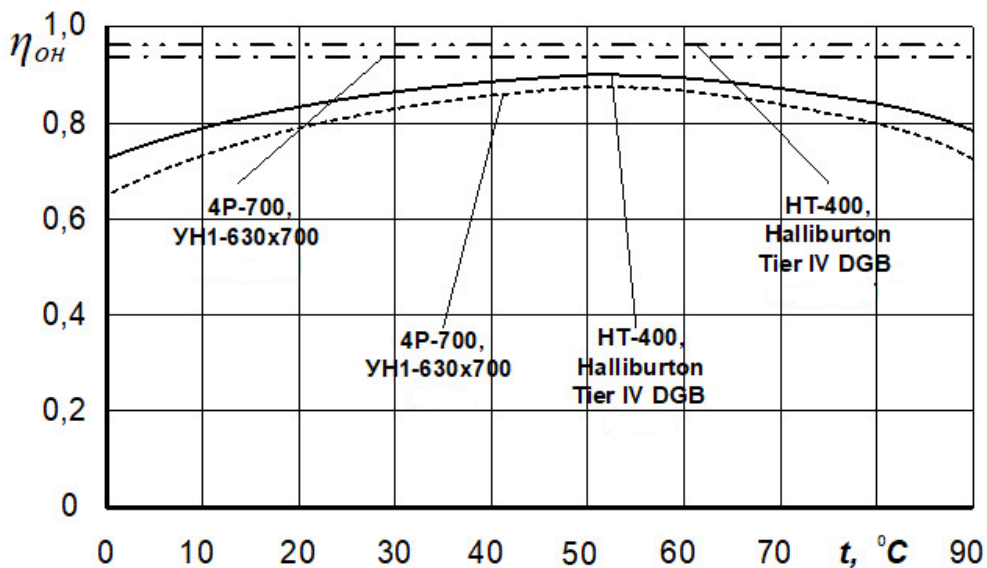


Рисунок 2 — Експериментальні значення та розрахункові значення об'ємного ККД насосів високого тиску в залежності від температури робочої оливи насосів:
 — .. — заводські значення об'ємного ККД насосів високого тиску HT-400 насосних агрегатів для гідророзриву пластів Halliburton Tier IV DGB;
 — . — заводські значення об'ємного ККД насосів високого тиску 4P-700 насосних агрегатів для гідророзриву пластів YH1-630×700;
 — — експериментальні значення об'ємного ККД насосів високого тиску HT-400 насосних агрегатів Halliburton Tier IV DGB;
 — — експериментальні значення об'ємного ККД насосів високого тиску 4P-700 насосних агрегатів YH1-630×700

Згідно одержаних експериментальних досліджень максимальний об'ємний ККД справного насосу високого тиску HT-400 насосних агрегатів для гідравлічного розриву пластів Halliburton Tier IV DGB досягався за температури 53 °C і дорівнює 0,89; максимальний об'ємний ККД справного насосу високого тиску за даними математичної моделі досягався за температури 55 °C і дорівнює 0,87.

Висновки. Ґрунтуючись на одержаних експериментальних результатах, можна з упевненістю підтвердити життєздатність теоретичної моделі енергетичних витрат насосу

високого тиску мобільних УТТ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Xiaoning Wang (2013). Large-eddy Simulation of Sand Streamers in Wind-blown Sand, *Procedia Engineering*, Volume 61, Pages 108–110.
2. Piasecki, T., Bejger, A., & Kozak, M. (2016). The assessment of the operational suitability of mud pumps on deep water drillships depends on maintenance strategy. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 46 (118), 49–53.

WEB-BASED IOT DATA VISUALISATION FOR ENERGY EFFICIENCY MONITORING IN TRANSPORT SYSTEMS

Liutak I.

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
(Ukraine)*

Introduction. The rapid development of Internet of Things technologies has created new opportunities for collecting, processing and visualising data from distributed technical systems. In the transport sector, IoT devices and sensor networks are increasingly used to monitor energy consumption, operational conditions, environmental parameters and the technical state of infrastructure components. Such data can support more informed decisions aimed at improving energy efficiency, reducing resource losses and increasing the reliability of transport systems. Energy efficiency is one of the key challenges for modern transport infrastructure, especially in the context of sustainable energy engineering, environmental safety and resource-saving technologies. Transport systems consume significant amounts of energy during operation, maintenance and supporting infrastructure processes. The ability to monitor energy-related indicators in real time is important for detecting inefficient consumption patterns, identifying abnormal behaviour and supporting timely corrective actions. Web-based interfaces play an important role in making IoT data accessible and understandable for engineers, operators and decision-makers. Unlike raw sensor data, visual dashboards, interactive charts and analytical panels allow users to interpret complex information more effectively. A properly designed web interface can present energy consumption trends, compare indicators over time, highlight deviations and support the evaluation of transport system performance. The topic of this study is focused on the development and use of web-based IoT data visualisation for energy efficiency monitoring in transport systems. The research is related to the educational and scientific direction of Informational Technologies for Sustainable Energy Engineering, as it combines web technologies, IoT data processing and sustainable energy management. The approach can be applied to transport infrastructure objects where continuous monitoring of energy consumption and operational parameters is required.

Relevance of the Research. The relevance of this research is determined by the growing need for intelligent monitoring tools that can support energy-efficient and environmentally responsible operation of transport systems. Modern transport infrastructure is becoming increasingly dependent on distributed sensors, connected vehicles, smart metering devices and real-time data processing platforms. As a result, large volumes of IoT data are generated continuously, but their practical value depends on how effectively these data are processed, visualised and presented to engineers, operators and decision-makers. Recent studies confirm that IoT technologies are already being actively applied to transport-related energy monitoring and infrastructure assessment. Skar et al. proposed an IoT platform for road energy efficiency monitoring based on in-vehicle sensor measurements. The collected data were transmitted, processed, normalised and stored in a database in order to evaluate the influence of road conditions on vehicle energy consumption. The authors demonstrated that normalised energy consumption is correlated with road roughness, which makes this approach promising for large-scale monitoring of road infrastructure energy efficiency [1]. However, this study mainly focuses on data collection and analytical modelling, while the issue of designing user-oriented web interfaces for visual interpretation of the collected IoT data remains less developed. The importance of IoT in sustainable railway transportation is also highlighted by Singh et al., who presented a comprehensive survey of IoT technologies for railway operations, management, maintenance, video surveillance and safety. The paper discusses current trends, green IoT applications and challenges related to the practical implementation of IoT in railway systems [2]. This work is valuable because it demonstrates the broad applicability of IoT in transport infrastructure. At the same time, it is mainly a survey and does not provide a concrete implementation of a web-based dashboard for energy efficiency monitoring. A more recent review by Sarp et al. considers

digitalisation of railway transportation through IoT, artificial intelligence and digital twin technologies. The authors analyse how these technologies can improve railway operation, maintenance, sustainability and passenger comfort [3]. This paper is important for understanding the broader digital transformation of transport systems. Nevertheless, its focus is on conceptual and architectural aspects of digital railway systems, while practical web-based visualisation of IoT energy indicators can be further investigated as a separate applied task. The connection between IoT energy monitoring and web-based visualisation is shown in the work of Munoz et al., where a three-phase IoT smart energy meter with power quality features was designed and validated. The system sends data to the cloud, and the authors also developed a web application for displaying smart meter measurements [4]. This study confirms the practical need for web interfaces in energy monitoring systems. However, its application domain is smart grid and end-user energy monitoring rather than transport infrastructure, which leaves space for adapting similar web-based visualisation principles to transport systems.

Statement of the Problem. The analysis of recent research shows that IoT-based energy monitoring, sustainable transport digitalisation and web-based energy data visualisation are actively developing research directions. However, these areas are often studied separately. Existing works usually focus either on transport infrastructure monitoring, railway IoT applications, digital twin concepts or smart metering solutions. At the same time, the problem of developing user-oriented web interfaces for visualising IoT data specifically in the context of energy efficiency monitoring in transport systems remains insufficiently addressed. Therefore, the main task of this research is to define an approach to the development of a web-based interface for IoT data visualisation that can support energy efficiency monitoring in transport systems. Such an interface should provide clear presentation of sensor data, energy consumption trends, deviations, abnormal patterns and comparative indicators. The proposed approach should help transform raw IoT measurements into understandable analytical information for engineers, operators and decision-makers. The research task includes the identification of key functional requirements for a web-based IoT visualisation system, the definition of relevant energy efficiency indicators for transport infrastructure, and the description of visual components that can support monitoring and analysis. Special attention is given to the role of dashboards, charts and real-time data representation in supporting resource-saving decisions and improving the transparency of transport energy management. The problem addressed in this study is the development of a conceptual approach to a web-based IoT data visualisation system for monitoring the energy efficiency of an urban electric taxi fleet. The system should provide engineers, fleet managers and operators with visual information about vehicle energy consumption, battery state, charging behaviour, mileage, abnormal energy use and overall operational efficiency.

Results of the Research. Concept of the Urban Electric Taxi Monitoring System. As a practical example of the proposed approach, an urban electric taxi fleet is considered. Such a transport system operates continuously in dynamic city conditions and requires constant monitoring of vehicle availability, battery state, energy consumption and charging behaviour. Each electric taxi can be treated as a mobile IoT object that generates operational and energy-related data during its daily use. The general concept of the monitoring system is based on the collection of IoT data from electric taxi vehicles, transmission of these data to a server or cloud platform, and their further visualisation through a web-based dashboard. The dashboard is intended for fleet managers, dispatchers and technical personnel who need to monitor the energy efficiency and operational state of vehicles in real time. Data for the system can be collected from several sources. On-board vehicle sensors can provide information about speed, mileage, operating mode and technical condition of the vehicle. The battery management system can provide data about the battery state of charge, energy consumption, charging cycles and battery temperature. The GPS module can be used to determine the current location of each vehicle, analyse movement patterns and relate energy consumption to specific urban routes. The collected data are transmitted to the backend part of the system, where they can be stored, processed and prepared for visualisation. The web interface then presents this information in the form of dashboards, charts, status cards,

maps and warning messages. This allows users to observe the current state of the electric taxi fleet, compare vehicles by energy efficiency, detect abnormal energy consumption and support decisions related to charging, maintenance and route planning. In this way, the proposed concept transforms raw IoT measurements into clear visual information that can be used for energy efficiency monitoring. For an urban electric taxi fleet, such a system can help reduce inefficient energy use, improve charging planning, increase vehicle availability and support more sustainable operation of city transport services. For effective monitoring of an urban electric taxi fleet, the web-based interface should present not only raw IoT data, but also calculated energy efficiency indicators. These indicators help fleet managers and operators evaluate how efficiently each vehicle uses energy, how often charging is required, and whether there are abnormal patterns in vehicle operation. The proposed set of indicators is shown in Table 1.

Table 1 — Key Energy Efficiency Indicators for Web-Based Visualisation

Indicator	Description	Purpose in the web interface
Battery state of charge	Current battery level of each electric taxi	Helps monitor vehicle availability and plan charging
Energy consumption per kilometre	Amount of energy used for one kilometre of travel	Allows comparison of energy efficiency between vehicles
Daily energy consumption	Total amount of energy consumed by a vehicle or fleet during a day	Supports analysis of daily energy demand
Charging duration	Time required to charge the vehicle battery	Helps evaluate charging efficiency and infrastructure usage
Charging frequency	Number of charging sessions during a selected period	Shows how often vehicles require recharging
Idle time	Time during which the vehicle is not operating or charging	Helps identify inefficient use of fleet resources
Operational availability	Percentage or number of vehicles ready for service	Supports fleet management and service planning
Abnormal energy consumption	Energy use that significantly differs from expected values	Helps detect possible technical problems or inefficient operation

Proposed Web Dashboard Structure. The proposed web dashboard should provide a clear and structured representation of IoT data collected from an urban electric taxi fleet. Its main purpose is to help fleet managers, dispatchers and technical personnel monitor the energy efficiency, operational state and charging behaviour of electric vehicles in real time. The dashboard should combine general fleet-level information with detailed data for each individual vehicle. The structure of the web dashboard can include several main components, as shown in Table 2.

Table 2 — The structure of the web dashboard

Web dashboard component	Main function	Expected benefit
Fleet overview panel	Displays the total number of vehicles, including active, charging, idle and unavailable taxis	Provides a quick understanding of the current fleet state
Vehicle status cards	Show battery level, current location, operating mode and basic technical status of each electric taxi	Supports fast monitoring of individual vehicles
Energy consumption chart	Visualises real-time and historical energy consumption of vehicles	Helps analyse energy use patterns over time
Battery	Displays the battery state of charge and	Supports charging planning

Web dashboard component	Main function	Expected benefit
monitoring block	battery-related parameters	and vehicle availability control
Charging analytics panel	Shows charging duration, charging frequency and charging station usage	Helps evaluate the efficiency of charging infrastructure
Map view	Displays vehicle locations and charging points in the city	Supports route analysis and fleet distribution monitoring
Alerts panel	Shows warnings about low battery level, abnormal energy consumption or technical issues	Supports timely response to operational problems
Comparative analytics block	Compares vehicles by energy consumption per kilometre, idle time and operational availability	Helps identify inefficient vehicles or usage patterns

The fleet overview panel should be placed at the top of the dashboard because it gives users an immediate understanding of the current state of the electric taxi fleet. It can show how many vehicles are available for service, how many are currently operating, how many are charging and how many are temporarily unavailable. This information is important for operational decision-making, especially during periods of high demand. Vehicle status cards can be used to present key information about each electric taxi in a compact form. Each card may include the vehicle identifier, battery state of charge, current operating mode, location and warning status. Such a component allows users to quickly detect vehicles with low battery levels, long idle time or abnormal energy consumption. Energy consumption charts are one of the central elements of the proposed dashboard. They can show changes in energy use during a working day, compare consumption between different vehicles and display historical trends. These charts help users understand whether energy consumption is stable, increasing or affected by specific operational conditions.

Conclusions. The study shows that web-based IoT data visualisation can be an effective tool for energy efficiency monitoring in transport systems, particularly in the case of an urban electric taxi fleet. The proposed approach combines data collection from vehicle sensors, battery management systems and GPS modules with visual representation through dashboards, charts, maps, status cards and alerts. The defined energy efficiency indicators and proposed dashboard structure demonstrate how raw IoT measurements can be transformed into practical information for decision-making. Therefore, web interfaces for IoT data visualisation can support better charging planning, reduce inefficient energy use, improve operational transparency and contribute to the development of more sustainable and resource-efficient urban transport systems.

REFERENCES

1. Skar A., Vestergaard A., Pour S. M., Pettinari M. Internet-of-Things (IoT) Platform for Road Energy Efficiency Monitoring. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 5. Article 2756. DOI: 10.3390/s23052756.
2. Singh P., Elmi Z., Meriga V. K., Pasha J., Dulebenets M. A. Internet of Things for sustainable railway transportation: Past, present, and future. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2022. Vol. 4. Article 100065. DOI: 10.1016/j.clscn.2022.100065.
3. Sarp S., Kuzlu M., Jovanovic V., Polat Z., Guler O. Digitalization of railway transportation through AI-powered services: digital twin trains. *European Transport Research Review*. 2024. Vol. 16. Article 58. DOI: 10.1186/s12544-024-00679-5.
4. Munoz O., Ruelas A., Rosales-Escobedo P. F., Acuña A., Suastegui A., Lara F., Reyes-Zamora R. A., Rocha A. Development of an IoT smart energy meter with power quality features for a smart grid architecture. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*. 2024. Vol. 43. Article 100990. DOI: 10.1016/j.suscom.2024.100990.

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ І ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА ТРАНСПОРТНОМУ ФЛОТІ

¹Настасенко В.О., ¹Бабій М.В., ²Проценко В.О., ³Агоєв Є. О.

¹ Херсонська державна морська академія
(Україна)

²Херсонський національний технічний університет
(Україна)

³ Одеський національний морський університет
(Україна)

Вступ. Морський транспорт відіграє важливу роль у вирішенні проблем декарбонізації та глобальної кліматичної кризи, оскільки на нього припадає перевезення майже 90% світових вантажів. Залежність суден від викопного палива зробила значний внесок у забруднення атмосфери газами CO, CO₂ парникової групи та продуктами згоряння побічних домішок (SO₂ – SO₃, NO₂ – NO₃ та іншими).

Міжнародна морська організація (ІМО) у Додатку VI до Конвенції MARPOL 73/78 [1] запровадила строгі заходи обмеження таких викидів, зокрема Індекс енергоефективності проектування (EEDI) [2] та Індикатор вуглецевої інтенсивності (CII), для забезпечення скорочення викидів парникових газів [3].

У рамках цієї нормативної бази перехід до альтернативних джерел енергії є важливою вимогою. Іншим фактором для переходу є зростання світових цін на нафту та природний газ, як основних сучасних джерел суднового палива.

Пошук альтернативних видів палива, таких як аміак, метанол і водень, триває, проте кожен з них має суттєві технічні та економічні недоліки, в першу чергу — у 2–4 рази нижчу теплотворність, що змушує адекватно збільшувати запаси цих палив, зменшуючи обсяги транспортних перевезень та остійність суден, за рахунок розміщення додаткових цистерн на палубі.

У цих умовах додаткові енергетичні системи, особливо з сонячної та вітрової енергії, стали життєво важливими компонентами стратегії декарбонізації та економії палива.

Дослідження технічних можливостей та параметрів ефективного використання сонячних систем для транспортного флоту є головною метою та науковою новизною виконуваної роботи.

Нові результати та їх обговорення. Згідно з сучасними дослідженнями, сонячна енергія на торгових судах в даний час забезпечує заміну від 1% до 5% витрат енергії головного двигуна та електрогенераторів за рахунок прямого вироблення електроенергії. Повна заміна – неможлива, за рахунок нікого ККД сонячних систем, що потребує великих площ, яких не мають судна. Наприклад, для повної заміни ДВЗ потужністю 8,5 МВт необхідна площа $110 \times 450 = 49500 \text{ м}^2$, що еквівалентно площі 6 футбольних полів $65 \times 110 \text{ м}^2$. Навіть у разі виконання такої естакади над судном, неможлива їхня робота в портах і у вузлах плавання, а перший шторм або сильний вітер її зруйнує, наражаючи на ризик саме судно. Таким чином, сонячна енергетика на транспортному флоті обмежена розмірами суден і може бути лише додатковим чинником.

Однак для суден малого флоту (прогулянкових яхт та катерів, включаючи міський судновий транспорт) вона може бути основним джерелом енергії. Першим прикладом повної заміни традиційних двигунів є яхта «Planet Solar Turanor» (Німеччина) 2005 побудови, яка в 2006–2007 роках здійснила кругосвітню подорож (рис. 1) [4]. При площі сонячних панелей 500 м² (середні секції розсувні), пікова потужність, яка виробляється, була всього 225 кВт/год, що забезпечувало яхті з 2 двигунами по 85 кВт швидкість близько 7,5 вузлів (середня швидкість доставки вантажів на транспортному флоті — близько 14 вузлів).

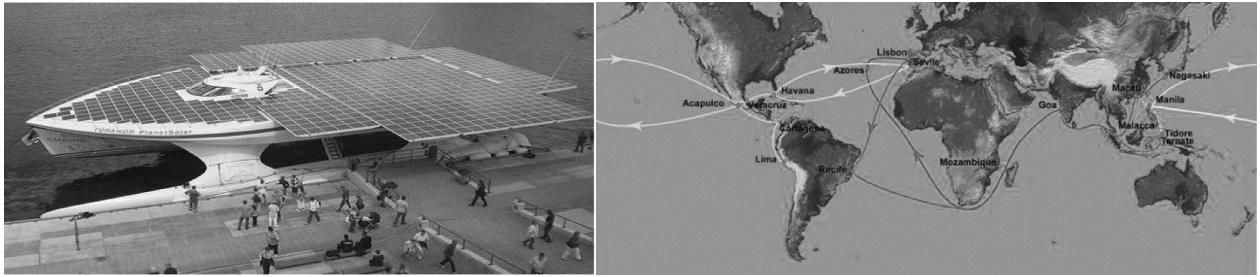


Рисунок 1 — Катамаран «Solar Turanor Planet» і його шлях під час випробувань у навколосвітній подорожі у 2006–2007 роках

Занадто велика ціна яхти (близько €12 млн) зробила проект неперспективним для комерційної реалізації, тому Swiss company «Solarwave» та Turkish shipbuilding company «Nedship» в 2014 році побудували 62-foot яхту «Solarwave 62» зменшуючи вартість до €2 млн за рахунок її розмірів. Але потужність системи впала до 15 кВт/год і швидкість знизилася до 7 вузлів, яка під час роботи побутових пристроїв для пасажирів (приготування їжі, роботи холодильників, кондиціонерів та систем розваги), повністю витрачалася [5]. Але така система отримала розвиток у комбінованому варіанті з вітрилами [6], що підвищує швидкість до 14 уз. та створює резерв для роботи побутових систем (Рис. 2).



Рисунок 2 — Яхта-катамаран Solarwave 62 і комбінована яхта ZEN (Zero Emission Nautic Ltd, Incorporated in Malta), з сонячними панелями і вітрилами, розробник NASA

Можливості підвищення вироблення електроенергії забезпечують розкладні [7] та висувні [8] сонячні панелі, показані на рис. 3.

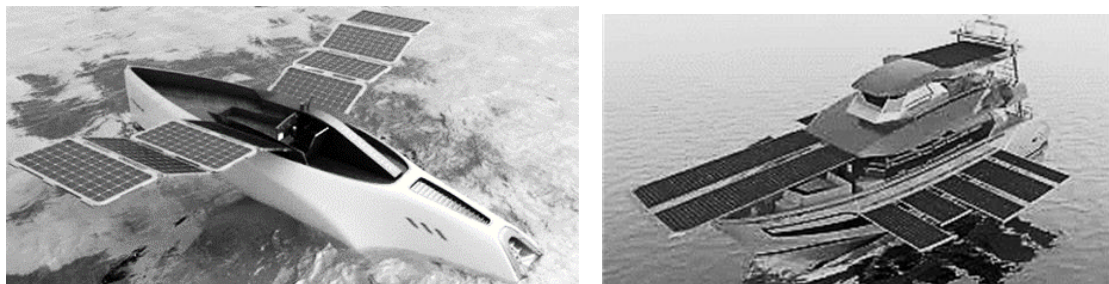


Рисунок 3 — Яхти з розкладними та висувними сонячними панелями

Окрім крейсерських яхт для мільйонерів, будуються яхти для денних прибережних прогулянок туристів і для громадського транспорту міст, де є річки, (Рис. 4) [9, 10].



Рисунок 4 — Проекти сонячного і комбінованого суден для туристів і міського транспорту

Оскільки ці судна не мають великих потреб з низки побутових систем, а швидкість 7–14 вузлів достатня при скороченні річкою відстані між пунктами прибуття та економії часу при можливих автомобільних пробках у «часи пік», це робить їх перспективними. На стоянках вони можуть заряджати свої буферні акумулятори.

У судновому виконанні використовується установка сонячних панелей на жорстких підйомних [11] та поворотних [12] щоглах, з розміщенням їх з обох боків вітрила (Рис. 5).

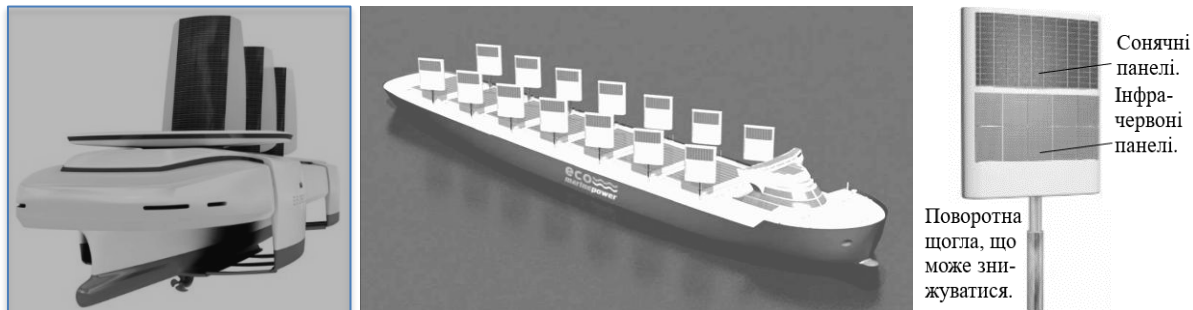


Рисунок 5 — Проект судна «E/S Orcelle-2025» (Швеція) з підйомними вітрилами і сонячними панелями на них та проект «Eco Marine Power Wind-Solar Ship-2025» (Японія) з поворотними вітрилами і сонячними панелями на них та на кришках люків

Другий варіант кращий, оскільки дозволяє враховувати положення щогл судна щодо Сонця, оптимізуючи цей ефект з дією вітру.

Максимальні можливості для використання сонячної енергії забезпечують проекти компанії NYK: контейнеровозу на 8,6 тисячі DFE «Super Eco Ship 2030» та автомобілевозу на 9 тисячі автомобілів «Super Eco Ship 2050» (Японія) [13, 14], (Рис. 5), а пором «AURIGA LEADER» з покриттям панелями 1/3 верхньої палуби, вже експлуатується [15] (Рис. 6).

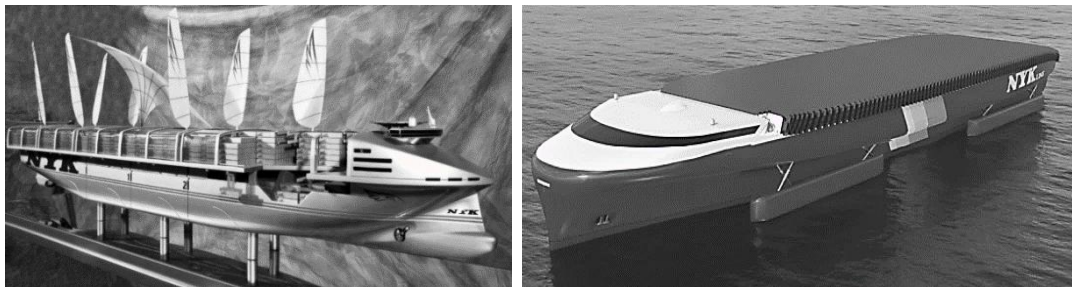


Рисунок 6 — Проекти суден компанії NYK із сонячними панелями на кришках закриття контейнерів та на верхній палубі надбудови порома-автомобільовоза



Рисунок 7 — Пором «AURIGA LEADER» (2008) NYK (Японія) із сонячними панелями

Такі великі площі сонячних панелей дозволяють виробляти від 10 до 15 % необхідної енергії судна, що є максимальною їх межею. Однак для зйомних кришок закриття із сонячними панелями контейнеровозу, як правило, немає місця на пірсі, тому запропоновано встановлювати їх одна на одну на судні при завантаженні та розвантаженні контейнерів, що підвищує ймовірність їх пошкодження, а розміщення панелей загальною вагою близько 300

тон на верхній палубі порома істотно впливає на його остійність.

Перспективними за площами для встановлення сонячних панелей є газовози коробчатого типу та пасажирські судна з вільною верхньою палубою (рис. 8).

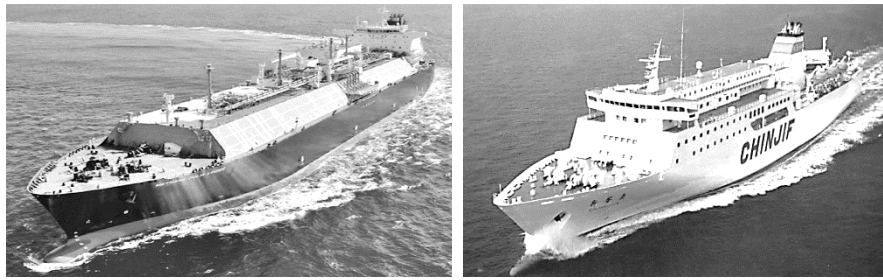


Рисунок 8 — Перспективні судна для встановлення на них сонячних панелей

Більш доцільною для остійності судна є встановлення сонячних панелей на палубі (рис. 9) [16].

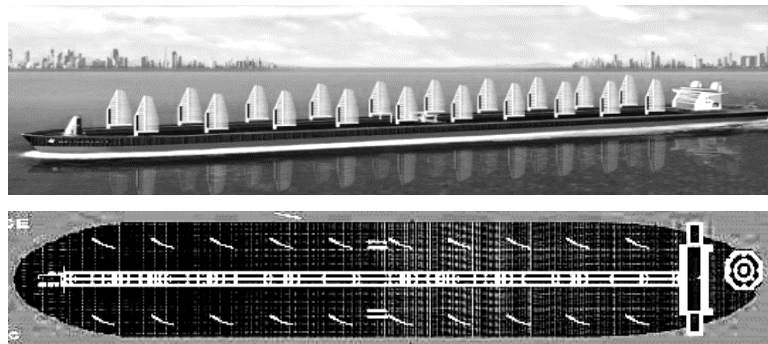


Рисунок 9 — Проєкт танкера DynaWing Solar Hybrid із сонячними панелями на палубі

Однак для танкерів та газовозів (як і для поромів) існує ризик займання панелей внаслідок їх перегріву або короткого замикання. Тому необхідний їх поділ на секції і встановлення автоматичних систем охолодження та пінного пожежогасіння.

Більш повний аналіз суднових сонячних систем виконано авторами в [17, 18]. У них показано, що за рахунок низького ККД сучасних сонячних панелей на базі кремнію ($\approx 18\%$), географічних (широта плавання), природних (день, ніч) і кліматичних умов (похмурі та дощові дні), реальне вироблення корисної енергії становить лише 1–10% від енергії ДВЗ та електрогенераторів (останній показник для суден з великою площею сонячних панелей). Однак вони більші тих, які можна очікувати від традиційних ДВЗ та електрогенераторів, які практично досягли своєї технічної межі вдосконалення, тому реально підвищити їх ефективність більш ніж на 1%, практично неможливо. Таким чином, сонячна енергетика є перспективною і треба лише визначити та ефективно застосовувати її можливості.

Висновки.

1. Сонячна енергетика є безкоштовним і безмежним джерелом енергії, яке дозволяє економити паливо і зменшувати шкідливі викиди, тому не використання її порівнюється з марнотрацтвом природних ресурсів.

2. В умовах росту цін на вуглеводневе паливо та на закупівлю карбонових квот, значення сонячної енергетики постійно зростає, що робить її все більш перспективною для використання.

3. Стримуючим фактором є відносно велика ціна на сонячні системи, що зводить строки їх окупності до 5–8 років, але цей фактор можна вважати солідарним внеском судновласників у вирішення загальної проблеми для людства — зменшення шкідливих викидів.

4. Перспективні сонячні елементи на базі перовськіту дозволяють підвищити ККД в 1,5–2 рази, що адекватно зменшить строк окупності сонячних систем.

5. Зважаючи на вищевказане, сонячні фотоелектричні системи рекомендуються для широкого впровадження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Annex VI of the MARPOL 73/78: [https://homeport.uscg.mil/Lists/Content/Attachments/891/Brief%20on%20MARPOL%20Annex%20VI%20\(revised\).pdf](https://homeport.uscg.mil/Lists/Content/Attachments/891/Brief%20on%20MARPOL%20Annex%20VI%20(revised).pdf)
2. Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) MEPC.245(66) — 2014 [https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.245\(66\).pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.245(66).pdf)
3. International Maritime Organization. (2022). Resolution MEPC.352(78): 2022 Guidelines on operational carbon intensity indicators and the calculation methods (CII guidelines, G1). [imo.org](https://www.imo.org)
4. Catamaran «Planet Solar Turanor» https://www.youtube.com/watch?v=7ZlhNDqARFw&ab_channel=MercatorInfogr
5. Solar-wave 62: <https://ru.pinterest.com/pin/740631101239174247/>
6. ZEN Yach: <https://itboat.com/ru/models/16453-50#model-21>
7. Folding solar panels: <https://en.sunware.solar/produkte/solarmodule>
8. Wedgeline hybrid 77 та висувні сонячні батареї <https://interparus.com/ua/wedgeline-hybrid-77-preview/>
9. Eco Marine Power Wind-Solar Ship: <http://www.ecomarinepower.com/en/energysail>
10. Морські судна с сонячними вітрилами Solar Sailor <https://www.electra.com.ua/neobychnyj-elektrotransport/464-morskie-suda-s-solnechnymi-parusami-solar-sailor.html>
11. E/S Orcelle project 2025: <https://www.yumpu.com/en/document/view/34127949/e-s-orcelle-a-concept-martins-marine-engineering-page>
12. Eco Marine Power Wind-Solar Ship: <https://www.ecomarinepower.com/en/products/8-products-services-and-consulting/15-wind-and-solar-marine-power>
13. NYK Super Eco Ship 2030 (Japan) (2010). <https://www.no.emb-japan.go.jp/Japanese/KouhoBunka/NTNUHoriuchi.pdf>
14. NYK Super Eco Ship 2050: https://www.nyk.com/english/esg/pdf/ecoship2050_en.pdf
15. AURIGA LEADER: <https://shipshub.com/ru/article/1745-2.html>
16. Post Panamax tanker: <https://www.charterworld.com/news/emax-deliverance-motor-yacht-sauter-carbon-offset-design-dynawing-solar-hybrid-supertanker/emax-deliverance-vlcc-dynawing-post-panamax-supertanker>
17. Valentyn Nastasenکو. (2022). Solar Electrical Energy Systems, Analysis of the Prospects and Possibilities of their Use in the Transportation Fleet. / Peer Review Journal of Solar & Photoenergy Systems 2(2). PRSP. 000533. 2022 <https://crimsonpublishers.com/prsp/pdf/PRSP.000533.pdf>
18. Nastasenکو V., Protsenko V., Babii M. (2025) Analysis of the Prospects and Possibilities of Using Solar Electrical Energy Systems on the Transport Fleet. Journal of Maritime Research. Vol XXII. No. III pp 142-152. <https://www.jmr.unican.es/jmr/article/view/1138/1081> (Scopus)

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИЛОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ

Нерубацький В. П.

*Український державний університет залізничного транспорту
(Україна)*

Вступ. Сучасний розвиток залізничного транспорту супроводжується посиленням вимог щодо раціонального використання енергоресурсів та підвищення експлуатаційної надійності тягового рухомого складу. Одним із ключових чинників, що визначають ефективність використання електричної енергії в локомотивах, є режими роботи силових перетворювачів, які забезпечують живлення та керування тяговими електродвигунами. Силкові напівпровідникові перетворювачі формують параметри напруги і струму, безпосередньо впливаючи на енергетичні втрати, перебіг теплових явищ та функціональні характеристики обладнання [1]. Вивчення закономірностей цього впливу створює передумови для підвищення ефективності функціонування локомотивів у реальних умовах експлуатації.

Актуальність досліджень. Підвищення вартості енергоресурсів та потреба у скороченні експлуатаційних затрат зумовлюють необхідність удосконалення енергетичних характеристик транспортних систем. Для залізничного транспорту це питання набуває особливої ваги, оскільки значна частина витрат пов'язана зі споживанням електроенергії тяговими приводами [2, 3]. Сучасні силові перетворювачі забезпечують широкі можливості регулювання електричних параметрів живлення, проте вибір конкретних режимів їх функціонування істотно впливає на рівень електричних втрат, теплове навантаження та довговічність обладнання [4, 5]. Неефективно обрані режими роботи призводять до зростання енергоспоживання та інтенсифікації процесів деградації елементів системи. За таких умов визначального значення набуває узгодження параметрів роботи перетворювачів із режимами функціонування тягових двигунів [6]. Такий підхід дає змогу не лише знизити втрати енергії, але й підвищити надійність і ефективність тягового рухомого складу.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є комплексна оцінка впливу режимів функціонування силових перетворювачів на енергоефективність тягових двигунів локомотивів. Завданням є дослідження основних режимів функціонування силових перетворювачів, оцінка їх впливу на електричні та теплові втрати і тягових двигунів, визначення залежності коефіцієнта корисної дії від параметрів керування, а також обґрунтування шляхів удосконалення режимів їх роботи з метою підвищення енергоефективності локомотивів.

Результати досліджень. Формування напруги та струму тягового приводу за допомогою силових перетворювачів супроводжується появою неідеальностей, пов'язаних із дискретним характером процесів комутації. У спектрі струму виникають гармонічні складові, які зумовлюють додаткові втрати в обмотках електродвигуна та магнітопроводі, а також впливають на електромагнітну сумісність обладнання. Ступінь прояву цих ефектів безпосередньо залежить від обраного режиму роботи перетворювача та параметрів його керування.

Застосування методів широтно-імпульсного регулювання напруги дозволяє досягти високої точності формування електричних сигналів і забезпечує необхідні характеристики напруги [7, 8]. Водночас вибір частоти перемикання визначає співвідношення між енергетичними втратами у напівпровідникових ключових елементах і втратами в електричній машині. Зменшення пульсацій струму досягається підвищенням частоти комутації, однак це супроводжується зростанням динамічних втрат у напівпровідникових елементах, що потребує узгодженого підходу до вибору параметрів функціонування перетворювача.

Умови часткового навантаження, характерні для більшості реальних режимів роботи локомотивного тягового приводу, супроводжуються зменшенням значення коефіцієнта корисної дії, що пов'язано зі зростанням відносної частки постійних і комутаційних втрат. Це зумовлює підвищену чутливість системи до вибору алгоритмів керування саме в зоні неповного навантаження [9]. У таких режимах особливого значення набуває адаптація параметрів керування, яка дозволяє зменшити надлишкові втрати за рахунок зміни частоти перемикання або алгоритму модуляції відповідно до поточного навантаження [10].

Наявність гармонічних складових струму призводить до локального перегріву елементів електричної машини, що звужує допустимий діапазон експлуатаційних режимів [11]. Крім того, додаткові втрати від вищих гармонік проявляються не лише в омичних складових струму в обмотках, але також реалізуються у формі втрат у магнітному осерді, що підсилює теплове навантаження. Зменшення рівня гармонічних спотворень сприяє зниженню додаткових втрат і підвищенню ресурсу ізоляції.

Режими рекуперативного гальмування характеризуються зміною напрямку енергетичних потоків, при якій тяговий електродвигун функціонує як генератор електричної енергії. Результативність цього процесу визначається можливістю забезпечення стабільного режиму передачі електроенергії до контактної мережі або накопичувальних пристроїв. При цьому суттєву роль відіграють як параметри мережі, так і алгоритми керування перетворювачем, що визначають стійкість режиму інвертування енергії. Обмеження, пов'язані з параметрами енергосистеми, можуть призводити до часткової втрати потенційно поверненої енергії, що знижує ефективність рекуперації.

Температурний стан силових елементів є важливим чинником, що визначає їх електричні характеристики. Із підвищенням температурного рівня зростає електричний опір провідних каналів напівпровідникових структур, що призводить до збільшення втрат і зниження ефективності перетворення енергії [12, 13]. У цьому контексті режими роботи перетворювача опосередковано впливають на енергоефективність через зміну теплового середовища функціонування силових компонентів. Рациональна організація теплових режимів і ефективні системи тепловідведення забезпечують стабільність робочих параметрів перетворювача.

Тип застосованих напівпровідникових приладів істотно впливає на енергетичні показники перетворювача. Використання сучасних матеріалів із покращеними характеристиками комутаційних процесів дає змогу підвищувати робочі частоти без істотного збільшення енергетичних втрат, що позитивно позначається на якості електричної енергії та зменшує навантаження на тяговий двигун [14]. Це розширює можливості вибору оптимальних режимів роботи та підвищує гнучкість системи керування. Комплексне узгодження режимів роботи силових перетворювачів із характеристиками тягових двигунів забезпечує зниження сумарних втрат енергії та підвищення ефективності роботи локомотива. Логічним продовженням такого підходу є перехід до адаптивних стратегій керування, які враховують зміну навантаження, швидкості руху та енергетичних параметрів у реальному часі.

Висновки. Режими роботи силових перетворювачів визначають характер електромагнітних і теплових процесів у тягових двигунах та істотно впливають на рівень енергетичних втрат. Вибір параметрів керування має здійснюватися з урахуванням компромісу між втратами в перетворювачі та електричній машині. Рациональна організація режимів роботи дає змогу знизити споживання електроенергії, обмежити теплові навантаження та підвищити ресурс обладнання. Особливу роль відіграють режими часткового навантаження та рекуперативного гальмування, у яких прихований значний потенціал енергозбереження. Подальше підвищення ефективності пов'язане з використанням сучасних напівпровідникових технологій та впровадженням інтелектуальних систем керування, здатних забезпечити адаптивну зміну режимів роботи відповідно до умов експлуатації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Nerubatskyi V. P., Plakhtii O. A., Hordiienko D. A. Scientific foundations of higher energy efficiency and electromagnetic compatibility of semiconductor electric energy converters: monograph. Kharkiv: Publisher Machulin L., 2023. 220 p.
2. Нерубацький В. П. Огляд технологічних рішень підвищення енергоефективності роботи безколекторних тягових двигунів локомотивів. Збірник матеріалів XI міжнародної науково-технічної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку — PEMS'2025» (Київ, НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 18–20 листопада 2025 р.). Київ: НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», 2025. С. 118–119.
3. Нерубацький В. П., Фалєєв Ф. Р. Застосування енергоефективних технологій для підвищення ефективності засобів транспорту в умовах експлуатації. Тези стендових доповідей та виступів учасників 38-ї МНПК «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Харків, УкрДУЗТ, 09–10 жовтня 2025 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. № 3 (додаток). С. 53–54.
4. Kabalyk Y. Determination of energy loss in power voltage inverters for power supply of locomotive traction motors. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 165. P. 1437–1443. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.876>.
5. Нерубацький В. П. Ініціювання реалізації прикладного дослідницького проекту з удосконалення енергоефективності тягових електричних двигунів локомотивів з урахуванням режимів функціонування тягових перетворювачів. Збірка наукових тез XIV наукової конференції «Наукові підсумки 2025 року» (Харків, 18 грудня 2025 р.). Харків: ПП «Технологічний Центр», 2025. С. 29.
6. Nerubatskyi V. P. Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Том 30, № 4. С. 3–21. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i4.351425>.
7. Batkhashig B., da Costa Gonçalves P. F., Pietrini G., Nahid-Mobarakeh B., Emadi A. PWM techniques for two-level voltage source inverters: A comparative study. *IEEE Access*. 2025. Vol. 13. P. 86235–86255. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3563115>.
8. Benboukous M., Bahri H., Talea M., Bour M., Abdouni K. Comparative analysis of principal modulation techniques for modular multilevel converter and a modified reduced switching frequency algorithm for nearest level pulse width modulation. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No. 4. P. 26–34. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2025.4.04>.
9. Panchenko S. V., Babaiev M. M., Nerubatskyi V. P. Analysis of the efficiency of operation of modern control systems for brushless traction motors. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. Вип. 214. С. 181–200. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352044>.
10. Нерубацький В. П., Плахтій О. А., Гордієнко Д. А. Енергоефективні топології та алгоритми модуляції в автономних інверторах напруги: монографія. Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. 248 с.
11. Chen L., Chen M., Li B., Sun X., Jiang F. Harmonic current suppression of dual three-phase permanent magnet synchronous motor with improved proportional-integral resonant controller. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 6. 1340. <https://doi.org/10.3390/en18061340>.
12. Liu H., Xiang C., Du J., Zhang X. Multi-objective cooperative control of a junction-temperature-orientated three-level traction converter. *Transportation Safety and Environment*. 2025. Vol. 7, Iss. 1. tda017. <https://doi.org/10.1093/tse/tdaf017>.
13. Liu Y., Guo T., Li J., Pei C., Liu J. A study on temperature monitoring method for inverter IGBT based on memory recurrent neural network. *High-speed Railway*. 2024. Vol. 2, Iss. 1. P. 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.hspr.2024.02.003>.
14. Wu M., Yang S., Song K., Li M., Ma C. Multi-level technological advancements in stability and energy efficiency of railway traction power supply systems. *Energies*. 2025. Vol. 18, Iss. 13. 3392. <https://doi.org/10.3390/en18133392>.

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВУЗЛІВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАНОСТРУКТУРНИХ КОМПОЗИТІВ

Нерубацький В. П., Геворкян Е. С., Комарова Г. Л.

*Український державний університет залізничного транспорту
(Україна)*

Вступ. Сучасна стратегія модернізації залізничного транспорту України в умовах дефіциту енергоресурсів та постійного зростання вартості експлуатації вимагає принципово нових підходів до конструювання вузлів тягового рухомого складу. Одним із найбільш критичних напрямків у цій сфері є розробка компонентів, що здатні поєднувати надвисоку зносостійкість з ефективним тепловідведенням. Традиційні металеві матеріали, що наразі використовуються у вузлах тягових електричних двигунів, часто стають першопричиною зниження енергоефективності через високі втрати на тертя та інтенсивне виділення тепла. Надмірний нагрів вузлів не лише прискорює їх механічний знос, а й призводить до передчасної термічної деградації ізоляційних структур, що ставить під загрозу працездатність усього локомотива [1, 2]. Впровадження інноваційних керамічних композитів дозволяє суттєво подовжити життєвий цикл обладнання та забезпечити реальне ресурсозбереження за рахунок зменшення маси деталей та зниження потреби у мастильних матеріалах.

Актуальність досліджень. Актуальність роботи зумовлена необхідністю подолання «технологічної межі» традиційних матеріалів, що використовуються у тягових електричних двигунах. Постійне зростання потужності двигунів призводить до критичного підвищення питомих теплових навантажень у підшипникових вузлах. Проблема надійності в даному контексті безпосередньо пов'язана з енергозбереженням: високий коефіцієнт тертя та неефективне тепловідведення спричиняють додаткові витрати енергії на тягу. Створення гетерофазних наноструктурних матеріалів на основі діоксиду цирконію з додаванням нанодисперсних карбідів вольфраму та кремнію дозволяє вирішити це завдання, забезпечуючи стабільність експлуатаційних і трибологічних характеристик транспортних систем у довгостроковій перспективі.

Постановка задачі. Основною задачею дослідження є наукове обґрунтування та розробка методів формування наноструктурних композитних систем ZrO_2-WC та ZrO_2-SiC , призначених для модернізації критичних вузлів тягових електричних двигунів локомотивів. Необхідно довести ефективність поєднання високої в'язкості руйнування та теплопровідності в одному матеріалі, а також оцінити енергозберігаючий ефект від впровадження швидкісної електроконсолідації як основного технологічного процесу виготовлення деталей. Кінцевою метою є підвищення міжремонтного ресурсу тягових електричних двигунів при одночасному зниженні енерговитрат на етапі виробництва та експлуатації.

Результати досліджень. Основним методом отримання зразків було обрано швидкісну електроконсолідацію. Дана технологія дозволяє пропускати електричний струм промислової частоти безпосередньо через порошкову суміш, забезпечуючи миттєве нагрівання та ущільнення матеріалу [3, 4]. Така технологія є ефективною з точки зору ресурсозбереження, оскільки вона скорочує час перебування матеріалу під високою температурою з годин до декількох хвилин, мінімізуючи споживання електроенергії виробничими потужностями на 70–80 % порівняно з традиційними методами.

Надійність роботи тягових електричних двигунів у режимах пуску та гальмування безпосередньо залежить від здатності матеріалів вузлів тертя протистояти крихкому руйнуванню. Додавання нанодисперсного WC до матриці ZrO_2 дозволило сформувати структуру, що ефективно блокує поширення мікротріщин. Тріщиностійкість таких композитів досягає $15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, що у кілька разів перевищує показники стандартної

технічної кераміки та гарантує цілісність вузлів при вібраційних навантаженнях.

Для підвищення теплопровідності та забезпечення термостабільності розроблено композити системи $\text{ZrO}_2\text{--SiC}$ з вмістом карбіду кремнію 20–30 %. Введення SiC сприяє формуванню перколяційної теплопровідної структури, що підвищує ефективну теплопровідність матеріалу та покращує відведення тепла із зони контакту. Це може призводити до зниження робочої температури вузлів тертя та відповідного зменшення в'язких втрат у мастильному шарі, що позитивно впливає на енергетичні характеристики системи.

Експлуатаційні випробування підтвердили, що швидкість зношування розроблених керамічних пар у 1,8 рази нижча, ніж у металевих аналогів. Це дозволяє збільшити інтервал між технічними обслуговуваннями та мінімізувати потребу в мастилах на нафтовій основі, що суттєво підвищує екологічну безпеку експлуатації рухомого складу та знижує ризики забруднення навколишнього середовища.

Висновки. Надійність та експлуатаційний ресурс тягових електричних двигунів локомотивів у сучасних умовах напряму залежать від інтеграції у їхню конструкцію наноструктурних керамічних композитів, які здатні витримувати критичні механічні та термічні навантаження. Проведені дослідження довели, що застосування систем на основі діоксиду цирконію з карбідними наповнювачами у вузлах тягових електричних двигунів забезпечує необхідну стійкість до термічних ударів та запобігає деградації ізоляції шляхом ефективного відведення тепла. Важливою складовою забезпечення стабільної роботи тягових електричних двигунів є впровадження ресурсозберігаючої технології швидкісної електроконсолідації, яка дозволяє виготовляти високощільні деталі з суттєвою економією енергоносіїв. Такий комплексний підхід до модернізації тягових електричних двигунів підвищує їхню відмовостійкість та закладає фундамент для переходу до енергоефективного функціонування залізничного транспорту на основі інноваційних технологій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Nerubatskyi V. P. Analysis of the operating conditions and modes of locomotive traction motors. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2025. Том 30, № 4. С. 3–21. <https://doi.org/10.18664/ikszt.v30i4.351425>.
2. Panchenko S. V., Babaiev M. M., Nerubatskyi V. P. Analysis of the efficiency of operation of modern control systems for brushless traction motors. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2025. Вип. 214. С. 181–200. <https://doi.org/10.18664/1994-7852.214.2025.352044>.
3. Hevorkian E. S., Nerubatskyi V. P., Rucki M., Kilikevicius A., Mamalis A. G., Samociuk W., Morozow D. Electroconsolidation method for fabrication of fine-dispersed high-density ceramics. *Nanotechnology Perceptions*. 2024. Vol. 20, No. 1. P. 100–113. <https://doi.org/10.56801/nano-ntp.v20i1.363>
4. Nerubatskyi V. P., Vovk R. V., Gzik-Szumiata M., Gevorkyan E. S. Investigation of the effect of silicon carbide nanoadditives on the structure and properties of microfine corundum during electroconsolidation. *Low Temperature Physics*. 2023. Vol. 49, No. 4. P. 540–546. <https://doi.org/10.1063/10.0017596>.

ВДОСКОНАДЕННЯ МЕТОДУ ОБРОБКИ НА СУДНІ РІДКИХ СТОКІВ

¹Малахов О.В., ¹Нікольський В.В., ¹Ніколаєва Л.Л., ²Палагін О.М.

¹Одеський національний університет «Одеська морська академія»

(Україна)

²Дунайський інститут національного університету «Одеська морська академія»

(Україна)

Вступ. Проблема виникнення, збирання, зберігання та сепарації багатофазного потоку води з нафтопродуктами, що позначається в умовах експлуатації засобів водного транспорту, як судові льяльні води є дуже актуальною. При роботі суден вони є найбільш багатотоннажним видом відходів і згідно з регламентуючими вимогами [1] всі судна повинні обладнатися сепараторами судових льяльних вод. Вихідна концентрація домішок у очищеній воді має становити менше 15 мл/л. У ряді особливих районів планети скидання судових льяльних вод за борт взагалі заборонено. При всебічному аналізі порушеної проблеми можна констатувати, що з економічної точки зору вторинні продукти нафтохімії становлять великий інтерес як джерело додаткових паливних ресурсів судна.

Актуальність досліджень. Актуальність вирішення проблеми переробки судових льяльних вод безпосередньо може призвести до підвищення як економічних показників роботи судна, так і вплине на якість його експлуатації. В цьому випадку можливе підвищення сумарного ККД судової енергетичної установки та зведення до допустимих норм екологічного забруднення водного басейну в районі плавання судна.

Переробка судових льяльних вод безпосередньо пов'язана з отриманням вторинних енергетичних ресурсів і в умовах роботи судна раніше практично не розглядалася.

Постановка задачі. Основною проблемою всіх відомих технологій розділення судових льяльних вод є відсутність можливості збирання та подальшої обробки отриманої висококонцентрованої суміші нафтопродуктів. Кінцевим продуктом є лише очищена вода. Вирішення проблеми розділення судових льяльних вод може суттєво вплинути на зменшення обсягів використовуваних природних ресурсів та покращити якість контролю за станом екології та біосфери на нашій планеті.

Одним із нових наукових рішень проблеми розділення судових льяльних вод може бути підхід, який заснований на використанні гідродинамічного процесу суперкавітації. У цьому випадку для початкового створення кавітації та підтримки стабільної кавітаційної порожнини можливе використання ультразвукового джерела хвиль низького тиску, гідродинамічних особливостей самого кавітаційного процесу та штучної вентиляції порожнини. За такого підходу основним питанням дослідницької роботи має бути розробка нового наукового напрямку модернізації судової технології очищення багатофазних нафтовмісних потоків на основі процесу суперкавітації. Така модернізація має базуватися на теоретичних та експериментальних даних, отриманих в результаті вирішення наступних конкретних задач:

- аналіз теоретичних методів, які можуть бути використані для розрахунку характеристик багатофазного потоку при вході в режим суперкавітації, та розробка математичної моделі руйнування суперкаверни в результаті розгерметизації лінії паровідведення та прориву повітря в каверну;

- оцінка ступеня ефективності процесу розділення судових льяльних вод для трьох методів підтримки суперкавітації: гідродинамічного, ультразвукового та штучної вентиляції, та визначення діапазону зміни питомих коефіцієнтів ефективності, що характеризують процес розділення судових льяльних вод при використанні цих методів створення суперкаверни.

Результати досліджень. Пропускна здатність будь-якого гідравлічного каналу визначається безпосередньо двома факторами — гідравлічними особливостями його конфігурації та наявністю характерних гідромеханічних процесів у рухомому потоці. До таких процесів належать утворення вихорів, відрив від твердих поверхонь, зміни фазового

складу тощо.

З точки зору гідродинамічних особливостей руху потоку суднових лляльних вод, діаграма розподілу тиску або швидкості вздовж усієї поверхні робочої камери кавітаційного каналу повинна бути близькою до рівномірної. У цьому випадку можна зменшити негативний вплив турбулентних напружень. Також, завдяки такій рівномірності стає можливим забезпечення необхідних міцнісних характеристик сполучних гідравлічних елементів (вхідної та вихідної розділових пластин з корпусом) судового розділового блоку.

У застосуванні до розділення суднових лляльних вод, ступінь неоднорідності потоку має суттєвий вплив на пропускну здатність кавітаційного каналу. Залежно від питомої ваги компонентів всередині трубопроводу, на дні каналу спостерігатиметься осадження важчих фракцій. У результаті багатофазного осадження потоку відбуватимуться різні розподіли діаграм швидкостей за висотою перерізу потоку. Гарний приклад трьох варіантів осадження фракцій у випадку транспортування механічних суспензій з водою описано в [2]. Діаграми швидкостей, що відповідають таким потокам, були експериментально виміряні в [3]. При рівномірному розподілі фракцій діаграма швидкостей є симетричною у випадку руху з низькими швидкостями — до 2,5 м/с [3]. Збільшення швидкості від 2,5 до 5 м/с призводить до незначного зміщення максимуму діаграми швидкостей вгору по каналу. У нижній половині каналу починається процес осадження осаду через падіння локальних значень швидкості [3].

Подальша зміна структури потоку призводить до очевидної асиметрії на діаграмі швидкостей потоку. Його максимум піднімається до верхньої стінки каналу. Через зміну поперечного перерізу потоку донний осад рухається з меншими швидкостями порівняно з основним потоком, і підтримка витрати на постійному рівні в цьому випадку вимагає багато енергії [3].

На підставі дослідження було зроблено висновок, що під час використання штучної вентиляції кавітаційної каверни оптимальним місцем введення повітря для створення та подальшого вентилявання порожнини має бути не верх вхідної сепараторної пластини, а її основа. У цьому випадку, при примусовому введенні повітря, порожнина буде стабільно зростати та підтримуватися у своїх просторових розмірах без порушення потоку від верхнього краю вхідної сепараторної пластини.

Зрив потоку суднових лляльних вод з руйнуванням кавітаційної порожнини також неминуче призведе до пульсуючого характеру процесу розділення. Усунення таких пульсацій може бути досягнуто зменшенням витрати суднових лляльних вод або штучною вентиляцією каверни. У цьому випадку кавітаційне число зміщується в область вищих значень. Перевага штучної вентиляції каверни при обробці суднових лляльних вод чітко демонструється графіком, отриманим експериментально. Він показаний на рисунку 1, де видно, що при переході на нижчі швидкості (зі збільшенням кавітаційного числа) потоку суднових лляльних вод, що надходить у сепаратор, значення тиску пароутворення збільшується.

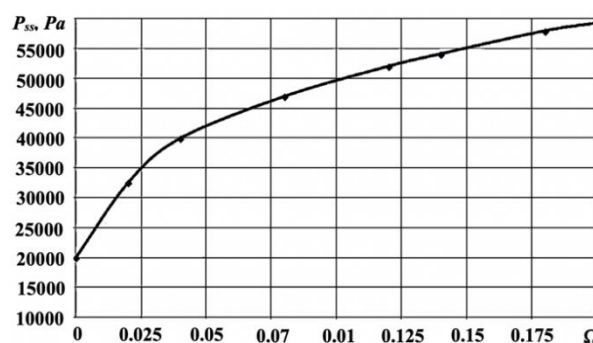


Рисунок 1 — Залежність тиску кипіння від числа кавітації

Представлені експериментальні результати були отримані для потоку води, що рухається в циліндричному трубопроводі за температури нагрівання 60 °С.

На рисунку 2 показано розраховану графічну залежність між критеріями Фруда, що визначаються відповідно об'ємом кавітаційної порожнини та відносним розміром вхідної сепараторної пластини H . Розрахунок проводився для $H=0,75$, тобто коли ступінь перекриття потоків на вході в робочу камеру сепаратора становить 75 %.

Усі результати, отримані при побудові графічної номограми, відповідають діапазону зміни кавітаційних чисел оброблюваного потоку від $\Omega=0,001$ до $\Omega=0,15$. Кожна серія розрахованих значень відповідає власній швидкості потоку на вході в робочу камеру кавітаційного каналу, значення якої з кроком 1 м/с відповідають діапазону від 2 до 15 м/с.

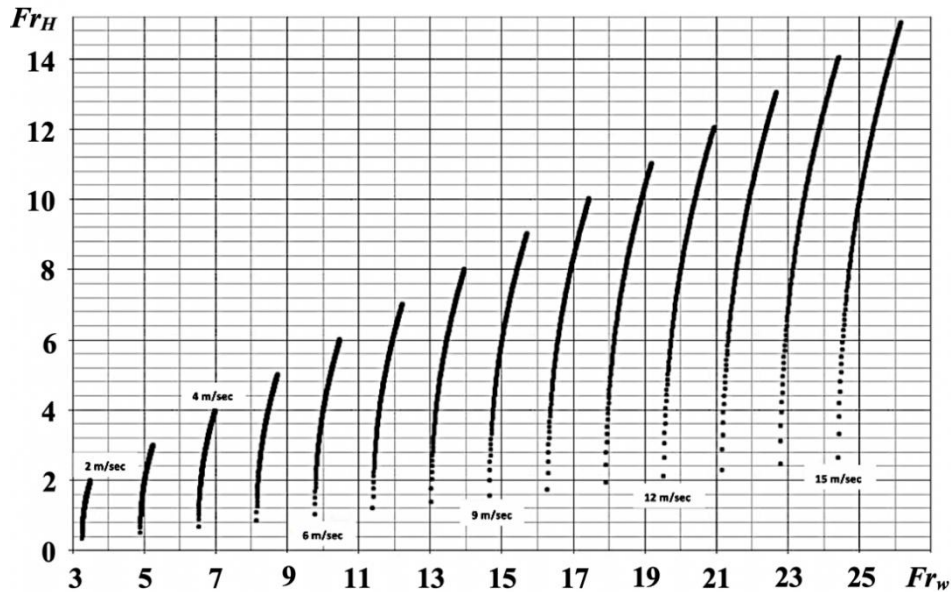


Рисунок 2 — Залежність між критеріями Фруда, що визначаються об'ємом кавітаційної порожнини та відносним розміром вхідної сепараторної пластини

Практичне використання номограми для розрахунку якості процесу сепарації базується на тому, що при створенні повнорозмірної штучної суперкавітаційної каверни всередині робочої камери сепаратора, оброблений потік суднових ляльних вод буде взаємодіяти лише з вхідною частиною конструкції робочої камери сепаратора. У цьому випадку гідродинамічні реакції не відбуватимуться в експлуатаційній області по всій довжині робочої камери. Область, заповнена насиченою водяною парою, не впливатиме на рухомий потік суднових ляльних вод.

За умови вентиляції штучної каверни розрахунок робочих характеристик процесу суперкавітаційного розділення слід звести до визначення кавітаційних та гідродинамічних характеристик вхідної частини робочої камери сепаратора.

Під час експериментальних досліджень було отримано набір даних для сепарування суднових ляльних вод на базі гідродинамічної кавітації. Ці результати згодом були прийняті за основу для порівняння з ультразвуковою та повітряною кавітацією. Отримані результати показали, що найвища продуктивність щодо отриманої водяної пари спостерігалася при штучній повітряній вентиляції каверни. В однакові моменти часу результати щодо об'єму водяної пари, отриманої під час розділення, починали відрізнятися. Найбільші значення відповідали повітряній вентиляції каверни. В експериментах число кавітації дорівнювало $\Omega=0,329$, а результат покращення починався після 20 секунд руху потоку.

Виходячи з отриманих результатів досліджень було зроблено висновок, що недоцільно збільшувати розміри кавітаційного каналу. Збільшення об'ємної витрати призведе до зміщення енергетичної ефективності лише в бік менших значень. Іншими

словами, швидкість випаровування водної складової, а так саме і загальний обсяг кінцевого продукту, лише зменшиться. Також у цьому випадку спостерігатиметься неадекватне збільшення гідравлічних витрат.

Нарешті, можна стверджувати, що ефективність процесу розділення суднових лляльних вод залежить від способу створення кавітаційної каверни. На підставі отриманих результатів досліджень було видно, що найбільш цінні результати відповідають діапазону витрат суднових лляльних вод від $1 \cdot 10^{-3}$ to $2 \cdot 10^{-3}$ м³/с. У цьому діапазоні витрат коефіцієнт енергетичної ефективності має найвище значення – 80...82 %, і для одного кавітаційного каналу цей числовий діапазон є оптимальним. Загальний обсяг виробництва можна збільшити, використовуючи паралельне гідравлічне з'єднання кавітаційних каналів.

Під час процесу розділення суднових лляльних вод перспективним напрямком є зниження швидкості оброблюваного потоку шляхом зміщення процесу в бік вищих кавітаційних чисел. Цей напрямок може бути реалізований шляхом штучної вентиляції кавітаційної суперкаверни. Методи створення та підтримки штучних кавітаційних каверн у цьому випадку є дуже перспективними. Основні технології, які будуть створені на основі майбутніх досліджень, повинні враховувати спосіб подачі та витрату повітря, що йде на вентиляцію порожнини. Підходи можуть бути радикально різними, оскільки повітря може подаватись двома способами — безперервно та в імпульсному режимі.

На кількість повітря, яке має подаватись для вентиляції порожнини, безпосередньо впливатиме характер руху рідини в сліді за порожниною. З цієї причини, якщо в сліді за порожниною немає зворотного потоку, все повітря буде виноситися з дрібними диспергованими кавітаційними бульбашками. Повітря також може дифундувати через межі порожнини в потік оброблюваних суднових лляльних вод.

З точки зору особливостей процесу розділення суднових лляльних вод з використанням суперкавітації, підвищення тиску в порожнині є неприйнятним. У цьому випадку може відбутися майже миттєве руйнування порожнини. Дуже важливо отримати новий науковий результат, який дозволить описати можливе підвищення тиску в області дзеркала випаровування водяної пари під час турбулентного перемішування повітряних струменів на дозвукових швидкостях.

Висновки. Принцип роботи кавітаційного сепаратора суднових лляльних вод базується на фазовому переході водної складової під впливом кавітаційного поля на оброблюваний багатофазний потік у діапазоні температур від 20 до 70 °С. Процес фазового переходу є регульованим, і кавітація може бути створена не тільки завдяки високій швидкості оброблюваного потоку, але й штучно. У цьому випадку вдування повітря та/або використання ультразвукових коливань покращує якість очищення суднових лляльних вод відповідно до вимог MARPOL 73/78 [1].

Верхня межа зони стабільної кавітації, що відповідає числу кавітації $\Omega=2$, повинна обмежувати діапазон швидкостей потоку суднових лляльних вод на вході в робочу камеру сепаратора.

ЛІТЕРАТУРА

1. MARPOL 73/78. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships; 1973:584.
2. Ye, K.; He, D.; Zhao, L.; Guo, P. Influence of Fluid Viscosity on Cavitation Characteristics of a Helico-Axial Multiphase Pump (HAMP). *Energies* 2022, 15, 8149.
3. Han, M.; Zhang, J.; Chu, W.; Chen, J.; Zhou, G. Research Progress and Prospects of Marine Oily Wastewater Treatment: A Review. *Water* 2019, 11, 2517.

ФОРМУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНИХ КОМПАНІЙ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ, ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ТА РИНКОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ

Парохненко О. С.

*Національний транспортний університет
(Україна)*

Сучасний розвиток транспортної галузі відбувається в умовах глибоких структурних змін, що охоплюють цифровізацію бізнес-процесів, екологізацію логістичної діяльності, посилення міжнародної конкуренції, трансформацію транспортних ланцюгів і підвищення рівня ризиків зовнішнього середовища. За таких умов транспортні компанії змушені адаптувати свої моделі функціонування до нових вимог ринку, що передбачає не лише оновлення матеріально-технічної бази, а й упровадження інноваційних підходів до управління, ресурсного забезпечення, формування клієнтської цінності та стратегічного розвитку. Саме тому питання формування механізму інноваційного розвитку транспортних компаній набуває особливої наукової та практичної значущості.

У сучасній науковій літературі окремі аспекти інноваційного розвитку підприємств уже дістали належне висвітлення. Зокрема, у праці К. А. Компанець, Л. О. Литвишко, Ю. Малахової обґрунтовано, що природоохоронна діяльність повинна розглядатися як інноваційний процес, який інтегрується в загальну систему функціонування підприємства. У дослідженні К. Kompanets, L. Lytvysko, R. Fedoryak, O. Krasnoshtan розкрито значення моделювання системи управління інноваційним розвитком персоналу підприємств у кризових умовах, що є важливим для розуміння ролі кадрової складової в інноваційних трансформаціях. Праця К. Kompanets, V. Ilchenko, A. Spitsina, S. Petrovska, D. Ovchar, M. Horodetskyu присвячена інноваційним моделям управління людським капіталом в умовах нестабільності, що також має важливе значення для побудови сучасних адаптивних моделей розвитку підприємств. Водночас, попри наявність ґрунтовних наукових результатів, потребує подальшого опрацювання питання інтеграції цифрових, екологічних, ресурсних, кадрових та аналітичних компонентів у єдиний механізм інноваційного розвитку транспортних компаній [1-3].

Актуальність теми зумовлена тим, що в сучасних умовах інноваційний розвиток транспортних компаній уже не може обмежуватися лише впровадженням окремих технологічних нововведень. Підприємства транспортної сфери функціонують у середовищі, де на результативність їх діяльності одночасно впливають цифрова трансформація, зростання екологічних вимог, обмеженість фінансових ресурсів, необхідність оновлення рухомого складу, нестабільність регуляторного середовища та дефіцит кваліфікованих кадрів. У таких умовах забезпечення стійкої конкурентоспроможності потребує системного механізму, здатного узгодити внутрішні ресурси підприємства із зовнішніми викликами.

Особливої актуальності це питання набуває для транспортних компаній України, які, крім загальноекономічних викликів, діють в умовах воєнних ризиків, порушення логістичних маршрутів, коливань вартості енергоресурсів і необхідності адаптації до європейських стандартів екологічної та цифрової сумісності. Саме тому наукове обґрунтування механізму інноваційного розвитку транспортних компаній має важливе значення для формування сучасної моделі управління, яка поєднує цифровізацію, екологізацію, інвестиційну гнучкість та стратегічну адаптивність.

Метою дослідження є обґрунтування теоретико-прикладних засад формування механізму інноваційного розвитку транспортних компаній в умовах цифровізації, екологізації та ринкової нестабільності.

Результати дослідження. У процесі дослідження встановлено, що інноваційний розвиток транспортної компанії доцільно розглядати як керований процес якісних перетворень бізнес-моделі, який охоплює цифрову модернізацію логістичних операцій,

упровадження екологічно орієнтованих рішень, розвиток людського капіталу, удосконалення системи стратегічного управління та посилення аналітичної обґрунтованості управлінських рішень. Такий підхід дозволяє перейти від фрагментарного запровадження окремих нововведень до побудови цілісної системи інноваційного оновлення підприємства.

Доведено, що механізм інноваційного розвитку транспортних компаній повинен формуватися як багатокомпонентна система, яка поєднує кілька взаємопов'язаних блоків. До таких блоків належать цифровий, екологічний, організаційно-управлінський, ресурсно-інвестиційний, кадровий та аналітичний. Їхня взаємодія дозволяє забезпечити не лише впровадження інновацій, а й створити основу для довгострокового зростання конкурентоспроможності транспортної компанії.

Для узагальнення результатів доцільно подати ключові складові механізму інноваційного розвитку транспортних компаній у вигляді таблиці.

Таблиця 1 — Ключові складові механізму інноваційного розвитку транспортних компаній

Складова механізму	Зміст	Очікуваний ефект
Цифрова	Впровадження TMS, WMS, ERP, e-TTN, цифрових платформ, аналітики даних, автоматизації логістичних процесів	Підвищення швидкості управління, оптимізація маршрутів, скорочення витрат, зростання прозорості операцій
Екологічна	Розвиток зеленої логістики, декарбонізація перевезень, енергоефективні технології, контроль екологічного сліду	Зменшення екологічного навантаження, відповідність ESG-вимогам, підвищення екологічної конкурентоспроможності
Організаційно-управлінська	Удосконалення структури управління, інтеграція інновацій у стратегію розвитку, адаптивне управління	Підвищення гнучкості, швидша реакція на ринкові зміни, посилення стратегічної стійкості
Ресурсно-інвестиційна	Залучення інвестицій, розвиток нематеріальних активів, використання моделі Asset-Light Innovation	Зниження фінансових ризиків, зростання капіталовіддачі, більш раціональне використання ресурсів
Кадрова	Розвиток людського капіталу, цифрових компетентностей, інноваційної культури та управлінських навичок персоналу	Підвищення інноваційної спроможності, покращення якості управлінських рішень, зростання адаптивності підприємства
Аналітична	Еко-інтегральне оцінювання інноваційного потенціалу, моніторинг ризиків, аналіз результативності	Підвищення обґрунтованості стратегічних рішень, точніший вибір інноваційних пріоритетів

Дані таблиці свідчать, що механізм інноваційного розвитку транспортних компаній не зводиться до окремих технологічних заходів. Його зміст полягає в системній взаємодії всіх складових, кожна з яких виконує самостійну функцію, але максимальний результат досягається лише за умови їхньої узгодженої інтеграції.

Одним із важливих науково-прикладних результатів є обґрунтування доцільності використання моделі Asset-Light Innovation як стратегічного інструменту інноваційного

розвитку транспортних компаній. На відміну від традиційного підходу, орієнтованого на накопичення матеріальних активів, цей підхід передбачає пріоритетний розвиток цифрових платформ, алгоритмічного управління, партнерських моделей взаємодії, нематеріальних активів та інтелектуального капіталу. Це дозволяє транспортним компаніям підвищити гнучкість логістичних операцій, знизити витрати на утримання надлишкових активів та підвищити ефективність інвестицій у нестабільному середовищі.

Також встановлено, що важливе значення для формування сучасного механізму інноваційного розвитку має еко-інтегральний підхід до оцінювання інноваційного потенціалу. Його сутність полягає у врахуванні не лише фінансово-економічних параметрів функціонування підприємства, а й екологічної нейтральності логістичних процесів, рівня цифрової зрілості, частки нематеріальних активів і здатності компанії адаптуватися до нових регуляторних вимог. Такий підхід підвищує якість стратегічних управлінських рішень і дозволяє більш обґрунтовано визначати напрями інноваційного оновлення.

Результати дослідження також підтвердили, що найбільш вагомими драйверами інноваційного розвитку транспортних компаній є цифровізація логістичних процесів, розвиток зеленої логістики, міжнародна кооперація та поглиблення технологічного трансферу. Водночас основними стримувальними чинниками залишаються обмеженість фінансування інноваційних проєктів, зношеність транспортного парку, нестабільність регуляторного середовища, воєнні ризики та дефіцит кваліфікованого персоналу. Це свідчить про необхідність побудови механізму розвитку, який буде не лише інноваційним, а й адаптивним, ризик-орієнтованим та антикризовим.

Висновки. Отже, у результаті дослідження встановлено, що формування механізму інноваційного розвитку транспортних компаній є складним багаторівневим процесом, який потребує інтеграції цифрових, екологічних, організаційно-управлінських, ресурсних, кадрових та аналітичних складових. Доведено, що інноваційний розвиток транспортної компанії має розглядатися як безперервний процес стратегічно керованих змін, спрямований на підвищення її конкурентоспроможності, адаптивності та стійкості в умовах нестабільного ринкового середовища.

Обґрунтовано, що найбільш перспективними напрямками розвитку є цифрова трансформація логістичних процесів, упровадження екологічно орієнтованих рішень, застосування моделі Asset-Light Innovation, розвиток людського капіталу та використання еко-інтегрального оцінювання інноваційного потенціалу. Саме комплексне поєднання цих елементів формує основу сучасної системи інноваційного розвитку транспортних компаній.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані під час розроблення стратегій інноваційного розвитку транспортних компаній, визначення інвестиційних пріоритетів, удосконалення логістичних бізнес-процесів, підвищення екологічної ефективності діяльності та зміцнення ринкових позицій підприємств транспортної сфери.

ЛІТЕРАТУРА

1. Компанець К. А., Литвишко Л. О., Малахова Ю. Формування інноваційної природоохоронної діяльності. Приазовський економічний вісник. 2021. Вип. 2(25). URL: <http://pev.kpu.zp.ua/vypusk-25>. DOI: <https://doi.org/10.32840/2522-4263/2021-2-25>.
2. Kompanets K., Lytyshko L., Fedoryak R., Krasnoshtan O. Simulation Modeling of the Distribution of Rights and Management System of Innovative Development of Personnel of Enterprises under the Influence of the Factors of the COVID-19 Pandemic. Virtual International Conference on Sustainable Innovation in Mechanical Engineering 1CSIME-2021. 2022. Vol. 2413. P. 040003-1–040003-11. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0079789>.
3. Kompanets K., Ilchenko V., Spitsina A., Petrovska S., Ovchar D., Horodetsky M. Innovation models for management of human capital in conditions of instability. The International Conference on Business and Technology (ICBT Oxford'2024). November 21–22, 2024. University of Oxford, Oxford, United Kingdom.

ІННОВАЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ УПРАВЛІННЯ СЕРВІСНОЮ ЯКІСТЮ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

Пахолка О. В.

*Національний транспортний університет
(Україна)*

Вступ. У сучасних умовах динамічної трансформації транспортної галузі сервісна якість транспортного обслуговування стає одним із ключових чинників забезпечення конкурентоспроможності підприємств. Зміна поведінки споживачів, посилення вимог до швидкості, безпечності, надійності та прозорості надання транспортних послуг, а також цифровізація логістичних процесів обумовлюють необхідність удосконалення підходів до управління якістю сервісу. У таких умовах традиційні механізми контролю якості вже не забезпечують належного рівня адаптивності підприємств до нових ринкових викликів. Це зумовлює потребу в розробленні та впровадженні інноваційних механізмів управління сервісною якістю транспортного обслуговування, які поєднують цифрові технології, аналітичні інструменти, сучасні моделі управління персоналом і клієнтоорієнтовані підходи.

Науковий інтерес до проблематики інноваційного управління розвитком підприємств, людського капіталу, цифровізації та екологічної трансформації суттєво посилюється в останні роки. Зокрема, у працях К. А. Компанець, Л. О. Литвишко, Р. Федоряк, О. Красноштан [2] обґрунтовано значення імітаційного моделювання у розподілі прав і побудові систем управління інноваційним розвитком персоналу підприємств в умовах кризових впливів, зокрема пандемії COVID-19. У дослідженні К. Компанець, В. Ільченко, А. Спіциної, С. Петровської, Д. Овчар, М. Городецького [3] розкрито інноваційні моделі управління людським капіталом в умовах нестабільності, що має безпосереднє значення для формування сервісної культури та адаптивності транспортних компаній. Водночас у праці К. А. Компанець, Л. О. Литвишко, Ю. Малахової [1] акцентовано увагу на інноваційній природоохоронній діяльності як важливому векторі сучасного розвитку підприємств, що актуалізує поєднання сервісної якості з екологічною відповідальністю транспортного бізнесу.

Актуальність дослідження зумовлена тим, що в сучасній транспортній системі якість обслуговування визначається не лише технічними параметрами перевезення, а й рівнем комунікації із клієнтом, точністю виконання замовлень, гнучкістю сервісу, доступністю інформації, цифровим супроводом послуги та здатністю підприємства оперативно реагувати на зміну попиту. Для транспортних компаній сервісна якість є не лише операційною характеристикою, а й стратегічним активом, який безпосередньо впливає на репутацію, лояльність клієнтів, ринкову стійкість і прибутковість.

Особливої значущості ця проблема набуває в умовах нестабільності, коли підприємства змушені одночасно забезпечувати високу якість обслуговування, оптимізацію витрат, стійкість логістичних процесів і відповідність сучасним екологічним вимогам. Саме тому інноваційні механізми управління сервісною якістю транспортного обслуговування мають формуватися як інтегрована система, що поєднує організаційні, цифрові, кадрові, аналітичні, економічні та екологічні інструменти.

Метою дослідження є обґрунтування теоретичних і прикладних засад формування інноваційних механізмів управління сервісною якістю транспортного обслуговування в умовах цифровізації, нестабільності зовнішнього середовища та зростання вимог до клієнтоорієнтованості транспортних підприємств.

Результати дослідження. У результаті дослідження встановлено, що сервісна якість транспортного обслуговування є багатокомпонентною економіко-управлінською категорією, яка формується під впливом технічних, організаційних, інформаційних, кадрових, цифрових та екологічних чинників. На відміну від традиційного підходу, що

зосереджувався переважно на показниках своєчасності й безпеки перевезень, сучасне управління сервісною якістю повинно охоплювати весь цикл взаємодії підприємства зі споживачем, включаючи цифровий супровід замовлення, персоналізацію сервісу, прозорість інформаційних потоків та управління клієнтським досвідом.

На основі узагальнення сучасних наукових підходів доведено, що інноваційні механізми управління сервісною якістю доцільно розглядати як систему взаємопов'язаних управлінських рішень, інструментів і процесів, спрямованих на безперервне підвищення рівня транспортного обслуговування. Їх основу складають цифрові платформи управління перевезеннями, CRM- та TMS-системи, GPS-моніторинг, IoT-рішення, системи прогнозування попиту, аналітика клієнтського досвіду, моделі оцінювання KPI та ESG-параметрів, а також сучасні підходи до розвитку персоналу.

Таблиця 1 — Складові інноваційного механізму управління сервісною якістю транспортного обслуговування

Складова механізму	Зміст складової	Інноваційні інструменти реалізації	Очікуваний результат
Організаційна	Формування гнучкої системи управління якістю сервісу та координації підрозділів	Agile-підходи, процесне управління, сервісні стандарти, проєктні команди	Підвищення узгодженості дій персоналу та оперативності обслуговування
Цифрова	Забезпечення прозорості та швидкості обслуговування	CRM, TMS, GPS-моніторинг, IoT, Big Data, електронний документообіг	Підвищення точності виконання замовлень і зниження кількості помилок
Клієнтоорієнтована	Виявлення та врахування потреб споживачів	Онлайн-опитування, цифровий зворотний зв'язок, аналіз скарг, customer journey map	Зростання задоволеності клієнтів і формування лояльності
Кадрова	Розвиток сервісної культури та цифрових компетентностей персоналу	Навчання, тренінги, мотиваційні програми, оцінка компетентностей	Підвищення професійності персоналу та якості комунікації
Аналітична	Моніторинг параметрів сервісної якості та прийняття рішень	Dashboard-аналітика, KPI, прогнозування попиту, цифрові звіти	Своєчасне виявлення проблем і підвищення адаптивності компанії
Економічна	Оцінювання ефективності впровадження інновацій у сервіс	ROI, бюджетування, контролінг витрат на якість	Оптимізація витрат і підвищення ефективності сервісних рішень
Екологічна	Поєднання сервісної якості з екологічною відповідальністю	ESG-підходи, оптимізація маршрутів, контроль викидів, енергоефективні рішення	Зменшення екологічного навантаження та зміцнення ринкової репутації

Джерело: сформовано автором на підставі [4–10]

Для узагальнення ключових складових інноваційного механізму управління сервісною якістю транспортного обслуговування доцільно виділити його основні структурні елементи, інструменти реалізації та очікувані результати функціонування (табл. 1).

Як видно з табл. 1, інноваційний механізм управління сервісною якістю транспортного обслуговування має комплексний характер і поєднує організаційні, цифрові, клієнтоорієнтовані, кадрові, аналітичні, економічні та екологічні складові. Їх інтеграція дає змогу транспортному підприємству забезпечити цілісне управління якістю сервісу, підвищити гнучкість обслуговування та адаптувати його до змін ринкового середовища.

Важливим результатом дослідження є встановлення того, що ефективне управління сервісною якістю неможливе без розвитку людського капіталу та впровадження інноваційних моделей управління персоналом. Саме персонал забезпечує практичну реалізацію сервісних стандартів, якість взаємодії з клієнтом та гнучкість підприємства у нестабільних умовах. У цьому контексті вагомими є наукові положення, розроблені у працях К. Компанець та співавторів, де доведено, що інноваційні моделі управління людським капіталом та інструменти імітаційного моделювання суттєво підвищують стійкість систем управління в умовах кризи, невизначеності та зовнішніх шоків. Це дозволяє адаптувати підходи до сервісного управління в транспортній сфері, де якість обслуговування значною мірою залежить від компетентності, мотивації та координації персоналу.

Не менш важливою є екологічна складова сервісної якості. Сучасний клієнт дедалі частіше оцінює транспортну послугу не лише за критеріями вартості, швидкості чи надійності, а й за екологічністю логістичного рішення. Тому інноваційні механізми управління сервісною якістю мають включати інструменти екологічного менеджменту, що узгоджується з науковими підходами до формування інноваційної природоохоронної діяльності підприємств. Поєднання сервісної результативності та екологічної відповідальності підсилює стратегічні позиції транспортного підприємства та сприяє його сталому розвитку.

Висновки. Отже, інноваційні механізми управління сервісною якістю транспортного обслуговування є необхідною умовою підвищення ефективності діяльності транспортних підприємств у сучасному конкурентному середовищі. Вони забезпечують перехід від фрагментарного контролю окремих параметрів перевезення до системного управління якістю сервісу на всіх етапах взаємодії зі споживачем.

Установлено, що сервісна якість транспортного обслуговування формується під впливом комплексу організаційних, цифрових, кадрових, інформаційних, економічних та екологічних факторів, які мають розглядатися як єдина взаємопов'язана система. Доведено, що ключовими чинниками підвищення якості сервісу є цифровізація процесів, розвиток людського капіталу, запровадження клієнтоорієнтованих моделей комунікації, використання аналітичних інструментів управління та інтеграція екологічних підходів у транспортне обслуговування.

Практична цінність дослідження полягає у можливості використання запропонованих підходів для вдосконалення систем управління якістю на транспортних підприємствах, підвищення задоволеності клієнтів, зміцнення конкурентних позицій компаній та забезпечення їх адаптивності в умовах нестабільного зовнішнього середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Компанець К. А., Литвишко Л. О., Малахова Ю. Формування інноваційної природоохоронної діяльності. Приазовський економічний вісник. 2021. Вип. 2(25). URL: <http://pev.kpu.zp.ua/vypusk-25>. DOI: <https://doi.org/10.32840/2522-4263/2021-2-25>.
2. Kompanets K., Lytvysenko L., Fedoryak R., Krasnoshtan O. Simulation Modeling of the

Distribution of Rights and Management System of Innovative Development of Personnel of Enterprises under the Influence of the Factors of the COVID-19 Pandemic. Virtual International Conference on Sustainable Innovation in Mechanical Engineering 1CSIME-2021. 2022. Vol. 2413. P. 040003-1–040003-11. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0079789>.

3. Kompanets K., Ilchenko V., Spitsina A., Petrovska S., Ovchar D., Horodetsky M. Innovation models for management of human capital in conditions of instability. The International Conference on Business and Technology (ICBT Oxford'2024). November 21–22, 2024. University of Oxford, Oxford, United Kingdom.

4. Ілляшенко С. М. Управління інноваційним розвитком: проблеми, концепції, методи. Суми: Університетська книга, 2003. 278 с.

5. Федулова Л. І. Інноваційна економіка. Київ: Либідь, 2006. 480 с.

6. Гринько Т. В. Управління якістю послуг на транспортних підприємствах в умовах цифровізації. Економіка та держава. 2023. № 4. С. 56–61.

7. Мних О. Б. Сервісна логістика та клієнтоорієнтоване управління транспортними послугами. Львів: ЛНУ імені Івана Франка, 2022. 214 с.

8. Крикавський Є. В., Чухрай Н. І. Логістичне управління. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2019. 640 с.

9. Балабанова Л. В., Холод В. В. Управління якістю послуг. Київ: Центр учбової літератури, 2018. 328 с.

10. Портер М. Конкурентна перевага. Київ: Наш формат, 2020. 624 с.

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТИ ВИСОКОЛУЖНОГО ЦИЛІНДРОВОГО МАСЛА СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДВИГУНА

Погорлецький Д.С., Дзигар А.К., Худяков І.В.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. При експлуатації суднових двигунів не рідко виникають дилеми, до однієї з яких відноситься використання високов'язких палив з високим вмістом сірки. Дані палива мають знижену вартість, тому їх застосування в судновій енергетиці, ще почалося з котельних установок та поширилося і на суднові двигуни. Застосування подібних сортів палива нині відбувається як у крейцкопфних, так і в тронкових моделях дизелів [1–7]. Поглиблення переробки нафти супроводжується погіршенням якості всіх видів палив, що призводить до зниження надійності роботи та ресурсних показників суднових дизелів. При цьому збільшуються інтенсивність старіння моторного масла, забруднення поверхонь дизеля вуглецевими відкладеннями та швидкість їх зношування. Нині у сфері розробки моторних масел є міжнародні нафтові компанії (Mobil, Shell, Castrol, BP, Nippon Petroleum, Chevron Техасо та інші). Особлива увага приділяється питанням економії моторних масел у процесі їх застосування на суднових енергетичних установках (СЕУ), а також перспектив регенерації їх експлуатаційних властивостей. З цією метою дизелебудівними фірмами спільно та виробниками мастильних матеріалів розробляються режими змащування, що забезпечують мінімально можливу подачу масла до зон контакту, а також проектується спеціальні установки, що дозволяють відновлювати експлуатаційні властивості масла [1–4].

Актуальність дослідження. Аналіз сучасних тенденцій розвитку малообертових двигунів (МОД) показує, що для забезпечення необхідної довговічності і надійності сучасних двигунів, до циліндрового масла пред'являються особливі вимоги, значно жорсткіші, ніж, які висувалися для МОД попередніх моделей. Ці властивості повинні забезпечувати рівномірність розподілу масла по циліндровій втулці. У довгоходових МОД у зв'язку із зменшенням частоти обертання збільшено час перебування масляної плівки до її оновлення на поверхні втулки, в результаті чого масло повинне витримувати велике термічне навантаження, виконуючи необхідні функції. Однією з найважливіших завдань є забезпечення товщини та міцності мастильної плівки в умовах низьких швидкостей поршня, наприклад, при русі суден на економічних ходах [2–7].

Постановка задачі. Введення в експлуатацію та експлуатація перших двохтактних двопаливних двигунів (дизельний цикл) є однією з найважливіших частин експлуатації суднових машин. Було виявлено цілу гаму нових проблем, які представляли собою можливість підвищеного зносу циліндрових втулок, поршневих кілець і поршнів (Gawdzińska, Chybowski and Przetakiewicz, 2017), що безпосередньо пов'язано з типом використовуваного палива, та вмістом сірки. Сірка нейтралізується за допомогою циліндрових масел з високою лужністю, доступних у продажу з 1950-х років. Проблеми виникають під час заміни палива, що також вимагає зміни базового номера масла циліндрів (CLO BN). Межі вмісту сірки в судновому паливі наведено в Додатку VI MARPOL. Географічно він визначається кордонами діяльності суден, які називаються зоною контролю викидів сірки (SECA). Остаточна зміна ліміту сірки внесена з 1 січня 2020 року, де максимальний вміст сірки в судновому паливі знижено з 3,5 % до 0,5 % [2–7]. Пошкодження або підвищений знос гільзи циліндрів є джерелом недостатнього або надмірного змащування. Правильне дозування циліндрового масла залежить від кількості сірки в паливі, а також від навантаження на двигун (включаючи оптимізацію потужності у вигляді байпаса вихлопних газів і відключення турбокомпресора). Це, в свою чергу, встановлює необхідну кількість лужних присадок.

З огляду на розглянуті вище особливості роботи системи циліндрового мащення

суднових двигунів, для покращення техніко економічних показників, під час роботи на різних сортах важкого палива, з різним вмістом сірки. Пропонується використання автоматизованої система змішування циліндрових масел (АСОМ), для нейтралізації сірки в судовому паливі та поліпшення захисту від низькотемпературної корозії, а також покращення миючих властивостей циліндрових масел.

Результати досліджень. Основні функції масел зводяться до забезпечення надійної роботи вузлів тертя, зменшення тертя і зносу, запобігання зносу у всіх інших його формах; видалення із зони тертя забруднюючих елементів; охолодження шляхом відведення теплоти від поверхонь, які труться; забезпечення щільності в зоні кільцевого ущільнення поршнів; запобігання корозії [3–8].

Проблеми, пов'язані з необхідністю розробки нових циліндрових масел, виникли ще на початку 60-х років минулого століття і були пов'язані з появою на морських судах МОД з наддувом та переведенням їх роботи на економічно вигідні палива підвищеної в'язкості. Відповіддю на умови роботи мастил, а також на необхідність надання їм відповідних властивостей, було створено рядом нафтових компаній спеціальних циліндрових масел до складу яких вводили з'єднання лугу. Вміст визначається в мг гідроксиду калію КОН на 1 грам масла, а величина може досягати 100 мг КОН/г. Високолужні циліндрові масла другого покоління (Mobilgard 570, Shell Alexia 50, Castrol S та інші) з рівнем лужних чисел 60...70 мгКОН/г тривалий час успішно застосовувалися у форсованих суднових МОД в умовах експлуатації на паливах з в'язкістю 120...320 сСт та вмістом сірки до 3...4 %.

Експлуатація суднових дизелів на подібних сортах палив, проводилася аж до початку нинішнього століття, коли флот став поповнюватися суднами з довгоходовими моделями двотактних дизелів, а крім того, посилилися вимоги до екологічних параметрів роботи СЕУ. Висока економічність таких двигунів досягнута завдяки підвищенню максимального тиску згоряння та поліпшенню індикаторного процесу. Всі ці зміни прямо стосуються формування масляної плівки на поверхні змащуваних деталей циліндропоршневої групи (ЦПГ). Так, при різних робочих об'ємах циліндра довгоходового МОД і звичайного в першому випадку необхідно змащувати на 15...25 % велику площу циліндрової втулки. Збільшення максимальних тисків і температур у верхній частині циліндра призводить до підвищення вимог до масла щодо запобігання утворенню відкладень та зносу [1–8]. Основні проблеми застосування циліндрових масел у довгоходових МОД та шляхи їх вирішення показані в (табл. 1).

Таблиця 1. — Можливі проблеми, що виникають під час експлуатації ЦПГ довгоходових МОД

Проблема	Шляхи вирішення	Засоби вирішення
Збільшена площа мащення	Поліпшення розтікання масла	Базове масло та присадки
Збільшення тиску на поршневе кільце	Збільшення міцності та товщини масляної плівки	Базове масло та присадки
Великий час контакту з полум'ям при згорянні	Висока термічна стабільність	Базове масло та присадки
Корозійний знос	Вища швидкість нейтралізації кислот	Присадки
Вуглецеві відкладення	Високий рівень миючих властивостей (детергентності)	Присадки

Для роботи двигунів внутрішнього згоряння суднових енергетичних установок використовуються палива, які традиційно поділяються на важкі та легкі (дизельні). Ця класифікація базується на питомій вазі, а точніше густині палива, яка для дизельних палив при 20 °С лежить в межах 840...860 кг/м³, а для важких до 980 кг/м³. Серед великої кількості

компонентів, що входять до складу палива, найбільш негативний вплив на технічний стан та екологічні параметри роботи дизеля має сірка [3–7], для компенсації впливу якої на деталі ЦПГ в системах циліндрового мащення застосовують масла з вмістом луку до 70...100 мгКОН/г. Суднові МОД і системи обробки палива сучасних суден модифіковані для застосування надважких палив з в'язкістю до 750 сСт при 50 °С щільністю до 1010 кг/м³. Особливості умов роботи циліндрового масла на поверхнях деталей ЦПГ при використанні високов'язких палив визначаються більш тривалим згорянням палива на лінії розширення, високим ступенем термічного впливу на масляну плівку, попаданням на її поверхню щодо великої кількості сажі в результаті неповноти згоряння, потраплянням крапель незгорілого палива на плівку через збільшення дальності розпилення палива великої густини.

Використання важких сортів палив у крейцкопфних дизелях зумовлює посилення вимог до ряду властивостей циліндрового масла. Насамперед, це стосується забезпечення нейтралізуючої здатності, високої термоокислювальної стабільності та антинагарних властивостей. Найпоширенішим і доступнішим для умов роботи морських суден є визначення лужного числа та кількості металевих домішок у маслі, взятій із підпоршневих просторів дизеля. Для цієї мети використовуються суднові лабораторії, такі як Cylinder Scrape-Down Oil Analysis, Unimarine Cylinder Scrape-Down Oil Analysis, Signum onboard test kit of ExxonMobil, Digi TBN Test Kit.

Для перевірки технічного стану циліндрової групи дизеля з аналізів масла, взятих з підпоршневого простору, виконували дослідження на двигуні MAN-B&W 5S70ME-C. Під час проведення досліджень двигун працював на сорті палива марки RMK 700 з наступними характеристиками: густина при 15 °С, кг/м³ — 990; в'язкість, сСт, при 50 °С — 700; температура спалаху (min), °С — 60; вміст сірки, % — 2,5...2,7. Змащування циліндрів дизеля забезпечувалося маслом Mobilgard 570 з показниками: густина при 15 °С, кг/м³ — 820; температура спалаху, °С — 256; в'язкість, сСт, при 40 °С — 229; в'язкість, сСт, при 100 °С — 21; лужне число (total base number — TBN), мг КОН/г — 70. Завданням було визначення оптимальної витрати циліндрового масла з одночасною діагностикою технічного стану ЦПГ. Дослідження щодо визначення оптимальної подачі циліндрового масла виконувались тільки на режимах роботи дизеля, що встановилися. Для кожного циліндра дизеля встановлювалося значення подачі циліндрового масла. Відхилення її величини за циліндрами не перевищувало 5 % від середнього значення. З підпоршневого простору кожного циліндра виконувався відбір проб відпрацьованого масла з подальшим визначенням судової технічної лабораторії значень BN і PQI. Експерименти були виконані протягом десяти циклів з інтервалом відбору проб 24 години. За результатами було визначено оптимальне значення АСС-фактора і надалі (з урахуванням вмісту сірки в паливі) розраховано рекомендовану витрату масла FR.

Основними параметрами, за якими здійснювалася діагностика стану циліндрових втулок, були вміст у відпрацьованому маслі металевих домішок (Fe), ванадію (V), нікелю (Ni), кремнію (Si), що визначаються мг/кг, а також величини BN і PQI. При цьому напрацювання як головного двигуна, так і циліндрових втулок складало 9610 і 10809 годин роботи. В результаті були отримані пропорційні судовим дослідженням значення, що підтвердилося коректність та адекватність запропонованої методики, а також правильність налаштування системи подачі циліндрового масла. За результатами у береговій лабораторії були також побудовані діаграми, що відображають значення основних характеристик відпрацьованого масла (рис. 1).

Лужне число це показник здатності масла нейтралізувати сірчану кислоту на поверхні гільзи циліндра. Корозію необхідно контролювати, і вона є надзвичайно важливою в трибології, необхідної для створення та утримання масляної плівки на поверхні гільзи. При занадто великому вмісті BN і подальшій нейтралізації поверхня гільзи буде відполірована, що призведе до порушення тертя та підвищеного ризику пошкодження поверхні гільзи циліндра та поршневих кілець. Занадто низьке значення BN призведе до недостатньої нейтралізації та значного ризику низькотемпературної корозії.

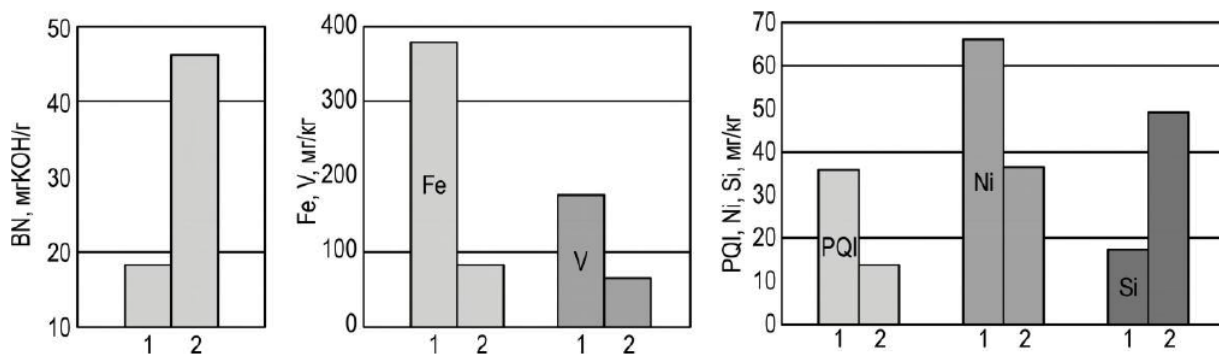


Рисунок 1 — Значення BN (base number), Fe (Iron), V (Vanadium), PQI (Particle Quantity Index), Ni (Nickel), Si (Silicon) у пробах масла, взятого з підпоршневого простору суднового дизеля: 1 — після 9610 годин роботи; 2 — після 10809 годин роботи

Недостатнє змащування завжди призводить до надмірного зносу та пошкодження як поверхні гільзи циліндра, так і поршневих кілець через підвищену корозію та меншу загальну мийну здатність циліндрового масла. Двигуну загрожує погане мащення лише в діапазоні високих навантажень, це пов'язано з активацією РК-дисплея при навантаженнях нижче 25 % MCR. Занадто багато масла в циліндрах призведе до надмірного змащування, що з часом призведе до заплігуювання втулки. Наприклад, на роботу системи EGR двигуна вплине необхідність видалення твердих частинок луку та відсутність рівноваги РН в первинному контурі (охолоджувач повітря) [1-8]. Виходячи з наведеного вище обґрунтування, стає очевидним, що існує потреба у використанні двох циліндрових масел, розрізнених за базовим числом (BN). Точка перемикання базується виключно на досвіді, отриманому протягом досліджень (рис. 2).

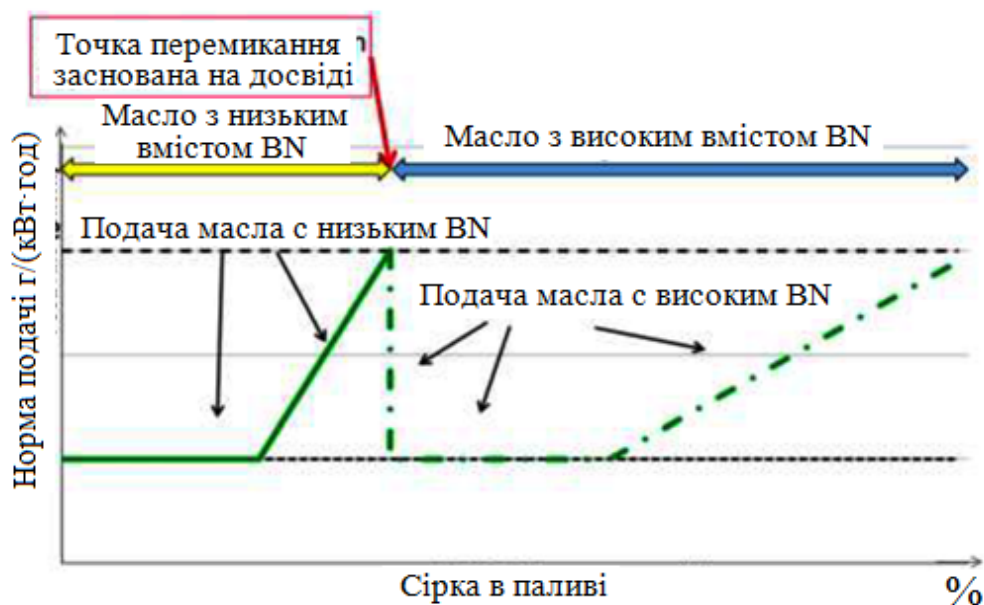


Рисунок 2 — Заміна циліндрових масел

З огляду на розглянуті вище особливості роботи системи циліндрового мащення суднового двигуна MAN-B&W 5S70ME-C та для покращення його техніко економічних показників, під час роботи на різних сортах важкого палива, з різним вмістом сірки, пропонується встановлення автоматизованої система змішування циліндрових масел (АСОМ), для нейтралізації сірки в судновому паливі та поліпшити захист від низькотемпературної корозії, а також покращити мийну здатність циліндрових масел. АСОМ є найновішим рішенням, яке зараз використовується для суднових двигунів (рис. 3).

Система дозволяє змішувати та дозувати циліндрове масло залежно від навантаження двигуна та типу використовуваного палива [1-8]. АСОМ також дозволяє дозувати масло на двигунах, що працюють у спеціальному режимі подвійного палива (SDF), який визначає співвідношення між пілотним і газовим паливом. Це дуже важлива особливість двигуна MEGI, яка використовується, коли двигуни є частиною контролю тиску в баку. АСОМ змішує два різних масла BN в одне з потрібним значенням BN. В даний час BN 100 і BN16 використовуються як базові масла. Це створює дуже «гнучке» середовище, де доступні всі поточні значення BN. АСОМ керується за допомогою ECS двигуна, що дозволяє здійснювати його безперервний моніторинг. Усі налаштування можна виконувати через цифрову панель MOP та/або АСОМ.

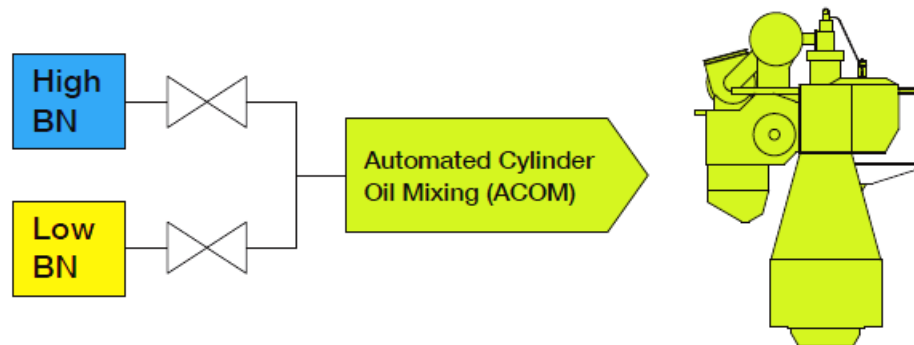


Рисунок 3 — Система автоматизованого змішування циліндрового масла

Установка 76BN дозволить правильно дозувати при мінімальній швидкості подачі 0,6 г/(кВт·год). Коефіцієнт подачі був встановлений згідно розрахунків і експлуатаційної документації двигуна MAN-B&W 5S70ME-C, що працює на HFO з вмістом сірки 2,97 %. Тестування проводилося протягом п'яти днів і проводилося за умов як зазначено в сервісному листі MAN SL2014-587: двигуни завантажені вище контрольної точки РК; коефіцієнт коригування швидкості подачі = 1,00. Швидкість подачі встановлено на: 1,38 г/(кВт·год) для першого циліндра; 1,24 г/(кВт·год) для другого циліндра; 1,00 г/(кВт·год) для третього циліндра; 0,87 г/(кВт·год) для четвертого і 0,64 г/(кВт·год) для п'ятого. Система MAN Diesel і АСОМ (Автоматизована система змішування циліндрових масел) змішує доступні циліндрові мастила до необхідного значення BN. В результаті отриманий BN в циліндровому мастилі, що подається на вкладиші, знаходиться в діапазоні значень BN з двох циліндрових масел, що зберігаються на борту. Основний принцип полягає у змішуванні циліндрового масла (оптимального BN). При певному рівні вмісту сірки двигун повинен працювати на високозначному BN циліндровому мастилі, як завжди. Змішування базується на введенні циліндрового масла в залежності від вмісту сірки в паливі, на якому працює двигун, а ME-ECS потім контролює АСОМ відповідним чином [1-8]. У режимі роботи вміст сірки в паливі залежить від: навантаження двигуна; вміст сірки в паливі. Еквівалент сірки, Se називається вміст сірки в отриманому паливі. АСОМ автоматично обчислює еквівалент сірки Se та BN.

Висновки. У роботі було розглянуто можливості покращення роботи системи циліндрового мащення та оптимізація витрати високолужного циліндрового масла суднового малообертового двигуна, під час роботи на різних сортах важкого палива, з різним вмістом сірки. Було запропоновано використання автоматизованої система змішування циліндрових масел (АСОМ), для нейтралізації сірки в судновому паливі для поліпшення захисту від низькотемпературної корозії, а також покращення миючої здатності циліндрових масел. АСОМ є найновішим рішенням, яке зараз використовується для суднових двигунів, система дозволяє змішувати та дозувати циліндрове масло залежно від навантаження двигуна та типу використовуваного палива.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zablotsky Yu.V., Sagin S.V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines. *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 9(20), DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490, May 2016.
2. Особливості протидії низькотемпературній корозії гільзи циліндрів суднових малообертових двигунів / Погорлецький Д.С. та ін. *Вісник приазовського державного технічного університету*. Серія: Технічні науки Вип. 46. p-ISSN: 2225-6733; e-ISSN: 2519-271X.
3. В.А. Бармін., М.В. Романенка. Шляхи зниження тепло напруженості деталей циліндропоршневої групи двигуна. *Вісник СНУ ім. Володимира Даля*. 2010. № 6/148. С. 1-4.
4. MAN B&W Diesel A/S List of Service Letters No. SL02-398/HRJ. January, 2002.
5. Churchill R. A. Low-heat rejection engines — a concept review / R. A. Churchill, and others. *SAE Technical Paper Series*, 1989. № 890153. Pp. 25–36.
6. MAN B&W Diesel A/S List of Service Letters: «MBD technical paper LOW SULFUR FUEL OPERATION».
7. MAN B&W Diesel A/S List of Service Letters No. SL90-417/HRJ. January, 2003.
8. Alpha Adaptive Cylinder Oil Control (Alpha ACC) MAN Diesel A/S MAN Diesel | PrimeServ Tegllholmsgade 41 2450 Copenhagen SV Denmark

АВАРІЙНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ

Прохоренко І.В., Мазур Т.А., Тимошенко Н.А.

*Національний університет «Київський авіаційний інститут»
(Україна)*

Вступ. Надійність енергопостачання стратегічно важливих об'єктів, зокрема аеропортів, є пріоритетним завданням сучасної енергетики. Недоліком поширених динамічних джерел безперебійного живлення (ДБЖ) є їхня низька автономність, що створює технологічне вікно ризику під час переходу на резервні дизельні агрегати. У даній роботі запропоновано концепцію накопичувача кінетичної енергії на основі асинхронної машини подвійного обертання, яка поєднує в собі властивості генератора та маховика. Конструкція передбачає наявність зовнішнього ротора-маховика (3000 об/хв) та внутрішнього ротора (1500 об/хв), що мають механічну розв'язку. При відключенні мережі енергія вивільняється шляхом уповільнення маховика, проте частота струму (50 Гц) залишається стабільною завдяки підтримці постійної відносної швидкості магнітних полів. Шляхом математичного моделювання та аналізу схеми заміщення було доведено, що система здатна підтримувати живлення протягом 30–45 секунд. Це суттєво перевищує можливості традиційних аналогів і підвищує енергетичну безпеку критичної інфраструктури.

Основна частина. Безпека польотів вимагає стабільного живлення критичних вузлів аеропорту, які класифікуються як споживачі особливої групи I категорії. Згідно зі стандартами ІКАО [1], їхнє енергозабезпечення потужністю 50–1000 кВА базується на двох незалежних вводах та резервних джерелах. Практична реалізація систем гарантованого електропостачання (СБГЕ) передбачає інтеграцію ВРП, ДГУ та ДБЖ відповідно до ДСТУ [2]. Найефективнішими є дизельні динамічні системи (ДДСБЖ), що поєднують дизельний двигун, синхронну машину та кінетичний накопичувач [3].

Сучасні рішення, як-от «двошарові» накопичувачі EuroDiesel [4], використовують внутрішній ротор (1500 об/хв) та зовнішній маховик (3000 об/хв), з'єднані електромагнітною муфтою. У системі NCE від Hites зовнішній ротор пов'язаний із валом генератора механічно. Обидва підходи забезпечують стабілізацію швидкості базового ротора шляхом прецизійного регулювання струмів збудження. У разі мережевих збоїв система переходить у режим «вентиляції», де маховик (енергоємністю до 16 МДж) генерує стабільну напругу [5]. Проте існуючим ДДСБЖ притаманні обмеження щодо складності синхронних машин та дефіциту часу для стабілізації обертів під час перетворення енергії.

Методика дослідження. Для збільшення запасу кінетичної енергії та тривалості роботи ДБЖ без запуску дизельного двигуна пропонується принципово нова конструкція, яка поєднує в собі функції накопичувача кінетичної енергії та генератора [6]. Структурну схему накопичувача електричної енергії представлено на (рис. 1). Накопичувач електричної енергії складається з: зовнішнього ротора 1, внутрішнього ротора 2 та блока живлення 3.

Схема складається з двох частин, позначених літерами (а) та (б). Частина (а) ілюструє електричне коло з такими компонентами, як котушки та роз'єми, позначені номерами 10, 12, 13, 14, 15 та 18. Частина (б) відображає складнішу конструкцію з багатьма взаємопов'язаними компонентами, також пронумерованими від 1 до 18. Схема акцентує увагу на структурі та зв'язках між окремими елементами. Зовнішній ротор (рис.1а,б) виконаний у вигляді двох циліндрів 4 і 5 з феромагнітного матеріалу і має пази на внутрішній та зовнішній поверхнях, у яких розміщені короткозамкнені обмотки 6 і 7, з'єднані між собою з одного боку, а з іншого – короткозамкненими кільцями. Між циліндрами 4 і 5 розташований порожнистий циліндр 8, виготовлений із немагнітного сплаву.

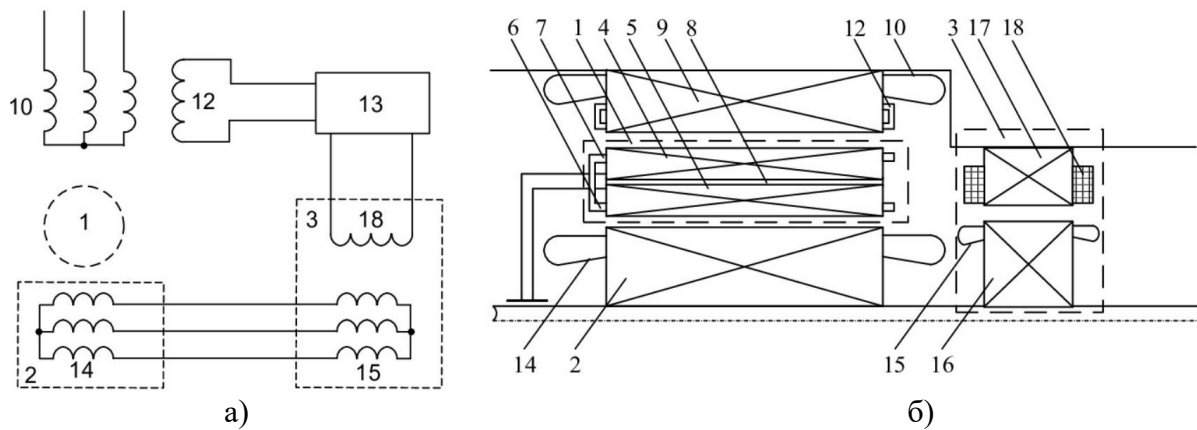


Рисунок 1 — Структурна схема пристрою накопичення електричної енергії

У пазах статора 9 накопичувача, виготовленого з шихтованих листів електротехнічної сталі, розміщена трифазна обмотка 10 із кількістю пар полюсів $p=1$. Для регулювання вихідної напруги статор 9 має магнітний шунт 11, який оточений тороїдальною обмоткою 12, підключеною до блока керування 13. Внутрішній ротор 2 має пази на зовнішній поверхні, у яких розміщена трифазна обмотка 14 із кількістю пар полюсів $p=2$. Обмотка 14 з'єднана з трифазною обмоткою 15 ротора 16 живильної машини 3, яка має кількість пар полюсів $p=2$. Статор 17 живильної машини 3 має полюси з обмоткою збудження 18. Обмотка збудження 18 підключена до джерела постійного струму через блок керування 13. Живильна машина 3 працює як синхронний генератор. Внутрішній ротор 2 і ротор 16 живильної машини 3 об'єднані на одному валу та з'єднані з синхронним двигуном і дизельним двигуном.

Аварійний генераторний агрегат працює наступним чином: за наявності напруги в мережі обмотка статора 10 створює обертовий магнітний потік. У результаті в короткозамкненій обмотці 7 зовнішнього ротора 1 індукуються електрорушійна сила (ЕРС), під дією якої в обмотці протікає струм. Таким чином, на зовнішній ротор починає діяти електромагнітний момент, і він починає обертатися. Водночас синхронний двигун приводить у рух внутрішній ротор 2 і живильну машину 3. Коли на обмотку збудження 18 живильної машини 3 через блок керування 13 подається живлення, а живлення від обмотки статора 10 накопичувача кінетичної енергії відключається, зовнішній ротор 1 обертається зі швидкістю, близькою до 3000 об/хв.

Оскільки внутрішній ротор обертається зі швидкістю 1500 об/хв, а в його обмотці 14 індукуються ЕРС із частотою 50 Гц, магнітне поле, створене трифазною обмоткою 14 внутрішнього ротора, обертається відносно статора 9 зі швидкістю 3000 об/хв. Враховуючи, що в стрижнях 6 внутрішнього ротора індукуються ЕРС, протікають струми, які створюють магнітне поле, що обертається синхронно з полем внутрішнього ротора, тобто з частотою 3000 об/хв відносно статора накопичувача кінетичної енергії. Струми, що протікають через стрижні 7 зовнішнього ротора 1, створюють магнітний потік, що обертається зі швидкістю 3000 об/хв відносно статора 9. Потік, перетинаючи обмотку 10 статора 9, індукує в ній ЕРС із частотою 50 Гц.

У разі збою живлення (аварійний режим) напруга з частотою 50 Гц знімається з обмотки 10 статора 9 накопичувача кінетичної енергії. Зовнішній ротор 1 накопичувача гальмується, тобто накопичена кінетична енергія перетворюється на електричну енергію статора та механічну енергію внутрішнього ротора. Швидкість обертання внутрішнього ротора 2 підтримується постійною шляхом зміни струму в трифазній обмотці 14 внаслідок зміни струму в обмотці збудження 18 живильної машини 3.

Незважаючи на те, що швидкість зовнішнього ротора 1 зменшується, швидкість обертання поля, створеного струмами в стрижнях 7 зовнішнього ротора 1, дорівнює швидкості обертання поля, створеного струмами в стрижнях 6, тобто 3000 об/хв відносно

статора. З цього випливає, що частота напруги у фазній обмотці 10 статора 9 не залежить від частоти обертання зовнішнього ротора 1 накопичувача кінетичної енергії.

Порівняно з існуючими аналогами (Euro-Diesel; Hitec Power Protection), запропонований пристрій накопичення кінетичної енергії (ПНКЕ) має більший зовнішній діаметр і масу завдяки конструкції у вигляді двох феромагнітних циліндрів із короткозамкненими обмотками, що дозволяє накопичувати більше кінетичної енергії. Крім того, відсутність синхронного генератора на загальному валу дозволяє внутрішньому ротору тривалий час підтримувати стабільну швидкість обертання, тим самим значно збільшуючи час роботи аварійного генераторного агрегату без запуску дизельного двигуна.

Для розриву магнітного зв'язку між внутрішнім 5 та зовнішнім 4 циліндрами зовнішнього ротора 1 вони розділені циліндром із немагнітного сплаву 8. Для підтримки стабільної напруги аварійного генераторного агрегату використовується тороїдальна обмотка 12 статора 9. Змінюючи струм в обмотці 12 через блок керування 13, змінюється магнітний опір магнітного шунта 11. Це призводить до зміни основного магнітного потоку статора 9, а отже, і напруги в трифазній обмотці 10. Накопичувач кінетичної енергії являє собою асинхронну машину з обертовим статором і реверсивним ротором. ПНКЕ дозволяє ротору синхронного генератора обертатися протягом 30–45 секунд до запуску дизельного двигуна. З метою збільшення запасу кінетичної енергії та підвищення надійності електропостачання пропонується генераторний агрегат із пристроєм накопичення кінетичної енергії із зовнішнім ротором, що поєднує в собі функції ПНКЕ та синхронного генератора. Оскільки в короткозамкнених обмотках зовнішнього ротора ЕРС індукується в результаті обертання магнітного поля, створеного струмами трифазних обмоток внутрішнього ротора (який діє як статор асинхронної машини), та обертання власне ротора, схема заміщення запропонованого ПНКЕ відрізнятиметься від класичної схеми заміщення асинхронної машини [7]. Для аналізу фізичних процесів було розроблено математичну модель (1), а схему пристрою накопичення кінетичної енергії показано на (рис. 2).

Схема заміщення накопичувача кінетичної енергії з урахуванням від'ємної реактивної складової в рівнянні кола ротора, змодельованої як конденсатор змінної ємності.

Схема електричного кола, що містить такі компоненти, як резистори, котушки індуктивності та конденсатор. На схемі представлені позначені елементи: $R_1, R_2, R'_2, X_m, X'_2$ та шляхи проходження струму I_1, I_0 and I_2 .

Права частина схеми містить вираз комплексного опору, що включає параметри n_{rpsor} і s . На схемі показано напрямки проходження струму та взаємодію між елементами.

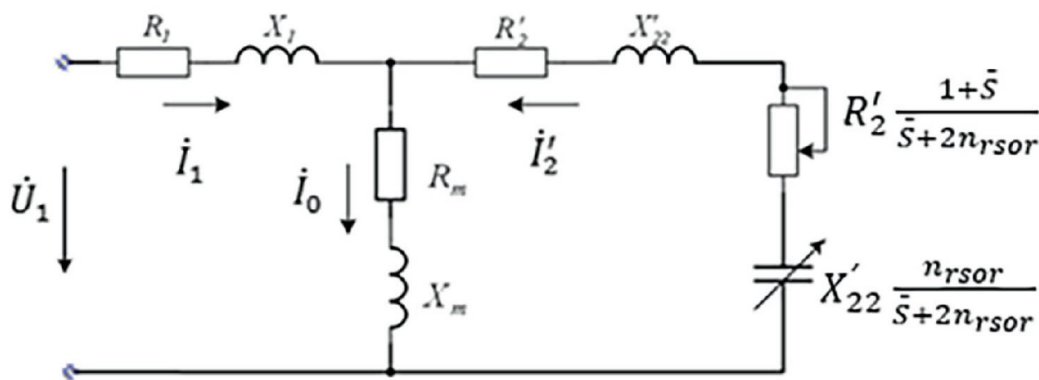


Рисунок 2 — Схема пристрою накопичення кінетичної енергії

Рівняння для пристрою накопичення енергії з урахуванням математичних перетворень має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + I_1 R_1 + j I_1 X_1, \\ \dot{E}'_{22} &= I'_2 R'_2 + j I'_2 R'_2 \frac{1+s}{s+2n_{rpsor}} - j I'_2 X'_{22} \frac{n_{rpsor}}{s+2n_{rpsor}}, \\ I_0 &= I_1 + I_2. \end{aligned} \quad (1)$$

де: $\dot{E}'_{22}, \dot{I}'_2, \dot{R}'_2, \dot{X}'_{22}$ — параметри обмотки зовнішнього ротора у зведений формі, $n_1 = \frac{60f_1}{p} n_1$ — швидкість обертання магнітного поля відносно ротора, $n_{BHn_{ir}}$ — частота обертання внутрішнього ротора, n_{sd} — частота обертання накопичувача, $\frac{n_1 - n_{sd}}{n_1} = \bar{S}$ — основне ковзання, $\frac{n_{ir}}{n_1} = n_{rsor}$ — відносна частота обертання зовнішнього ротора. Аналіз схеми заміщення показує, що кінетична енергія зовнішнього ротора умовно представлена енергією, що виділяється на активному опорі $R'_2 \frac{1+\bar{S}}{\bar{S}+2n_{rsor}}$. Кількість енергії, що виділяється, залежить від співвідношення частот обертання n_1 та n_{ir} .

Висновок. Підсумовуючи результати проведеного дослідження, можна стверджувати, що розробка та впровадження накопичувача кінетичної енергії на базі асинхронної машини подвійного обертання є ефективним розв'язанням проблеми безперебійного електропостачання об'єктів критичної інфраструктури аеропортів. Запропонована конструкція дозволяє подолати ключовий недолік існуючих динамічних ДБЖ — обмежений час автономної роботи, що створює ризики під час переходу на резервне живлення. Завдяки використанню двороторної системи з механічною розв'язкою, де зовнішній маховик обертається зі швидкістю 3000 об/хв, вдалося досягти значного збільшення запасу акумульованої енергії. Важливою технологічною перевагою системи є те, що стабільність вихідної частоти 50 Гц забезпечується не швидкістю обертання маховика, а постійною відносною швидкістю магнітних полів, що робить генерацію напруги незалежною від процесу поступового гальмування зовнішнього ротора.

Результати аналізу розробленої математичної моделі та схеми заміщення підтвердили, що дана установка здатна підтримувати живлення навантаження протягом 30–45 секунд. Цей часовий інтервал суттєво перевищує показники традиційних аналогів і є цілком достатнім для безпечного запуску та виходу на робочий режим дизель-генераторних агрегатів. Додаткова можливість регулювання напруги за допомогою магнітного шунта на статорі підвищує адаптивність системи до змінних навантажень. Таким чином, інтеграція запропонованого пристрою в системи гарантованого електропостачання дозволяє значно підвищити надійність роботи світлосигнального та радіонавігаційного обладнання, що є фундаментальним фактором забезпечення безпеки польотів у сучасних авіаційних комплексах. Перспективи подальшого розвитку теми полягають в оптимізації алгоритмів автоматичного керування блоком збудження для мінімізації втрат у перехідних режимах роботи генераторного агрегату.

ЛІТЕРАТУРА

1. Міжнародна організація цивільної авіації. Додаток 14 до Конвенції про міжнародну цивільну авіацію: Аеродроми. Том I: Проектування та експлуатація аеродромів (9-те вид.). 2022.
2. ДСТУ EN IEC 62040-1:2019. Системи безперебійного живлення (СБЖ). Частина 1. Вимоги щодо безпеки (EN IEC 62040-1:2019, IDT; IEC 62040-1:2017, IDT). 2019.
3. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Харків : Форт, 2017.
4. Euro-Diesel. [Офіційний сайт]. URL: <https://www.euro-diesel.com> (дата звернення: 12.08.2025).
5. Бучинчик О. І. Динамічні джерела безперебійного живлення. *Турбіни та дизелі*. 2007. № 6. С. 49–51.
6. Тихонов В. В., Соколова Н. П. Аварійний генераторний агрегат. Патент України № 94252. 2014.
7. Вольдек А. І. Електричні машини. Ленінград : Енергія, 1978.

ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНИХ ПОРОШКІВ МІДІ ТА БРОНЗИ ЯК ДОБАВОК ДО МОТОРНОГО МАСЛА СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

Прудников І.А., Андреев А.А., Вагін Ф.І.

*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Одним із перспективних шляхів підвищення паливної економічності та зниження кількості токсичних речовин у відхідних газах двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) є забезпечення каталітичної дії на процес згоряння палива. Це дозволяє підвищити повноту згоряння, скоротити фазу підготовки палива до згоряння і фазу дифузійного згоряння, знизити максимальну температуру згоряння, що в сукупності забезпечує зменшення витрати палива та утворення продуктів неповного згоряння і оксидів азоту (NO_x) [1]. Дана технологія вже реалізовувалася шляхом покриття поверхні камери згоряння (КЗ) шаром каталізатора. При підвищенні температури в циліндрі, на поверхні КЗ поршня відбувається виокремлення з шару каталітичного покриття активних частинок, які додатково впливають на руйнування довгих складних вуглеводних ланцюгів, розширюють діапазон займання і забезпечують вигорання паливо-повітряної суміші в зонах із високим і низьким значенням коефіцієнту надлишку повітря, стимулюють перетворення токсичних речовин у нешкідливі, зокрема, на такті розширення [1]. Зі зростанням швидкості хімічних реакцій відбувається інтенсифікація процесу окиснення паливо-повітряної суміші, скорочення фази дифузійного горіння, що створює умови для отримання необхідної ефективної роботи за більш короткий проміжок часу [2, 3]. Матеріали для нанесення каталітичних покриттів можуть бути на основі благородних металів, в основному Pt та Pd (проте внаслідок високої вартості їх використання в даній сфері є недоцільним) та на основі оксидів перехідних металів (Cu, Mn, Co, Fe тощо).

Проблемами даного способу є його складність (необхідність одночасного врахування особливостей матеріалу основи, матеріалів для каталітичних покриттів та методів нанесення покриття), значні витрати на спеціальне обладнання для нанесення покриття та електроенергії для його роботи.

Актуальність досліджень. Вирішення вищевказаних проблем можливе шляхом донесення каталітичних матеріалів у КЗ дизельних двигунів разом із іншими середовищами. Зокрема, зараз активно досліджується технологія додавання ультрадисперсних порошків (УДП) у паливо ДВЗ [4, 5, 6], що, за даними дослідників, дозволяє зменшити витрати палива (згідно [5] на 6–10 %) та кількість шкідливих компонентів відхідних газів. Використання УДП (де розмір частинки менше 100 нм) пов'язане з кращою реакційною здатністю, а також із тим, що наявність у паливі більших за розмірами твердих частинок може призвести до пошкодження прецизійних пар паливних насосів та форсунок.

Ще однією технологією використання УДП у технічних системах є їх застосування у змащувальних середовищах [7, 8], що викликано прагненням отримати ефект беззношенного тертя у парах тертя «сталь-сталь», «сталь-чавун» тощо. Зокрема, додавання УДП м'яких металів (як правило, Cu і бронзи) у моторне масло ДВЗ знижує як величину сили тертя в процесі напрацювання, так і тривалість останнього (що є дуже доцільним при обкатуванні двигунів). Плівка м'якого металу, що утворилася на поверхні, знижує фактичний тиск у зоні контакту і, як наслідок, деформаційну складову тертя, при цьому створюються умови для існування полімолекулярного граничного шару, що, своєю чергою, знижує й адгезійну складову. Позитивний ефект від застосування добавок УДП м'яких металів тим більше, чим більша в'язкість масла. Присутність УДП м'яких металів у моторному маслі позитивно вплине на зносостійкість поршневих кілець і циліндрів двигуна.

Постановка задачі. Була висунута гіпотеза, що, потрапляючи в КЗ дизельного двигуна з моторним маслом, наночастинки міді чи бронзи надають каталітичну дію процесу згоряння палива. Відомо, що мідь є каталізатором горіння, знижує енергію активації реакцій окиснення, що відбуваються в камері згоряння ДВЗ, тим самим збільшує повноту згоряння палива.

Задачею дослідження було аналіз перспектив і технологій додавання ультрадисперсних порошків міді та бронзи як добавок до моторного масла суднових ДВЗ.

Результати досліджень. Каталітичний ефект наночастинок Cu чи бронзи при згорянні палива у КЗ дизельного двигуна проявляється у зниженні енергії активації, й як наслідок, більш якісному проведенні процесу окиснення палива, забезпеченні повноти його згоряння при більш низьких температурах, а отже, зменшенні утворення шкідливих речовин у відхідних газах ДВЗ. Зниження питомої витрати палива і зниження температури в КЗ мають спричинити зменшення максимального тиску в ній і, отже, зниження жорсткості роботи двигуна.

Ультрадисперсні порошки міді у техніці знаходять застосування як каталізatori, провідні добавки в електроніці, антимікробні агенти та компоненти високоміцних композитів. Синтез УДП міді здійснюється фізичними та хімічними методами для отримання частинок розміром менше 100 нм, які мають високу реакційну здатність. Основні методи синтезу УДП міді:

- хімічне відновлення (з розчинів): найпоширеніший метод, що полягає у відновленні міді з її солей міді (наприклад, сульфату міді CuSO_4) у розчинах різними відновниками (гідразин, борогідрид натрію, аскорбінова кислота, глюкоза тощо) у присутності стабілізаторів (полівінілпірролідон PVP, желатин), які запобігають агломерації наночастинок. Перевагою цього методу є можливість контролювати розмір частинок через температуру та pH розчину;

- плазмохімічний синтез (виділення міді на катоді при високих густинах струму): використовує низькотемпературну плазму для випаровування міді або її сполук з подальшою конденсацією в ультрадисперсний стан. Параметри електролізу налаштовують так, щоб мідь не осідала рівним шаром, а утворювала пухкий осад або порошок. Перевагою цього методу є висока чистота продукту;

- випаровування-конденсація: мідь випаровують (лазером, дуговим розрядом або плазмою) в інертному газі, після чого вона швидко охолоджується, утворюючи нанопил;

- електричний вибух провідників: метод, при якому через тонкий мідний дріт пропускають високовольтний струм, що призводить до його вибухового випаровування та конденсації в порошок;

- механохімічний синтез: тривале подрібнення порошку міді для отримання нанорозмірних частинок у високоенергетичних млинах (кульових, планетарних), часто у присутності рідких середовищ або інертній атмосфері для запобігання окисненню.

Суттєвою проблемою при отриманні УДП міді є стабілізація продукту, оскільки наномідь миттєво спалахує на повітрі (пірофорність) або перетворюється на оксиди. Тому її синтезують у вакуумі або атмосфері інертних газів (аргон, азот). Проблемою є і зберігання УДП міді: через високу поверхневу енергію він схильний до окиснення та злипання (агломерації), тому обов'язковим моментом є використання захисного середовища, поверхнево-активних речовин (ПАР) або захисних оболонок (капсулювання полімерами або графітом).

Введення УДП у масло є складною технологічною задачею, оскільки частинки схильні до агломерації (злипання). Під час попередньої підготовки для рівномірного розподілу (стабілізації) УДП у попередньому масляному концентраті використовується ультразвукова обробка (сонікація) або механічне перемішування з високим зсувом для руйнування агломератів. Далі відбувається дозування: введення концентрованої суспензії безпосередньо у масляну систему або масляний бак. Необхідно забезпечувати стабільність суспензії: запобігання випаданню порошку в осад (сидиментаційна стійкість). Щоб

частинки не осідали, додають ПАР-диспергатори, які утворюють стійку колоїдну систему.

Висновки. Використання ультрадисперсних порошкових матеріалів є одним із перспективних напрямів розвитку різноманітних галузей сучасної техніки. Додавка УДП м'яких металів (як правило, Cu і бронзи) у моторне масло дизельного двигуна забезпечує каталітичну дію на процес згоряння в ньому палива. Це підвищує повноту згоряння, скорочує фазу підготовки палива до згоряння і фазу дифузійного згоряння, знижує максимальну температуру згоряння, що в сукупності забезпечує зниження питомої витрати палива та кількості продуктів неповного згоряння палива і оксидів азоту (NOx) [9, 10, 11].

Застосування УДП м'яких металів як добавки до моторного масла приводить до зменшення сили тертя в процесі напруцювання і тривалості останнього, що робить доцільним застосування таких добавок при обкатці двигунів.

Позитивний ефект від застосування добавок УДП м'яких металів тим більше, чим більша в'язкість масла.

ЛІТЕРАТУРА

1. Парсаданов І.В., Хижняк В.О., Горохівський А.С., Артеменко А.К. (2017). Фактори та методи підвищення ефективності каталітичного впливу на згоряння в дизелі. Вісник НТУ «ХП», 5 (1227), 64–67.
2. Фактори та методи підвищення ефективності каталітичного впливу на згоряння в дизелі / Парсаданов І.В. та ін. Вісник НТУ «ХП». 2017. № 5 (1227). С. 64–67. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/00873f1e-c54f-4c49-8820-de0638b310c8>
3. Парсаданов І.В., Сахненко М.Д., Хижняк В.О., Каракуркчі Г.В. (2016). Підвищення екологічності дизелів шляхом внутрішньоциліндрової нейтралізації токсичних речовин відпрацьованих газів. Двигуни внутрішнього згоряння, 2, 63–67.
4. Підвищення екологічності дизелів шляхом внутрішньоциліндрової нейтралізації токсичних речовин відпрацьованих газів / Парсаданов І.В. та ін. Двигуни внутрішнього згоряння. 2016. №2. <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2016.2.12>
5. Парсаданов І.В. Сахненко М.Д., Ведь М.В., Карягін І.М., Хижняк В.О., Андрощук Д.С. (2015). Дослідження дизеля з каталітичним покриттям поверхні камери згоряння. Двигуни внутрішнього згоряння, 2, 69–72. <https://dvs.khpi.edu.ua/article/view/54557>
6. Gürü M., Karakaya U., Altıparmak D., Alıcılar A. (2002). Improvement of Diesel fuel properties by using additives. Energy Conversion and Management, 8 (43), 1021–1025.
7. Improvement of Diesel fuel properties by using additives / M. Gürü et al. Energy Conversion and Management. 2002. Volume 43, Issue 8. P. 1021–1025. URL: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00094-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00094-2).
8. Полункін Є.В., Пилявський В.С., Березницький Я.О., Каменєва Т.М., Левтеров А.М., Авраменко А.М. (2020). Покращення хімотологічних властивостей дизельного палива мікродобавкою вуглецевих сфероїдальних наночастинок. Каталіз та нафтохімія, 29, 59–66. <https://doi.org/10.15407/kataliz2020.29.059>
9. Латиш О.М. Мельник О.А. (2024). Зниження витрат палива та зменшення забруднення довкілля шляхом використання присадок наноматеріалів до пального. Суднові енергетичні установки, 49, 69–80. <https://doi.org/10.31653/smf49.2024.69-80>
10. Дмитренко В.С. Дмитренко В.В., Драганець П.О., Негрич В.В., Хмелівський М.М. (2016). Дослідження витрати палива в двигуні автомобіля при використанні технічної добавки маннол молібден адитів до моторної оливи. Науковий вісник ІФНТУНГ, 1 (40), 101–106.
11. Дослідження витрати палива в двигуні автомобіля при використанні технічної добавки маннол молібден адитів до моторної оливи / Дмитренко В. С. та ін. Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. 2016. № 1. С. 101–105. <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/2648>
12. Солоня О.В., Лобань Ю.М. (2011). Використання наноалмазів в

змащувальних матеріалах з метою підвищення довговічності і надійності різних машин і механізмів. Збірник наукових праць ВНАУ, 6, 108-111. <https://repository.vsau.org/getfile.php/3506.pdf>

13. Прудніков І.А., Андреев А.А. (2023). Підвищення паливної ефективності суднових дизелів шляхом добавок ультрадисперсних порошків м'яких металів у моторне масло. Інновації в суднобудуванні та океанотехніці : XIV Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали, 184–187. <https://eir.nuos.edu.ua/items/1678ecd6-298c-4f8a-beb1-16e1beb29c4b>

14. Прудніков І.А., Андреев А.А. (2023). Вплив добавок ультрадисперсних порошків м'яких металів у моторне масло дизелів на їх ефективність. Суднова енергетика: стан та проблеми : Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, 203–205.

15. Суднова енергетика: стан та проблеми : матеріали XI міжнар. наук.-техн. конф / відп. за вип. Б. М. Личко. Миколаїв : Вид. Торубара В. В., 2023. 240 с. <https://eir.nuos.edu.ua/handle/123456789/7679>

16. Prudnikov I., Andreiev A. (2024). The Feasibility of Using Ultra-Dispersed Soft Metal Powder Additives in Marine Diesel Engine Oil. Сучасний стан та проблеми двигунобудування : VIII Міжнародна науково-технічна конференція : матеріали, 71–72.

17. Сучасний стан та проблеми двигунобудування : матеріали VIII міжнар. наук.-техн. конф. / відп. за вип. О. А. Гогоренко. Миколаїв : Іліон, 2024. 178 с. <https://eir.nuos.edu.ua/collections/befd71e8-f523-41a5-91a2-7fa7cbaa3ddb>

ПРАВОВІ АСПЕКТИ КОНТРОЛЮ ЗА ДОТРИМАННЯМ ВИМОГ КОНВЕНЦІЇ BWM: РИЗИКИ ТА ВИКЛИКИ ДЛЯ СУДНОВЛАСНИКІВ

Пташкограй М.С., Панченко І.М.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Морське право є однією з найдинамічніших галузей права, що регулює широкий спектр відносин — від торговельного мореплавства до екологічної безпеки світового океану. Сучасний етап розвитку цієї галузі характеризується посиленням міжнародних стандартів, спрямованих на мінімізацію негативного техногенного впливу на морське середовище. Одним із ключових викликів сьогодні є контроль за скиданням суднових баластних вод, які можуть містити шкідливі водні та патогенні організми [1]. Згідно з основними положеннями морських конвенцій, судна розглядаються не лише як об'єкти комерційної діяльності, а й як джерела потенційної екологічної небезпеки. У зв'язку з цим, Міжнародна конвенція про контроль суднових баластних вод й осадів та управління ними (далі — BWM) встановила жорсткі вимоги до обладнання суден та процедур управління баластом. Проте на практиці реалізація цих стандартів стикається з серйозними правовими колізіями. Відповідальність судновласників за порушення норм BWM часто стає предметом спорів через неоднозначне трактування міжнародних правил у національних законодавствах різних країн, а також через прогалини в механізмах фіксації порушень. Таким чином, аналіз правової відповідальності у цій сфері є критично важливим для забезпечення балансу між комерційними інтересами судноплавства та захистом екосистеми океану.

Актуальність досліджень. Актуальність теми дослідження зумовлена тим, що згідно з даними Міжнародної морської організації, перенесення інвазивних видів через баластні води суден залишається однією з найбільших загроз для біорізноманіття світового океану. На відміну від розливів нафти, наслідки біологічного забруднення є незворотними, оскільки чужорідні організми здатні до розмноження та витіснення місцевої флори і фауни. Вступ у дію Конвенції BWM у 2017 році став історичним кроком, проте процес її повної імплементації триває до сьогодні.

Особливої актуальності питання набуває через впровадження стандарту D-2, який вимагає від судновласників встановлення складних систем очищення (далі — BWMS) [2]. У правовому полі це створює низку проблем, пов'язаних з обов'язковістю ведення Журналу операцій з баластними водами та необхідністю дотримання суворих процедур відбору проб державним портовим контролем. Недостатня чіткість у визначенні відповідальності за технічні невідповідності систем очищення під час міжнародних рейсів створює значні юридичні та комерційні ризики для судноплавного бізнесу. Таким чином, аналіз прогалин у законодавчому регулюванні цих процесів є критично важливим для забезпечення екологічної безпеки без шкоди для стабільності морської торгівлі.

Постановка задачі. Основна мета даного дослідження є комплексний аналіз правових механізмів відповідальності судновласників за порушення вимог Конвенції BWM та виявлення основних правових прогалин у цій сфері [3].

Результати досліджень. Аналіз практики державного портового контролю (далі — PSC) свідчить про те, що перевірки дотримання вимог Конвенції BWM стають дедалі суворішими. Основною проблемою для судновласників є те, що інспектори PSC зазвичай використовують трирівневий підхід: перевірка документації, візуальний огляд обладнання та, за наявності підозр, відбір проб баласту для детального аналізу.

Перша значна прогалина виявляється у веденні Журналу операцій з баластними водами. Згідно з даними Gard, значна частина зауважень PSC стосується саме помилок у записях. Будь-яка невідповідність між записами в журналі та фактичними операціями (наприклад, скидання баласту без належного запису про роботу системи очищення)

автоматично стає підставою для більш детальної перевірки та можливого арешту судна. Колізія полягає в тому, що технічні збої в автоматизованих системах реєстрації даних BWMS часто не дозволяють екіпажу вчасно виявити помилку, проте юридичну відповідальність за «недостовірні дані» несе саме судновласник.

Друга критична проблема – це невідповідність між схваленим типом обладнання та реальними показниками його роботи в специфічних умовах порту. Стаття Gard наголошує, що системи очищення, які успішно пройшли сертифікацію (Type Approval), можуть не справлятися з очищенням води в портах з високою каламутністю або низькою солоністю. У такому разі судновласник опиняється в правовій пастці: він встановив легальне обладнання, але результати аналізу проб показують порушення стандарту D-2. Це створює серйозну загрозу комерційним інтересам, оскільки затримка судна для повторного аналізу або примусового вивантаження баласту на берегові споруди тягне за собою величезні фінансові втрати.

Також дослідження показало, що відсутність єдиного міжнародного стандарту для відбору проб баласту створює умови для суб'єктивізму з боку інспекторів. Різні методики аналізу в різних країнах призводять до того, що одне і те саме судно може бути визнане чистим в одному порту і порушником в іншому. Це свідчить про необхідність розробки чітких юридичних алгоритмів захисту прав судновласників у разі оскарження результатів перевірок PSC [4].

Окрему увагу в ході дослідження було приділено аналізу ризиків, пов'язаних з імплементацією Конвенції BWM в Україні. Згідно з матеріалами Міністерства інфраструктури України, ключовим елементом системи управління баластними водами є процедура оцінки ризиків (Risk Assessment). Вона необхідна для визначення того, чи може судно отримати звільнення від виконання стандартів у певних специфічних випадках. Проте юридична проблема полягає в тому, що методологія такої оцінки часто є занадто складною для практичного застосування екіпажами суден без спеціальної підтримки.

Дослідження показало, що основними типами ризиків для судноплавства є екологічні, економічні та правові. Екологічний ризик полягає у виживанні шкідливих організмів після очищення, що може призвести до санкцій. Економічний ризик включає високу вартість встановлення BWMS та експлуатаційні витрати на їх утримання. Проте найвагомішим є правовий ризик: невідповідність між національними правилами порту та вимогами Конвенції. В українських реаліях це часто проявляється у відсутності чітких протоколів взаємодії між екологічними інспекторами та адміністрацією портів, що створює підґрунтя для корупційних ризиків та необґрунтованих затримок суден.

Крім того, важливо розмежовувати поняття «випадкового скидання» та «навмисного порушення». У разі аварійної ситуації або необхідності забезпечення безпеки судна, скидання неочищеного баласту дозволяється, проте правова процедура доведення такої необхідності залишається надзвичайно складною та бюрократизованою. Це підтверджує тезу про те, що чинна нормативна база потребує доопрацювання в частині створення чітких чек-листів для капітанів суден [5].

Окремим аспектом правової відповідальності є суворе дотримання вимог до ведення та зберігання суднової документації. Згідно з аналізом технічних стандартів [6], Журнал операцій з баластними водами повинен містити детальні записи про кожну операцію: від забору баласту до його повного скидання або передачі на берегові споруди. Кожен запис має бути засвідчений підписом відповідального офіцера, а кожна завершена сторінка — підписом капітана судна.

Важливою юридичною вимогою є те, що записи в журналі мають зберігатися на борту судна протягом щонайменше двох років, а після цього ще три роки в архівах судноплавної компанії. Будь-яка невідповідність у записах, навіть якщо вона не призвела до реального екологічного забруднення, трактується державним портовим контролем як порушення Конвенції. Це створює додаткові ризики для екіпажу, оскільки застарілі паперові форми журналів часто стають причиною механічних помилок. Сучасні вимоги

також наголошують, що у разі аварійного скидання баласту або його витоку, запис у журналі повинен містити детальні обставини та причини події. Відсутність такого запису або його нечітке формулювання позбавляє судновласника можливості довести правомірність своїх дій у судовому порядку.

Висновок. Таким чином, підбиваючи підсумки, можна стверджувати, що нагляд за суднами стає дедалі жорсткішим. Основною правовою колізією є відповідальність судновласника за некоректні дані Журналу операцій, навіть якщо вони спричинені технічними збоями автоматизованих систем. Це створює ситуацію, де будь-яка документальна похибка стає законною підставою для затримання судна та накладення санкцій.

Крім того, виявлено серйозну проблему невідповідності сертифікованого обладнання BWMS реальним умовам роботи в портах із високою каламутністю води [6]. За відсутності єдиного міжнародного стандарту відбору проб, судновласники опиняються у правовій пастці, залежачи від суб'єктивних методик аналізу в різних юрисдикціях. Це вимагає розробки уніфікованих юридичних алгоритмів для захисту прав перевізників та оскарження результатів перевірок.

Окрему увагу слід приділити складності процедури доведення правомірності скидання баласту в аварійних ситуаціях. Існуюча бюрократизованість процесу та відсутність чітких чек-лістів для капітанів створюють додаткові корупційні та правові ризики, особливо в українських реаліях. Лише чітке розмежування «випадкового скидання» та «навмисного порушення» у поєднанні з бездоганним веденням судової документації може стати надійною гарантією захисту інтересів судновласника у судовому порядку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бабенко Я. Морське право: основні поняття та актуальні проблеми. АО «Кравець І Партнери». 2017. URL: <https://knpartners.com.ua/morske-pravo-osnovni-ponyattya-ta-aktualni-problemi/>
2. International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (BWM). URL: [https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-control-and-management-of-ships'-ballast-water-and-sediments-\(bwm\).aspx](https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-for-the-control-and-management-of-ships'-ballast-water-and-sediments-(bwm).aspx)
3. Ballast Water Management Convention (Вікіпедія). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Ballast_Water_Management_Convention
4. Ballast water management on the PSC agenda. 2025. Gard. URL: <https://gard.no/insights/ballast-water-management-on-the-psc-agenda/>
5. Ризики та детальна інформація про BWM. URL: https://mtu.gov.ua/files/nahaievskia/2018_07_03_BWM/8%20-%20RA%20-%20Risks%20and%20BWM.pdf
6. Ведення та облік Ballast Water Operations. URL: https://navlib.net/%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5-%D0%B8-%D1%83%D1%87%D0%B5%D1%82-ballast-water-operations/#2_____BWRB

ПАРАМЕТРИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ У ЗАДАЧАХ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН

Тарасенко Т. В., Залож В. І.

Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія»
(Україна)

Вступ. Надійна та економічна робота головного суднового двигуна нерозривно пов'язана з регулярним контролем параметрів робочого процесу в кожному циліндрі. Такий контроль дозволяє своєчасно виявляти негативні тенденції у зміні технічного стану основних систем і вузлів, рівномірно розподіляти навантаження між циліндрами та підтримувати оптимальний режим роботи двигуна в цілому [1, 2]. В контексті оцінювання енергоефективності параметричне діагностування набуває додаткового значення: воно є єдиним інструментом, що дозволяє отримати уточнені термодинамічні характеристики робочого процесу безпосередньо в умовах експлуатації – на противагу усередненим паспортним показникам, які не відображають фактичного стану двигуна.

Актуальність досліджень. Контроль технічного стану суднових дизелів традиційно здійснюється шляхом аналізу індикаторних діаграм на ділянках стиснення та згоряння, а також за відхиленнями основних параметрів робочого процесу: максимального тиску згоряння P_{max} , тиску кінця стиснення P_{comp} , середнього індикаторного тиску MIP , індикаторної потужності N_i , тиску кута початку згоряння та інших від еталонних значень [1, 2]. Розвиток портативних діагностичних систем типу *DEPAS*, *IMES*, *Premet*, *LEMAG* уможливив синхронну реєстрацію індикаторних і вібраційних діаграм у функції кута повороту колінчастого вала, що суттєво розширило можливості локалізації першопричин дефектів [3]. Водночас питання використання результатів діагностування для побудови уточнених енергетичних характеристик і розрахунку експлуатаційних показників енергоефективності суден залишається недостатньо розробленим у науковій літературі, зокрема стосовно суден внутрішнього плавання [4].

Постановка задачі. Метою роботи є обґрунтування методики комплексного параметричного діагностування суднових дизелів на базі портативної системи *DEPAS*, що забезпечує одночасне виявлення дефектів циліндрів і обслуговуючих систем та формування уточнених навантажувальних характеристик для коректного розрахунку експлуатаційних показників енергоефективності судна.

Результати досліджень. Для розрахунку показників енергоефективності суден внутрішнього плавання на кожному з виділених етапів рейсу у цій роботі проаналізовано два підходи, запропоновані в літературі, та обґрунтовано власний метод трансформації.

Метод, запропонований дослідницькою групою Белградського університету (*Kalajdžić, Momčilović* та ін.) [5, 6], ґрунтується на адаптації морського індексу *EEDI* до умов дунайського судноплавства та передбачає визначення двох показників — досяжного (*Attained EEDI**) і нормованого (*Required EEDI**) індексів енергоефективності.

Досяжний індекс розраховується за формулою:

$$EEDI^* = \frac{P_{Bref} \cdot SFC \cdot CF}{m_{DWT} \cdot v}, \quad (1)$$

де P_{Bref} — референсне значення потужності головного двигуна, необхідної для досягнення розрахункової швидкості v ; SFC — питома витрата палива; CF — конверсійний коефіцієнт CO_2 для відповідного виду палива; m_{DWT} — дедвейт судна або каравану; v — швидкість судна відносно води.

За своєю структурою вираз (1) майже повністю відповідає формулі морського індексу *EEDI*, проте має суттєву відмінність у застосуванні: референсна потужність P_{Bref} не прив'язується до 75 % *MCR*, як у підході *IMO*, а визначається як потужність, необхідна для досягнення розрахункової швидкості в конкретних навігаційних умовах. Метод застосовується для діапазонів швидкості $v = 10 \dots 22$ км/год, числа Фруда по глибині $Fr_H = 0,40 \dots 0,65$ та дедвейта $m_{DWT} = 100 \dots 3000$ т.

Нормований індекс визначається за емпіричною залежністю:

$$EEDI_{Req}^* = a \cdot m_{DWT}^c, \quad (2)$$

де a і c — емпіричні коефіцієнти, що розраховуються окремо для умов глибокої води та мілководдя, залежать від типу суден і є функціями швидкості v (для глибокої води) або числа Фруда по глибині Fr_H (для умов мілководдя). В оригінальному тексті [5] використано запис « $a \cdot m_{DWT}^c$ »; в даному випадку запис переписаний як « $a \cdot m_{DWT}^c$ » для виключення двозначності. Відповідність судна вимогам енергоефективності встановлюється шляхом порівняння: $EEDI^* \leq EEDI_{Req}^*$.

Метод, розроблений Центром розвитку суднобудівних технологій і транспортних систем (*Development Centre for Ship Technology and Transport Systems*, Дуйсбург) на замовлення Федерального міністерства транспорту Німеччини та CESNI [7], також передбачає визначення досяжного та нормованого індексів енергоефективності.

Досяжний індекс для суден внутрішнього плавання розраховується як:

$$EEDI_{IWT} = \frac{P_D \cdot SFC \cdot CF}{m_{DWT} \cdot v}, \quad (3)$$

де P_D — доставлена потужність головного двигуна, що розраховується окремо для умов глибокої води та мілководдя із застосуванням системи з 33 емпіричних коефіцієнтів; решта позначень відповідає прийнятим у (1).

Принципова відмінність від методу Белграда полягає у способі визначення потужності: P_D розраховується на основі тягових характеристик корпусу та гвинта для базового значення швидкості судна з подальшим перерахунком в умовах течії зі швидкістю v_t . Метод застосовується для суден з осадкою $d = 2,0 \dots 3,2$ м (глибока вода) та $d = 2,0 \dots 2,8$ м (мілководдя), довжиною $L = 40 \dots 135$ м, шириною $B = 5 \dots 17$ м, дедвейтом $m_{DWT} = 250 \dots 6000$ т та швидкістю течії $v_t = 2 \dots 8$ км/год. Метод охоплює чотири типи суден: самохідні суховантажні та контейнерні судна, танкери, штовхачі з несамохідними секціями та пасажирські судна.

Нормований індекс для методу *DST* визначається за залежністю:

$$EEDI_{Req} = \alpha_4 + \beta_2 \cdot \exp\left(\frac{m_{DWT}}{-\gamma_2}\right) + v_1 \cdot \exp\left(\frac{m_{DWT}}{-\delta_1}\right), \quad (4)$$

де α_4 , β_2 , γ_2 , v_1 , δ_1 — емпіричні коефіцієнти, визначені окремо для кожного типу суден та навігаційної зони.

Слід зазначити, що в методі *DST* показники енергоефективності є функцією швидкості течії: $EEDI_{IWT} = f(v_t)$, що є його суттєвою перевагою порівняно з методом Університету Белграда, який течію не враховує. Водночас обмеження за осадкою, прив'язане до діаметра гребного гвинта як $d = 1.5D_P$, звужує практичну застосовність методу.

На відміну від розглянутих вище підходів, метод трансформації, запропонований авторами, ґрунтується на принципово іншій концепції: замість використання усереднених або паспортних характеристик двигуна він передбачає отримання уточнених навантажувальних характеристик ДВЗ безпосередньо в умовах експлуатації на основі параметричного діагностування та їх диференційоване застосування для кожного з виділених експлуатаційних етапів рейсу.

У загальному вигляді витрата палива за рейс є неперервним процесом, що описується інтегралом:

$$EEOI_{voyage} = \frac{CF}{m \cdot d_{total}} \int_0^T N_e(t) \cdot SFC(N_e(t), n(t)) dt, \quad (5)$$

де $N_e(t)$ — миттєва ефективна потужність головного двигуна, як функція часу t ; $SFC(N_e(t), n(t))$ — питома витрата палива як функція потужності та частоти обертання; T — тривалість рейсу; m — маса вантажу; d_{total} — відстань, на яку перевозиться вантаж (транспортна відстань), що може суттєво відрізнятися від фактичного шляху, пройденого самохідним судном з урахуванням маневрів, проводки частини каравану через перекати та павузок.

Оскільки рейс розбивається на скінченну кількість типових експлуатаційних етапів, кожен з яких характеризується статистично усередненими параметрами двигуна, отриманими за результатами параметричного діагностування, інтеграл (5) апроксимується дискретною сумою:

$$EEOI_{voyage} = \frac{CF}{m \cdot d_{total}} \sum_1^k N_{ei} \cdot SFC_i(N_{ei}, n_i) \cdot t_i, \quad (6)$$

де i — індекс експлуатаційного етапу рейсу; N_{ei} — ефективна потужність головного двигуна на i -му етапі; $SFC_i(N_{ei}, n_i)$ — питома витрата палива на i -му етапі, визначена за уточненими характеристиками ДВЗ; t_i — тривалість i -го етапу; k — загальна кількість етапів рейсу; d_{total} — транспортна відстань (визначення наведено вище).

Методика параметричного діагностування судових дизелів передбачає встановлення датчика тиску на індикаторний кран після його попереднього продування. Вібродатчик послідовно розміщується у трьох характерних точках: на торці форсунки, на відсічці паливного насоса високого тиску (ПНВТ) та, за потреби, на кришці циліндра. У кожному положенні датчика синхронно реєструються індикаторна та вібраційна діаграми. Паралельний аналіз обох діаграм дозволяє визначити затримку самозаймання палива та встановити розбіжність між геометричними і фактичними фазами паливоподачі, що є цінною діагностичною інформацією для локалізації першопричини дефекту. Підхід є особливо ефективним при діагностуванні паливної апаратури високого тиску та клапанів газорозподілу.

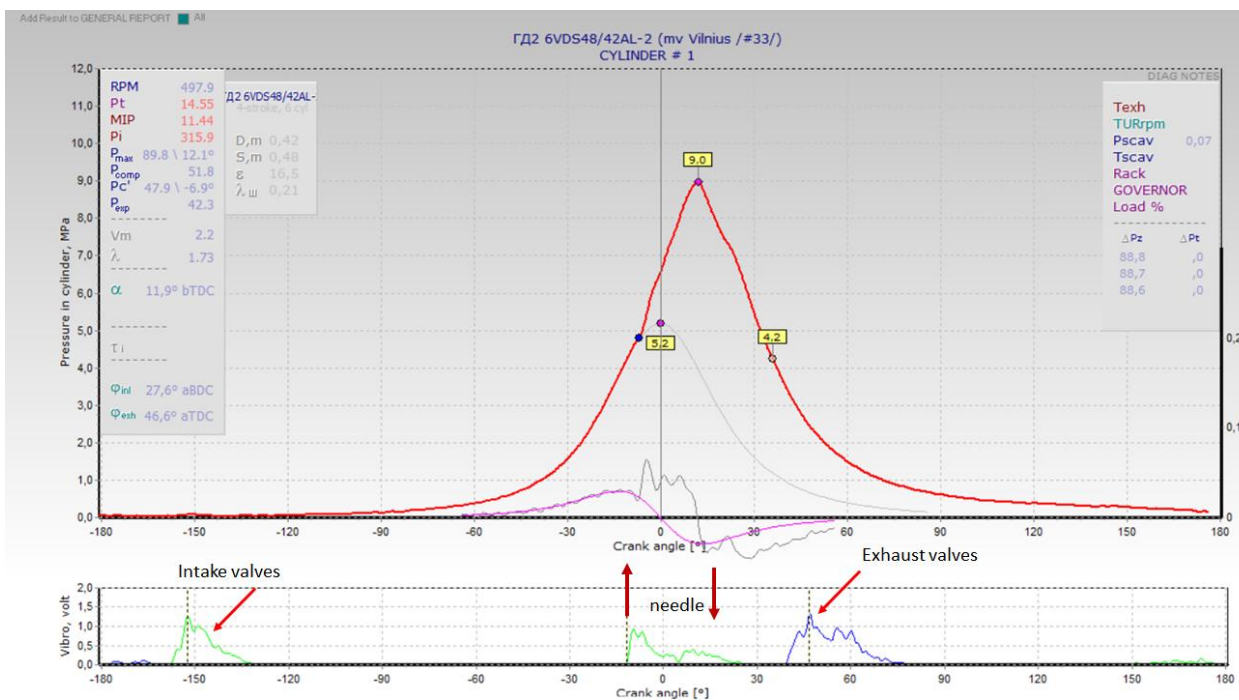


Рисунок 1 — Індикаторна та вібраційна діаграми циліндра №1 головного двигуна SKL NVD48 (6VDS 48/42 AL-2)

Апробацію методики здійснено на головному двигуні SKL типу 6VDS 48/42 AL-2 (NVD48) із застосуванням системи DEPAS D4.0H. На вібродіаграмі циліндра №1 ідентифікуються характерні імпульси: закриття впускних клапанів (*intake valves*), підйом і посадка голки форсунки (*needle up / needle down*), закриття випускних клапанів (*exhaust valves*). У результаті діагностування зафіксовано роздвоєння імпульсу *exhaust valves*, тобто ознаку асинхронної роботи випускних клапанів внаслідок розбалансування траверси їх приводу. Несинхронне закриття клапанів спричиняє нерівномірне зношування сидел і тарілок, погіршення якості газообміну та зниження індикаторної потужності циліндра з відповідним зростанням питомої ефективної витрати палива. Цей дефект не відображався у відхиленні середніх термодинамічних параметрів і міг бути виявлений виключно за

формою вібродіаграми.

На підставі статистично оброблених результатів діагностичних вимірювань будуються уточнені навантажувальні характеристики головного двигуна — залежності питомої ефективної витрати палива SFC від ефективної потужності N_e та частоти обертання колінчастого вала n , що відображають фактичний технічний стан двигуна у конкретних умовах експлуатації. Такі характеристики суттєво відрізняються від паспортних заводських даних, оскільки враховують ступінь зношення та поточний технічний стан двигуна, режими часткового навантаження, характерні для річкового судноплавства, а також вплив якості застосовуваного палива й умов технічного обслуговування. Отримані уточнені характеристики слугують вхідними даними для розрахунку показників енергоефективності.

Висновки. Параметричне діагностування із застосуванням системи *DEPAS* забезпечує комплексне розв'язання двох взаємопов'язаних задач: раннє виявлення дефектів циліндрів і обслуговуючих систем та отримання уточнених термодинамічних характеристик для об'єктивного оцінювання показників енергоефективності. Запропонований методологічний підхід поєднує параметричне діагностування судового ДВЗ із поетапним аналізом рейсу для отримання достовірного експлуатаційного показника енергоефективності суден внутрішнього плавання. На відміну від існуючих методів, які одразу вбудовані в регуляторну рамку *Attained/Required*, метод трансформації забезпечує надійну діагностичну основу, без якої будь-яке нормування залишається методологічно вразливим.

ЛІТЕРАТУРА

1. Varbanets R., Minchev D., Kucherenko Y., Zalozh V., Kyrylash O., Tarasenko T. Methods of real-time parametric diagnostics for marine diesel engines. *Polish Maritime Research*. 2024. Vol. 31, no. 3. P. 71 – 84. <https://doi.org/10.2478/pomr-2024-0037>.
2. Варбанець Р. А., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М., Залож В. І. Параметрична діагностика судових дизельних двигунів в режимі реального часу. Двигуни внутрішнього згоряння. 2024. Вип. 1 (2024). С. 69–75. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2024.1.09>.
3. Залож В. І., Варбанець Р. А., Мінчев Д. С. Аналіз циклової нерівномірності для судових дизельних двигунів в режимі реального часу. Водний транспорт : збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій. 2025. Вип. 1 (42). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.33298/2226-8553.2025.1.42.06>.
4. Суворов П. С., Тарасенко Т. В., Залож В. І. Деякі питання оцінки енергоефективності суден в умовах енергетичного переходу у внутрішньому судноплавстві. Двигуни внутрішнього згоряння. 2023. Вип. 2 (2023). С. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.05>.
5. Kalajdžić M., Vasilev M., Momčilović N. Evaluating an inland waterway cargo vessel's energy efficiency indices. *Polish Maritime Research*. 2022. Vol. 29, no. 2. P. 27 – 34. DOI: <https://doi.org/10.2478/pomr-2022-0014>.
6. Kalajdžić M., Vasilev M., Momčilović N. Inland waterway cargo vessel energy efficiency in operation. *Brodogradnja*. 2023. Vol. 74, no. 3. P. 71–89. DOI: <https://doi.org/10.21278/brod74304>.
7. Guesnet T. *Energy efficiency of inland water ships in the European Union Strategy for the Danube Region* [Conference presentation] 4th Meeting of the Steering Group, EUSDR PA1a, Vienna, Austria., 21 November 2013. URL: https://navigation.danube-region.eu/content/uploads/sites/10/2020/01/2013-11-21_EUSDR_PA1A_SG_CO2_emissions_DST.pdf

ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ СУДНОПЛАВСТВА: СТРАТЕГІЧНІ ПРІОРИТЕТИ ТА ЕКОНОМІЧНІ ВИКЛИКИ

*Ткачук Т.Р., Шилов А.А., Стовба Т.А.
Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Глобальні кліматичні зміни та посилення міжнародної екологічної політики зумовлюють необхідність скорочення викидів парникових газів у всіх секторах економіки, зокрема на морському транспорті. Судноплавство, яке забезпечує понад 80% світової торгівлі, водночас є значним джерелом атмосферних викидів, що актуалізує потребу у впровадженні технологій декарбонізації та підвищення енергоефективності флоту.

Актуальність досліджень. У сучасних умовах глобальних кліматичних змін декарбонізація морського транспорту перетворюється з екологічної ініціативи на стратегічний напрям розвитку світового судноплавства. Посилення міжнародних екологічних вимог Міжнародної морської організації (ІМО), впровадження механізмів EU ETS та FuelEU Maritime, а також реалізація цілей Паризької кліматичної угоди формують нові економічні умови функціонування судноплавних компаній, у яких рівень викидів безпосередньо впливає на експлуатаційні витрати та конкурентоспроможність флоту [1–3].

Водночас процес декарбонізації супроводжується значною технологічною та економічною невизначеністю, пов'язаною з вибором альтернативного пального, необхідністю модернізації флоту, розвитку портової інфраструктури, нерівномірним впливом екологічних вимог на різні країни й учасників ринку та ін. За таких умов особливої актуальності набуває дослідження сучасних екологічно та економічно ефективних шляхів скорочення викидів у судноплаванні, оцінювання їх впливу на діяльність морських компаній і визначення перспективних напрямів підвищення енергоефективності флоту.

Постановка задачі. Метою дослідження є визначення екологічних та економічних наслідків впровадження міжнародних вимог щодо скорочення викидів, а також оцінювання впливу енергоефективності, альтернативного пального та технологічної модернізації флоту на забезпечення конкурентоспроможності судноплавства в умовах глобальної екологічної трансформації.

Результати досліджень. Найважливішими документами, які регламентують викиди в атмосферу, є Додаток 6 МАРПОЛ. Найважливішими сферами моніторингу є контроль викидів оксидів азоту (NO_x), вуглеводнів (НС), чадного газу (СО), вуглекислого газу (СО₂) та сірки. Контролюється вплив на здоров'я та довкілля. За оцінками ІМО, на морський транспорт припадає близько 3 % глобальних викидів СО₂, але без впровадження заходів декарбонізації їх обсяг може зрости до 130% до 2050 року. Океанські судна викидають значні забруднення, які впливають не лише на населення, що проживає на узбережжі та поблизу портів, але й на тих, хто мешкає за сотні миль від моря.

США, які мають найсуворіше законодавство щодо забруднень від морського транспорту, презентувало 16 січня 2015 р. політику щодо штрафів за порушення стандарту стосовно вмісту сірки в пальному та пов'язаних з ним положень для суден. Політика має на меті стримати потенційних порушників, надати повноважень ЕРА (Environmental Protection Agency) накладати справедливі та обґрунтовані штрафи, а також забезпечити швидке вирішення претензій, що виникають внаслідок невідповідності.

Відтермінування ІМО ухвалення рамкової програми Net Zero Framework (NZF) посилює невизначеність щодо темпів переходу галузі на альтернативні види пального, що може вплинути на інвестиційні рішення судовласників та темпи модернізації флоту. Аналітики попереджають, що невизначеність із вибором пального призведе до повернення традиційних двигунів на новобудови суден. За даними Jefferies, замість замовлень на спорудження нових суден з двопаливними установками (LNG, метанол, аміак) судовласники обиратимуть дешевші варіанти — «dual-fuel ready», тобто готові до

переробки, але без встановлення альтернативних систем, що дозволить скоротити інвестиції особливо для суден, побудованих після 2027 року [1].

Відстрочка програми NZF створює паузу у переході галузі на «зелені» технології та гальмує інвестиції в інфраструктуру альтернативного пального. Експерти Columbia University відзначають, що ситуація по-різному позначиться на учасниках ринку:

- великі судноплавні компанії зможуть компенсувати додаткові витрати та продовжити курс на декарбонізацію.
- дрібні оператори ризикують втратити позиції через зростання вартості переходу на нові технології.

У короткостроковій перспективі рішення ІМО може знизити вартість будівництва суден, але в довгостроковій уповільнить екологічну трансформацію морської галузі [4].

Обговорення на сесії МЕРС 76 показали серйозні суперечності між розвиненими країнами та країнами, що розвиваються, стосовно впливу заходів зі скорочення викидів. Навіть відносно «м'які» екологічні вимоги, такі як підвищення енергоефективності суден і збір даних про споживання пального, викликали занепокоєння через можливе зростання витрат морського транспорту [5].

Екологічні заходи, спрямовані на зменшення викидів CO₂ підвищують витрати на морські перевезення вантажів, впливають на торгові потоки та можуть змінити структуру світового ВВП. Хоча оцінки показали, що загальний вплив цих заходів є відносно невеликим порівняно з ринковими коливаннями, проблема полягає в нерівномірності цього впливу між країнами.

Особливо вразливими є найменш розвинені країни та малі острівні держави, економіка яких критично залежить від морського транспорту. Для них навіть незначне підвищення вартості перевезень через екологічні вимоги означає зростання цін на імпорт і зниження конкурентоспроможності. При цьому через нестачу точних даних повною мірою оцінити ці наслідки поки неможливо, що ускладнює прийняття збалансованих рішень.

Дискусії щодо ринкових механізмів, зокрема, запровадження зборів за викиди парникових газів, ще більше загострили проблему. З одного боку, такі інструменти стимулюють скорочення забруднення, але з іншого — створюють додаткове фінансове навантаження, яке непропорційно лягає на країни з меншими економічними можливостями. Це суперечить принципу «спільної, але диференційованої відповідальності», згідно з яким держави мають різні можливості та внесок у проблему кліматичних змін.

Таким чином, ключовим екологічно-економічним викликом є забезпечення балансу між необхідністю скорочення викидів і справедливим розподілом витрат. Концепція кліматичної справедливості підкреслює, що екологічна політика має враховувати не лише ефект зниження забруднення, а й економічні наслідки для найбільш уразливих країн. Саме це визначає складність і тривалість міжнародних переговорів у сфері декарбонізації морського транспорту.

Значне зростання викидів парникових газів стало важливим сигналом глобальних змін у транспортній галузі, зокрема після прийняття Паризької угоди та реалізації Європейського курсу щодо екологічних покращень. У результаті морський транспорт став одним з основних джерел забруднення атмосфери, і наразі активно переходить до моделі декарбонізації. Європейський Союз встановив жорсткі цілі зі скорочення викидів на 55% до 2030 року та досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року, що передбачає впровадження регуляторних механізмів, у т.ч. для судноплавства. Тобто викиди CO₂ перетворюються на прямі економічні витрати для судноплавних компаній [6].

Однією з ключових тенденцій є перехід на альтернативні види пального — метанол, водень, аміак і біопаливо, що поступово витісняють традиційні викопні ресурси. Очікується, що вже до 2030 року частка такого пального може досягти 6–20%, що не є значним результатом, формуючи новий багатомільярдний ринок. Паралельно відбувається технологічна модернізація флоту: будуються судна з двопаливними двигунами, здатними працювати на екологічно чистому пальному, що поступово робить застарілі судна

економічно не вигідними. Великі компанії, такі як Maersk та Hapag-Lloyd, уже інвестують у такі рішення та укладають довгострокові контракти на постачання альтернативного пального. Згідно з останніми даними 20% замовлених новобудов суден матимуть можливість працювати на іншому альтернативному пальному [6].

Водночас активно розвивається інфраструктура: морські порти трансформуються на енергетичні вузли, здатні забезпечувати бункерування новими видами пального та електроенергією.

На міжнародному рівні процеси координує ІМО, яка має на меті досягти нульових викидів до 2050 року, а також підтримує ініціативи створення «зелених судноплавних коридорів» між портами [6]. Усе це супроводжується значними інвестиціями, розвитком інноваційних проєктів і формуванням нового ринку альтернативного пального.

Енергоефективність сьогодні розглядається як один із найбільш правильних та економічно виправданих шляхів декарбонізації судноплавства. На відміну від переходу на альтернативні види пального, що потребує значних інвестицій, розвитку інфраструктури та часу, підвищення енергоефективності дозволяє досягати відчутного скорочення викидів у короткостроковій перспективі. Зменшення споживання пального безпосередньо означає зниження викидів CO₂, що робить цей напрямок ключовим елементом стратегії декарбонізації морського транспорту.

Рішення у сфері енергоефективності охоплюють широкий спектр заходів — від оптимізації гідродинамічних параметрів корпусу судна до впровадження сучасних енергетичних установок і використання допоміжних систем, зокрема вітрової тяги. Специфікою цих заходів є те, що вони можуть застосовуватися як на нових судах, так і на вже існуючому флоті, забезпечуючи поступове, але стабільне зниження викидів без необхідності повної заміни технологічної бази.

Важливою перевагою енергоефективності є її безпосередній економічний ефект. Зменшення витрат пального призводить до зниження експлуатаційних витрат судна, що підвищує загальну рентабельність морських перевезень. У сучасних умовах це набуває особливого значення, оскільки екологічні вимоги поступово трансформуються на фінансові зобов'язання. Зокрема, у межах європейських і міжнародних механізмів, таких як EU ETS, FuelEU Maritime рівень викидів прямо впливає на витрати компаній [7]. Таким чином, підвищення енергоефективності дозволяє не лише зменшити споживання пального, але й скоротити витрати, пов'язані із дотриманням регуляторних вимог.

Крім того, застосування цільових показників щодо зниження інтенсивності викидів у рамках ІМО до 2030 року підсилює необхідність постійного вдосконалення ефективності суден. Тобто енергоефективність перестає бути разовим заходом і перетворюється на безперервний процес, що позитивно впливає на конкурентоспроможність — оскільки рівень енергоефективності безпосередньо впливає на експлуатаційні витрати судна (через споживання пального), відповідність міжнародним вимогам (EEXI, CII), доступ до ринку морських перевезень (через екологічні обмеження в портах і регіонах), а також на фінансові витрати компаній у межах механізмів регулювання викидів, таких як EU ETS. Менш ефективні судна змушені або проходити модернізацію, або обмежувати швидкість, або взагалі виходити з експлуатації, що безпосередньо впливає на їхню прибутковість і конкурентні позиції на ринку.

Висновки. Декарбонізація морського транспорту є одним із ключових напрямів трансформації світового судноплавства, у межах якого екологічні вимоги поступово інтегруються в економічну модель функціонування галузі.

Проведене дослідження показало, що найбільш перспективними напрямками скорочення викидів є підвищення енергоефективності флоту, використання альтернативних видів пального, модернізація суден та розвиток відповідної портової інфраструктури.

Встановлено, що екологічна трансформація судноплавства супроводжується значними фінансовими витратами та нерівномірним економічним впливом на різні країни і судноплавні компанії. Відтак важливого значення набуває формування збалансованої

міжнародної політики, яка поєднуватиме екологічну ефективність, економічну доцільність та принципи кліматичної справедливості.

Доведено, що енергоефективність у сучасних умовах стає не лише інструментом зниження викидів, а й важливим фактором конкурентоспроможності флоту, оскільки безпосередньо впливає на експлуатаційні витрати, відповідність міжнародним стандартам та доступ до глобального ринку морських перевезень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Net Zero Framework IMO. ammoniaenergy.org : веб-сайт. URL: <https://ammoniaenergy.org/articles/imo-net-zero-framework-adoption-postponed> (дата звернення: 20.04.2025).
2. Initial IMO GHG Strategy. imo.org : веб-сайт. URL: https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx?utm_source (дата звернення: 20.04.2026).
3. Decarbonising maritime transport — FuelEU Maritime. European Commission : веб-сайт. URL: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/maritime/decarbonising-maritime-transport-fueleu-maritime_en (дата звернення: 15.04.2025).
4. Tirschwell P. Ocean carrier push for carbon pricing mechanism not without risk. spglobal.com : веб-сайт. URL: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/ocean-carrier-push-for-carbon-pricing-mechanism-not-without-ri> (дата звернення: 18.04.2025).
5. MEPC 76. lloydlist.com : веб-сайт. URL: <https://www.lloydlist.com/LL1137235/Shipping-industry-left-frustrated-by-MEPC-76-> (дата звернення: 19.04.2025).
6. Декарбонізація судноплавства і портів в Україні. epravda.com.ua : веб-сайт. URL: <https://epravda.com.ua/tehnologiji/dekarbonizaciya-sudnoplavstva-ta-portiv-804779/> (дата звернення: 20.04.2025).
7. Енергоефективність у судноплавстві. dnv.com : веб-сайт. URL: <https://www.dnv.com/maritime/decarbonize-shipping/energy-efficiency/> (дата звернення: 20.04.2025).

АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ У ВІДХІДНИХ ГАЗАХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ

Шостак В. П., Єлеонська О. С.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)

Вступ. Наприкінці минулого століття суттєво підвищилась термодинамічна ефективність малообертових двигунів (МОД) і питома витрата палива стала приблизно 170 г/(кВт·год.), а максимальна температура згоряння палива у циліндрі сягнула до 1900 °С. Завдяки цій температурі склалися сприятливі умови для утворення оксидів азоту NO_x , із яких приблизно 95 % оксиду NO , 4 % діоксиду NO_2 і 1 % веселячого газу N_2O . Їх емісія досягла 17 г/(кВт·год.), що, на думку екологів, не прийнятно для транспортних суден, на яких домінують МОД. Завдяки низці заходів по оптимізації згоряння палива емісія знизилась до 14 г/(кВт·год.), а завдяки застосуванню систем каталітичного відновлення азоту – до дозволених на цей час ≈ 4 г/(кВт·год.).

Актуальність досліджень. Забезпечення прийнятної для практики емісії оксидів азоту ускладнило системи впорскування палива в циліндр і газовипуску малообертових двигунів транспортних суден, що не є безкоштовним. У літературі практично відсутнє поглиблене висвітлення механізму окиснення азоту при згорянні нафтових палив у повітряному середовищі. У зв'язку з цим доречним буде аналіз на атомно-молекулярному рівні утворення оксидів азоту та пошук нових, більш досконалих, рішень щодо зменшення емісії цих оксидів.

Постановка задачі. Як відомо, одержання нової речовини внаслідок хімічної реакції обумовлено утворенням спільних електронних пар (ковалентного зв'язку між неспареними електронами зовнішнього енергетичного рівня) між атомами вхідних речовин. Коли атоми об'єднуються у молекули, вони досягають більш стабільної електронної конфігурації. При утворенні ковалентного зв'язку відбувається перекривання електронних орбіталей, знижується загальна енергія системи і тепло виділяється назовні. При цьому важливим є те, скільки енергії витрачається при дисоціації молекул вхідних речовин і за яких умов.

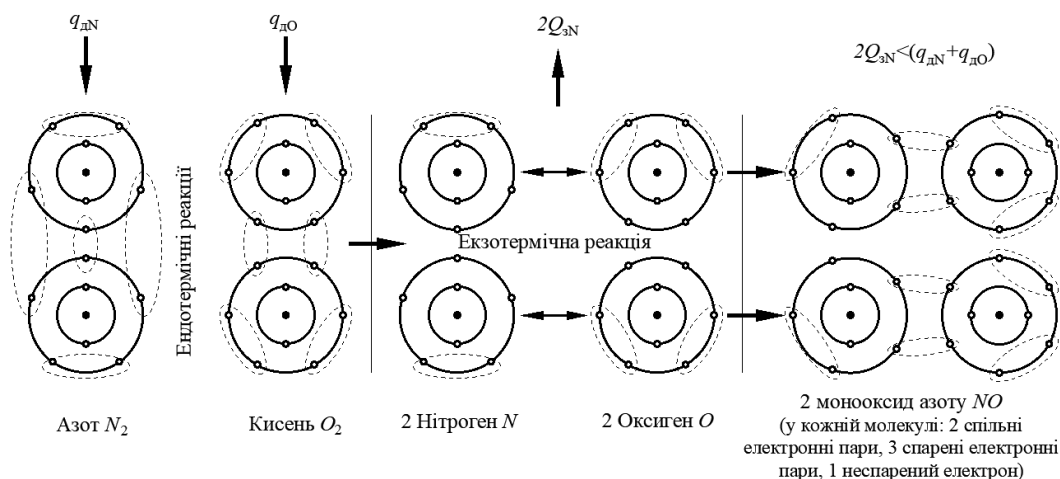


Рисунок 1 — Утворення монооксиду азоту.

Результати дослідження. На рисунку 1 зображені (в умовній формі) молекули і атоми речовин при утворенні монооксиду азоту. Для того, щоб відбулася хімічна реакція окиснення, молекули повинні розпастися, тобто дисоціювати, на атоми під дією зовнішніх чинників, наприклад, при поглинанні теплової енергії при високій температурі. Азот і кисень повітря надходять у циліндр МОД у вигляді двохатомних молекул. У атома азоту на зовнішньому енергетичному рівні знаходяться три неспарені електрони, а у атома кисню –

два. Кисень має дві спарені пари електронів, азот – одну.

Атоми азоту у молекулі міцно зв'язані між собою трьома спільними електронними парами, так що для дисоціації окремо азоту потрібна висока температура — біля 4000 °С. Розрив потрібного зв'язку потребує значної кількості енергії; теплота дисоціації висока і становить $q_{дN} = 945$ кДж/моль. Дисоціація молекули кисню потребує значно нижчої температури (понад 1500 °С), оскільки в молекулі атоми зв'язані двома електронними парами і теплота дисоціації менша, ніж у азоту, а саме $q_{дO} = 498$ кДж/моль.

Як вказано на рисунку, дисоціація — це ендотермічний процес, а реакція окиснення — це екзотермічний процес з виділенням теплоти $Q_{зN} = 631,5$ кДж/моль.

У наслідок взаємодії молекули кисню з молекулою азоту, при їх дисоціації та окисненні атомів азоту, утворилось дві молекули монооксиду азоту і загальний (результуючий) тепловий ефект реакції склав:

$$2Q_{pN} = 2Q_{зN} - (q_{дN} + q_{дO}) = 2 \cdot 631,5 - (945 + 498) = -2 \cdot 90 \text{ кДж/моль.}$$

Отже утворення монооксиду азоту — це ендотермічний процес з поглинанням теплової енергії 90 кДж/моль.

Як зазначається у різних літературних джерелах, зокрема в [1; 2], утворення оксидів NO_x у циліндрі МОД починається при досягненні середньої температури суміші продуктів розпилювання й згоряння 1700 °С, інтенсифікується з ростом її до максимального значення 1900 °С і закінчується при зниженні цієї температури також до 1700 °С. Цей процес триває приблизно 0,03...0,04 с при ході поршня вниз при експлуатаційній (90 % від специфікаційної) потужності МОД. Практика свідчить, що вказаних температур і часу достатньо для дисоціації й окиснення азоту та утворення NO_x у кількості 17 г/(кВт·год.). Як відомо поле температур у циліндрі вкрай нерівномірне, і локальні (точкові) температури суттєво перевищують середні значення. На температуру, теплоту і швидкість дисоціації впливають домішки як у паливі, так і у наддувному повітрі, особливо водяна пара [3]. Висловлювались припущення, що вони виступають, в певній мірі, як каталізatori дисоціації. Саме завдяки цьому і відбувається дисоціація молекул азоту на атоми з подальшою їх взаємодією з атомами кисню і утворенням монооксиду азоту.

Висновки. Поглиблений розгляд процесів згоряння рідкого палива в повітряному середовищі дозволяє зазначити наступне:

- міцний трикратний зв'язок між атомами в молекулі азоту потребує високої температури і значної теплоти дисоціації, тому зменшення шкідливих для флори і фауни оксидів азоту лежить через створення якомога рівномірнішого поля температур у циліндрах малообертових двигунів, які в наслідок помірної частоти обертання колінчастого валу генерують суттєву, більшу, ніж середньообертові двигуни, кількість оксидів азоту;
- значна теплота дисоціації молекул азоту та утворення його оксидів у підсумку обумовлюють ендотермічну реакцію, що поглинає певну кількість корисної теплоти, виділеної при згорянні палива.

Поширення знань про згоряння вуглеводнів у повітряному середовищі сприятиме розробці неординарного паливного обладнання для зниження оксидів азоту і тим самим підвищуватиме екологічність МОД.

ЛІТЕРАТУРА

1. IMO Nitrogen Oxides (NOx). Regulation 13. Available online: [https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-\(nox\)-%E2%80%93-regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-(nox)-%E2%80%93-regulation-13.aspx)
2. Шостак, В. П. Системи суднових дизельних установок. Робочий зошит: навчальний наочний посібник / В. П. Шостак, А. І. Кісарова. Миколаїв: НУК, 2021. 128 с.
3. Виникнення і розвиток горіння та вибуху. Припинення горіння: підручник / Єлагін Г. І. та ін. Черкаси: Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля. НУЦЗ України, 2020. 434 с.

СЕКЦІЯ:
КОМПЕТЕНТНІСНИЙ ПІДХІД В ПІДГОТОВЦІ
ФАХІВЦІВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ

SECTION:
COMPETENCE-BASED APPROACH IN TRAINING
TRANSPORT INDUSTRY PROFESSIONALS

КОМУНІКАТИВНО-МОВНА КОМПЕТЕНТНІСТЬ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ: СУЧАСНІ ОСВІТНІ ОРІЄНТИРИ

Гаценко Л. В.

*Національний транспортний університет
(Україна)*

Вступ. Сучасна підготовка фахівців спеціальності «Морський та внутрішній водний транспорт» відбувається в умовах активної модернізації освітнього простору, посилення компетентнісного підходу та зростання вимог до професійної комунікації. Моряк сьогодні — це не просто оператор складних технічних систем, а й активний учасник професійної взаємодії, який повинен ефективно комунікувати у виробничих, адміністративних та міжособистісних ситуаціях. Особливого значення набуває формування комунікативно-мовної компетентності під час викладання дисципліни «Українська мова за професійним спрямуванням», адже вона забезпечує здатність майбутніх фахівців використовувати державну мову в офіційно-діловому, професійному та навчальному середовищі.

При цьому мовна підготовка моряків повинна враховувати специфіку галузі: роботу з документацією, ведення службового листування, оформлення звітів, складання інструкцій, комунікацію з портовими службами, активну взаємодію в екіпажі. Саме тому формування комунікативно-мовної компетентності стало важливим складником професійної підготовки фахівців водного транспорту.

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вдосконалення мовної підготовки майбутніх фахівців водного транспорту відповідно до сучасних освітніх стандартів і потреб галузі [1]. У професійній діяльності моряків значну роль відіграє чіткість і точність мовлення, уміння оформлювати документи, дотримуватися норм ділового стилю, коректно використовувати галузеву термінологію. Водночас практика викладання української мови за професійним спрямуванням засвідчує наявність певних проблем, а саме: низький рівень інтеграції електронного навчання та цифрових інновацій у викладання мови фахівцям морської галузі (систем управління навчанням, онлайн-платформ, мобільних застосунків, віртуальних симуляцій, інтерактивних мультимедійних ресурсів), недостатню мотивацію студентів технічних спеціальностей до мовної підготовки частково через зміщення акценту на вивчення англійської мови, яка, на їхню думку, є більш важливою, обмежене використання професійно орієнтованих завдань, недостатній зв'язок мовного матеріалу з реальними ситуаціями професійної діяльності, неналежний педагогічний потенціал викладачів для формування фахової термінологічної компетентності державною мовою.

У контексті компетентнісного підходу особливого значення набуває інтеграція мовної підготовки з професійними дисциплінами [5], використання комунікативно-діяльнісних методів навчання, створення навчальних ситуацій, максимально наближених до умов майбутньої професійної діяльності. Це сприяє формуванню у студентів навичок використання української мови у професійній сфері та розвитку їхньої комунікативної культури.

Постановка задачі. Метою нашого дослідження є визначення ефективних освітніх орієнтирів формування комунікативно-мовної компетентності майбутніх фахівців морського та внутрішнього водного транспорту під час викладання української мови за професійним спрямуванням. Для досягнення поставленої мети передбачено розв'язання таких завдань:

- 1) окреслити зміст комунікативно-мовної компетентності майбутніх фахівців водного транспорту;
- 2) визначити специфіку викладання української мови за професійним спрямуванням для студентів саме морських спеціальностей;

- 3) проаналізувати ефективні методи й форми навчання, що сприяють розвитку професійного мовлення;
- 4) наголосити саме на інтеграції електронного навчання та цифрових технологій у процес формування комунікативно-мовної компетентності майбутніх фахівців водного транспорту;
- 5) запропонувати практичні підходи до формування мовної компетентності в умовах компетентнісного навчання;
- 6) окреслити перспективи подальших досліджень щодо зазначеної проблеми.

Результати досліджень. Комунікативно-мовна компетентність майбутніх фахівців водного транспорту розглядається як інтегративна якість особистості, що охоплює знання норм сучасної української літературної мови, уміння використовувати професійну термінологію, навички створення усних і письмових текстів у межах фахової діяльності, а також здатність до ефективної професійної діяльності. Під час викладання української мови за професійним спрямуванням доцільно використовувати професійно орієнтовані завдання, зокрема: складання ділових документів (службових записок, рапортів, службових листів, звітів капітана); редагування фрагментів технічної документації; моделювання комунікативних ситуацій (спілкування в екіпажі, інструктаж перед рейсом, взаємодія з портовими службами); підготовка презентацій про типи суден, правила безпеки, навігаційне обладнання; робота з термінологічними словниками морської галузі.

Важливим освітнім орієнтиром підготовки майбутніх фахівців морського та внутрішнього водного транспорту є інтеграція електронного навчання та цифрових технологій у процес формування комунікативно-мовної компетентності. Використання цифрових технологій дозволяє створити гнучке освітнє середовище, яке сприяє розвитку професійного мовлення, підвищує мотивації студентів і забезпечує практичну спрямованість навчання української мови за професійним спрямуванням.

Електронне навчання відкриває можливості для застосування різноманітних форматів роботи: онлайн-курсів, інтерактивних вправ, електронних тестів, відеоматеріалів, форумів для обговорення професійних тем [4]. Наприклад, студенти можуть виконувати завдання з редагування фахових текстів у спільних документах, створювати електронні презентації про особливості роботи на судні, брати участь у дистанційних дискусіях щодо професійних ситуацій комунікації. Це сприяє розвитку навичок усних і письмових висловлювань українською мовою в умовах, наближених до професійної діяльності.

Доцільним є використання цифрових технологій для розміщення навчальних матеріалів, електронних словників морської термінології, зразків ділових документів, відеоінструкцій. Такі ресурси дозволяють студентам самостійно опрацьовувати матеріал, виконувати практичні завдання та отримувати оперативний зворотний зв'язок. Водночас цифрові технології сприяють розвитку навичок професійної комунікації через створення мультимедійних проєктів, запис аудіоінструктажів, моделювання службових переговорів у форматі відеоконференцій.

Ефективним є використання змішаного навчання, що поєднує аудиторну роботу з онлайн-активністю. Наприклад, під час аудиторного заняття студенти моделюють комунікативні ситуації, а в електронному середовищі виконують завдання з підготовки службових листів, створюють глосарії професійної лексики, проходять інтерактивні вправи з ділового мовлення. Такий підхід забезпечує системність формування комунікативно-мовної компетентності та дозволяє врахувати індивідуальний темп навчання студентів.

На нашу думку, саме інтеграція електронного навчання та цифрових технологій у викладання української мови за професійним спрямуванням сприяє розвитку комунікативно-мовної компетентності майбутніх фахівців водного транспорту, підвищує ефективність освітнього процесу та забезпечує підготовку конкурентоспроможних фахівців, здатних до професійної комунікації в сучасному цифровому середовищі.

Слід відзначити й інтерактивні методи навчання: рольові ігри, ділові імітації, кейс-методи, проєктна діяльність [2]. Наприклад, студентам пропонується змодельовати

ситуацію оформлення службового листа до адміністрації порту або підготувати усний інструктаж для членів екіпажу. Такі завдання сприяють активному розвитку професійного мовлення та стійкому формуванню практичних навичок використання української мови.

Також суттєвим орієнтиром навчального процесу є міждисциплінарна інтеграція. Поєднання мовної підготовки з дисциплінами професійного циклу дозволяє студентам усвідомити практичну значущість мовних знань. Наприклад, під час вивчення теми «Ділові папери як засіб професійної писемної комунікації» доцільно використовувати матеріал з морської практики, а при опрацюванні морської термінології — залучати тексти інструкцій та технічних описів суднового обладнання.

Крім того, формуванню комунікативно-мовної компетентності сприяє використання творчих завдань: створення міні-проектів «Один день на судні», написання інструкцій з безпеки, підготовка діалогів між членами екіпажу, складання професійних глосаріїв. Це підвищує мотивацію студентів і перетворює навчальний процес у більш динамічний та наближений до реальної професійної діяльності [3].

Висновки. Отже, формування комунікативно-мовної компетентності майбутніх фахівців морського та внутрішнього водного транспорту є важливим складником їхньої професійної підготовки. Викладання української мови за професійним спрямуванням повинно базуватися на компетентнісному підході, інтеграції електронного навчання та цифрових технологій у викладання української мови за професійним спрямуванням, професійній орієнтації навчального матеріалу та використанні інтерактивних методів навчання.

Ефективність формування мовної компетентності забезпечується через застосування різноманітних форматів роботи (онлайн-платформ, онлайн-курсів, електронних тестів, відеоматеріалів, форумів), використання платформ дистанційного навчання для розміщення навчальних матеріалів, електронних словників морської термінології, зразків ділових документів, відеоінструкцій, моделювання професійних комунікативних ситуацій, інтеграцію мовної підготовки з фаховими дисциплінами, застосування творчих і практично спрямованих завдань. Такий підхід сприяє розвитку професійного мовлення, формуванню комунікативної культури майбутніх моряків та підвищує їхню готовність до ефективної діяльності у сфері водного транспорту.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні методичних моделей викладання української мови за професійним спрямуванням для майбутніх фахівців водного транспорту з урахуванням цифрових технологій та інтегрованого навчання, зокрема теоретичне обґрунтування та практичне дослідження ефективності інтеграції технологій електронного навчання й цифрових інновацій у процес викладання української мови за професійним спрямуванням майбутнім і практикуючим фахівцям морської галузі, що передбачає аналіз сучасних цифрових інструментів та їхнього педагогічного потенціалу для формування фахової термінологічної компетентності державною мовою.

ЛІТЕРАТУРА

1. Камінська С. В. Формування готовності майбутніх фахівців морського транспорту до професійної іншомовної комунікації у різних формах позанавчальної роботи: дис. ... докт. філософії: 011. Київ, 2025. 272 с.

2. Кулагін Ейрік. Оптимізація підготовки майбутніх фахівців флоту до професійної міжкультурної комунікативної взаємодії засобами кейс-технологій. Матеріали дистанційної студентської Регіональної науково-практичної конференції «Морські дослідження Дунайського регіону: молодь, наука, інновації — 2020» (19 березня 2020 р., Ізмаїл). Ізмаїл : Видавництво Дунайського факультету морського та річкового транспорту Державного університету інфраструктури та технологій, 2020. С. 9–15. <https://files.duit.edu.ua/uploads/dfmrt/research-activities/internet-conferences/youth-science-innovations-2020.pdf>

3. Медведева О. Ю., Строєнко Н. Г., Катрич А. В. Розвиток мовленнєвих

компетентностей майбутніх моряків під час позааудиторної роботи. Водний транспорт. Збірник наукових праць Київської державної академії водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного. 2024. Вип. 1 (39). С. 252–259. <https://vt.duit.in.ua/index.php/home/issue/view/13>

4. Мороз О. Л. Навчальний компонент професійно орієнтованої комунікативної компетенції фахівців морської галузі. Актуальні питання гуманітарних наук: міжвузівський збірник наукових праць молодих вчених Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка. 2021. Вип. 42. Том 3. С. 109–114. <https://rep.ksma.ks.ua/items/e8bd73bb-7e5a-4618-8c02-843c3baa4f66>

5. Чиж С. Г. Іншомовна комунікативна компетентність як складова загальної професійної при підготовці майбутніх фахівців морської галузі. Інноваційна педагогіка. 2023. Вип. 66. С. 192–195. <https://www.innovpedagogy.od.ua/archives/2023/66/40.pdf>

СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЇ СТІЙКОСТІ ОСВІТНЬОГО СЕРЕДОВИЩА В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ІНФРАСТРУКТУРНИХ РИЗИКІВ

Душкін С.С.

*Харківський національний автомобільно-дорожній університет
(Україна)*

Вступ Цифровізація освітнього середовища трансформувала архітектуру навчального процесу, перевівши значну частину взаємодій у площину мережевих сервісів, хмарних платформ та систем управління навчанням [1–5]. У таких умовах освітня система функціонує як складний соціотехнічний об'єкт, стійкість якого визначається не лише педагогічними параметрами, але й характеристиками енергетичної та телекомунікаційної інфраструктури [6].

В умовах енергетичних та інфраструктурних ризиків цифрове освітнє середовище стає вразливим до зовнішніх збурень, що призводять до втрати синхронності процесів, переривання доступу до ресурсів та зниження ефективності освітньої взаємодії. Перебої електропостачання та нестабільність мереж зв'язку порушують традиційну модель централізованого онлайн-навчання, виявляючи критичну залежність освітніх сервісів від безперервності живлення та стабільності каналів передачі даних.

У сучасних дослідженнях цифрова стійкість трактується як здатність інформаційної системи підтримувати функціональність в умовах дестабілізуючих впливів та швидко адаптуватися до змін середовища [7]. Проте більшість робіт зосереджена на корпоративних або кібербезпекових аспектах, тоді як освітні цифрові екосистеми мають специфічні властивості: неоднорідність технічного забезпечення користувачів, варіативність форматів доступу та високу залежність від синхронної взаємодії.

Таким чином, виникає потреба у формуванні системної моделі цифрової стійкості освітнього середовища, яка інтегрує інфраструктурні та алгоритмічні рішення в єдину архітектуру забезпечення безперервності функціонування. Розроблення такої моделі дозволяє перейти від реактивного усунення наслідків збоїв до проектування адаптивної освітньої системи, орієнтованої на роботу в умовах енергетичних та інфраструктурних ризиків.

Актуальність досліджень Порушення стабільності енергопостачання та телекомунікаційної інфраструктури в кризових умовах актуалізують проблему безперервності функціонування цифрових освітніх систем. Освітнє середовище, побудоване на хмарних сервісах, відеоконференціях та централізованих LMS-платформах, критично залежить від доступності електроживлення та мережевого підключення. У випадку тривалих відключень або нестабільності каналів передачі даних традиційні синхронні формати навчання демонструють низьку адаптивність [8].

Дослідження цифрової стійкості інфраструктур свідчать про необхідність переходу від моноканальних моделей доступу до принципу технологічної надлишковості, що передбачає резервування каналів зв'язку, диверсифікацію форматів взаємодії та можливість автономного функціонування окремих компонентів системи [9]. Проте у сфері освіти такі підходи здебільшого реалізуються фрагментарно та не інтегруються в єдину системну модель.

Окремі наукові роботи підкреслюють ефективність асинхронних форматів навчання як інструменту зниження залежності від стабільного з'єднання та жорсткого розкладу взаємодії [10]. Однак питання алгоритмічного поєднання синхронних і асинхронних компонентів, а також їх інфраструктурної підтримки в умовах енергетичних ризиків залишається недостатньо формалізованим.

Таким чином, актуальність дослідження визначається необхідністю розроблення системної моделі цифрової стійкості освітнього середовища, що враховує інфраструктурні

обмеження, принципи резервування та алгоритми адаптивного перемикавання форматів навчання залежно від параметрів середовища функціонування.

Постановка задачі Цифрове освітнє середовище в умовах енергетичних та інфраструктурних ризиків доцільно розглядати як складну адаптивну систему, що складається з взаємопов'язаних підсистем: енергетичної, телекомунікаційної, платформенної та користувацької. Функціональна стійкість такої системи визначається здатністю підтримувати мінімально необхідний рівень освітньої взаємодії за змінних параметрів зовнішнього середовища [11].

Нехай стан цифрового освітнього середовища описується вектором параметрів:

$$S = \{E, B, C, A\},$$

де E — доступність електроживлення;

B — пропускна здатність каналу зв'язку;

C — рівень доступності цифрового контенту;

A — режим організації навчальної взаємодії (синхронний / асинхронний / гібридний).

У кризових умовах параметри E та B мають випадковий або квазіперіодичний характер змін, що зумовлює необхідність динамічного коригування параметра A . Традиційна модель фіксованого синхронного навчання не враховує стохастичну природу інфраструктурних збурень, що призводить до втрати функціональної цілісності системи [12].

Отже, наукова задача полягає у розробленні системної моделі цифрової стійкості освітнього середовища, яка забезпечує алгоритмічне перемикавання форматів навчання залежно від поточного стану інфраструктурних параметрів. Така модель повинна мінімізувати втрати освітньої взаємодії, забезпечувати резервування каналів доступу та підтримувати безперервність функціонування системи в умовах енергетичних обмежень.

Результати досліджень У результаті дослідження запропоновано системну модель цифрової стійкості освітнього середовища, що базується на принципі адаптивного керування режимами навчальної взаємодії залежно від параметрів інфраструктурного стану. Модель передбачає безперервний моніторинг показників енергопостачання (E) та пропускної здатності каналу зв'язку (B) з подальшим алгоритмічним вибором оптимального режиму організації навчання (A).

Критерієм стійкості системи пропонується вважати функцію

$$R = f(E, B, C),$$

де R — рівень функціональної безперервності освітнього процесу;

E — коефіцієнт доступності електроживлення;

B — коефіцієнт стабільності мережевого з'єднання;

C — рівень доступності навчального контенту в офлайн- або низькобітових форматах.

За умови зниження E або B нижче встановленого порогового значення система ініціює перехід від синхронного режиму до асинхронного або гібридного формату. Подібний підхід відповідає принципам адаптивних систем керування та забезпечує мінімізацію втрат функціональності в умовах збурень [13].

Алгоритм адаптивного перемикавання (Рис. 1) може бути представлений у вигляді послідовності кроків:

1 Моніторинг параметрів E та B у реальному часі.

2 Порівняння з граничними значеннями $E_{кр}$, $B_{кр}$.

3 Якщо $E \geq E_{кр}$ і $B \geq B_{кр}$ → синхронний режим.

4 Якщо $E \geq E_{кр}$ і $B < B_{кр}$ → асинхронний режим із використанням легких цифрових платформ.

5 Якщо $E < E_{кр}$ → перехід до офлайн-контенту або локальних серверних рішень.

6 Після стабілізації параметрів – автоматичне відновлення базового режиму.

Запропонована модель реалізує принцип технологічної надлишковості через диверсифікацію каналів доступу та форматів взаємодії. Використання локальних сховищ контенту, низькобітових форматів передачі даних та попереднього кешування матеріалів

дозволяє зменшити залежність системи від стабільного широкосмугового з'єднання [14].

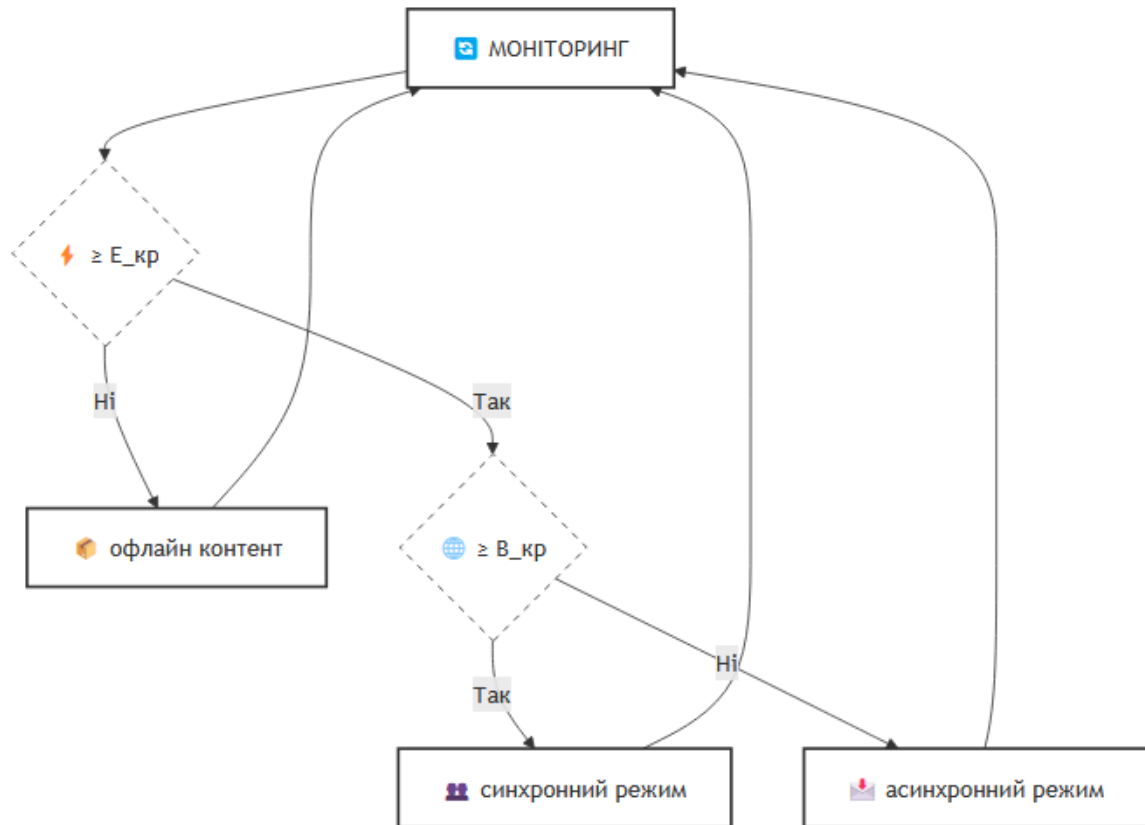


Рисунок 1 — Алгоритм адаптивного перемикання

Джерело: запропоновано автором

Таким чином, цифрова стійкість освітнього середовища досягається шляхом інтеграції інфраструктурних механізмів резервування та алгоритмічного керування режимами взаємодії. Отримані результати узгоджуються з сучасними підходами до побудови адаптивних інформаційних систем, орієнтованих на роботу в умовах невизначеності [15].

Висновки У роботі запропоновано системну модель цифрової стійкості освітнього середовища, що розглядає його як складну адаптивну соціотехнічну систему, функціонування якої визначається станом енергетичної та телекомунікаційної інфраструктури. На відміну від традиційних підходів, орієнтованих на фіксований формат онлайн-взаємодії, запропонована модель враховує стохастичний характер інфраструктурних збурень та передбачає динамічну зміну режимів організації навчального процесу.

Формалізація параметрів системи через вектор стану $\{E, B, C, A\}$ дозволила визначити критерій функціональної безперервності освітнього процесу та обґрунтувати необхідність алгоритмічного перемикання між синхронним, асинхронним та офлайн-режимами залежно від поточних умов. Такий підхід забезпечує зниження критичної залежності освітніх сервісів від стабільного електроживлення та високошвидкісного з'єднання.

Запропонований алгоритм адаптивного керування реалізує принцип технологічної надлишковості через диверсифікацію каналів доступу, використання низькобітових форматів передачі даних та попереднє резервування цифрового контенту. Це дозволяє мінімізувати втрати освітньої взаємодії в умовах енергетичних обмежень та інфраструктурних ризиків.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання

розробленої моделі при проєктуванні та модернізації цифрових освітніх середовищ, орієнтованих на функціонування в умовах нестабільного енергопостачання. Запропонований підхід може бути застосований для підвищення рівня цифрової стійкості освітніх установ та формування адаптивної архітектури безперервного навчання в кризових умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Душкін С. С. Огляд онлайн-ресурсів для моніторингу стану довкілля: практичний інструментарій для студентів-екологів: матеріали XX Міжнародної науково-практичної конференції [«Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»], (м. Харків, 2025 р.). Харків : УКРНДІП, 2025. С. 247–254.
2. Душкін С. С. STEAM-освіта та ЕКО-технології: інноваційний шлях до зеленого майбутнього: матеріали III Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції [«Актуальні аспекти розвитку STEAM-освіти в умовах євроінтеграції»], (м. Кропивницький, 24 квітня 2025 р.). Кропивницький : ДонДУВС, 2025. С. 537–539.
3. Душкін С. С. Використання цифрових технологій при викладанні навчальної дисципліни «Міжнародна рекреаційно-туристична діяльність»: матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції [«Методологія сучасних наукових досліджень»], (м. Харків, 27–28 березня 2025 р.). Харків : ХНПУ імені Г. С. Сковороди, 2025. С. 352–356. DOI: 10.5281/zenodo.15815519.
4. Душкін С. С. Використання цифрових технологій при викладанні навчальної дисципліни «Водопостачання, водовідведення і покращення якості води»: матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції [«Актуальні питання графічної підготовки: теорія, практика та шляхи розвитку»], (м. Харків, 01 березня 2025 р.). Харків : ХНТУСГ / ХНПУ, 2025. С. 468–473.
5. Душкін С. С. Цифрова трансформація управління екобезпекою системи водопостачання міст: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених [«Бекетівські хімічні читання. Теорія та практика кризових ситуацій»], (м. Харків, 2025 р.). Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. С. 118–122.
6. Bozkurt A., Sharma R.C. Emergency remote teaching in a time of global crisis due to CoronaVirus pandemic. *Asian Journal of Distance Education*. 2020. Vol. 15(1). P. i–vi. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3778083>
7. Linkov I., Kott A. Fundamental Concepts of Cyber Resilience: Introduction and Overview. In: *Cyber Resilience of Systems and Networks*. Springer, 2019. P. 1–25. https://doi.org/10.1007/978-3-030-04565-4_1
8. Crawford J., Butler-Henderson K., Rudolph J., et al. COVID-19: 20 countries' higher education intra-period digital pedagogy responses. *Journal of Applied Learning & Teaching*. 2020. Vol. 3(1). P. 1–20. <https://doi.org/10.37074/jalt.2020.3.1.7>
9. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Enhancing the Resilience of the Nation's Electricity System*. Washington, DC: The National Academies Press, 2017. <https://doi.org/10.17226/24836>
10. Hrastinski S. Asynchronous and synchronous e-learning. *Educause Quarterly*. 2008. Vol. 31(4). P. 51–55. <https://doi.org/10.2139/ssrn.1522684>
11. Hollnagel E., Woods D.D., Leveson N. *Resilience Engineering: Concepts and Precepts*. Ashgate, 2006. <https://doi.org/10.4324/9781315605685>
12. Sterbenz J.P.G., Hutchison D., Çetinkaya E.K., et al. Resilience and survivability in communication networks: Strategies, principles, and survey of disciplines. *Computer Networks*. 2010. Vol. 54(8). P. 1245–1265. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.03.005>
13. Åström K.J., Murray R.M. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, 2008. <https://doi.org/10.1515/9781400828739>
14. Cisco Systems. *Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. 2020.

ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕГРАЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ІНЖЕНЕРНОЇ ГРАФІКИ У ФОРМУВАННІ КЛЮЧОВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКІВ

*Знамеровська Н.П., Татарінцева Ю.Г.
Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Сучасний етап розвитку морської галузі характеризується стрімкою цифровізацією та автоматизацією суднових процесів. Формування професійних компетенцій суднових електромеханіків зумовлене не лише технологічним прогресом, а й жорсткими міжнародними вимогами до безпеки мореплавства. В умовах експлуатації інтелектуальних систем управління судном фахівець має володіти здатністю моделювати електротехнічні процеси та застосовувати інноваційні підходи у професійній діяльності.

Актуальність дослідження. Ефективність роботи електромеханіка безпосередньо залежить від його вміння працювати з технічною документацією, що базується на міжнародних стандартах. Інтеграція українських фахівців у світовий флот вимагає досконалого знання графічних позначень за стандартами ІЕС (міжнародні) та ANSI/IEEE (американські). Помилка в інтерпретації схеми може призвести до критичних наслідків, таких як повне знеструмлення судна (blackout) або вихід з ладу дороговартісного обладнання.

Постановка задачі. Мета статті полягає у визначенні методичних засад формування у майбутніх електромеханіків ключових компетентностей через аналіз технічної документації суднових електроенергетичних систем із застосуванням засобів автоматизованого проєктування (CAD).

Результати досліджень.

Структура професійних компетентностей через призму інженерної графіки. Для суднового електромеханіка інженерна графіка є фундаментальною мовою технічного спілкування. Згідно з вимогами Конвенції ПДНВ (STCW), підготовка фахівця має включати наступні рівні компетенцій:

Когнітивно-технічні компетенції: Розуміння архітектури суднових приміщень, читання планів розташування обладнання та просторова візуалізація тривимірних об'єктів за двомірними проєкціями.

Спеціалізовані Hard Skills: Опанування символіки стандартів ІЕС 60617 (міжнародний стандарт для графічних символів у схемах). Це включає розрізнення типів контактів, котушок реле та специфічних морських датчиків.

Діагностичні компетентності: Здатність використовувати принципові та однолінійні схеми для пошуку несправностей (Troubleshooting) [1].

У сучасних системах, таких як судновий енергетичний менеджмент від Wärtsilä або ABB, електромеханік повинен не просто читати статистику, а розуміти динамічну взаємодію між механічною частиною приводу та логікою керування на схемі.

Методи інтеграції графічної підготовки у фахові дисципліни. Ефективне навчання досягається шляхом впровадження практико-орієнтованих завдань:

1. Графічний аналіз та трасування: ЗВО виконують завдання з відстеження шляху струму від головного розподільчого щита (ГРЩ) до кінцевого споживача на реальних суднових креслениках.

2. Метод «свідомої помилки»: Викладач вносить дефекти у схему (наприклад, неправильне підключення теплового реле), а здобувач має виявити їх за допомогою графічного аналізу.

3. Ескізування з натури: Формування навички швидкої розробки робочого кресленика деталі (наприклад, вала двигуна) для замовлення її виготовлення в береговому цеху.

4. Деталювання: Робота зі складальними креслениками електродвигунів, що дозволяє зрозуміти будову вальцевих вузлів та щіткових засобів [2].

Цифрова трансформація графічної підготовки (CAD-системи). В умовах Industry 4.0 традиційне креслення еволюціонує в роботу з цифровими інструментами. Формування навичок у AutoCAD, EPLAN або SolidWorks стає нагальною потребою [3].

Створення специфікацій (Spare Parts): Вміння створювати цифрові переліки запасних частин на основі графічних документів забезпечує структурований підхід до логістики на судні [4].

Робота з електронною документацією: Сучасний електромеханік працює з інтерактивними PDF-мануалами. Навички пошуку за тегами та маркуванням у цифровому середовищі роблять фахівця конкурентоспроможним.

Використання Digital Twins (цифрових двійників) судна вимагає від електромеханіка вміння вносити зміни в електронні версії креслеників після модернізації обладнання, що є прямою вимогою міжнародних морських стандартів [5].

Навчальний план: акцент на міжнародні стандарти. Навчальний план має включати:

Уніфікацію символів для обладнання різних країн-виробників (Японія, Німеччина, Корея).

Вивчення літерних кодів за ІЕС 81346 (наприклад, К — реле, Q — силова апаратура, М — двигуни).

Порівняльний аналіз стандартів (наприклад, відмінність між ДСТУ та ІЕС у відображенні катушок контактів).

Висновки. Інженерна графіка трансформувалася з допоміжної дисципліни у фундаментальний складник професійної ідентичності суднового електромеханіка. Вона забезпечує формування системного мислення, точності та відповідальності за безпеку мореплавства. Поєднання класичної бази з сучасними CAD-системами та методами Troubleshooting дозволяє готувати фахівців, здатних ефективно експлуатувати складне автоматизоване обладнання сучасного флоту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 р. : Конвенція Міжнар. мор. орг. від 07.07.1978 р. : станом на 25 червня 2010 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_053#Text (дата звернення: 03.05.2026).

2. Черкасов О.В. Підвищення професійної компетентності суднових електромеханіків у відповідності з вимогами Манільських поправок 2010р./ Черкасов О.В.//Наука і освіта:наук.-практжурнал.-2012, -№5,С.129-133

3. Zori F. S. H. Computer engineering and artificial intelligence textbook 1. Nobel TM, 2022. URL: <https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=rVWcEAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=artificial+intelligence+i+for+engineering+and+computer+graphics> (date of access: 28.04.2026).

4. AutoCAD. Website. URL: <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview> (date of access: 03.05.2026).

5. Koziar M., Hubal H., Burchak I. та ін. The impact of CAD software on the teaching of engineering graphics: a systematic review. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2025. Vol. 13, No. 1. С. 17–39.

ORGANIZATIONAL AND MANAGEMENT COMPETENCE OF AVIATION SPECIALISTS AS A PROFESSIONALLY IMPORTANT QUALITY

Kalashnyk-Rybalko M.A.
Ukrainian State Flight Academy
(Ukraine)

Introduction. In the modern aviation industry, the issue of flight safety is directly related to the level of training of pilots and air traffic controllers. One of the key factors in such training is the formation of organizational and management competence, which ensures effective decision-making, coordination of actions and resource management in conditions of increased responsibility [1, 2]. The increasing complexity of aviation systems, the intensity of air traffic and the influence of the human factor actualizes the need to create clear approaches to assessing this competence. At the same time, existing methods do not always provide a comprehensive approach to its diagnosis.

Relevance of research. Organizational and management competence is an integral characteristic of the professional activity of aviation specialists. It combines cognitive, behavioral and personal components and determines the ability to act effectively in standard and emergency situations. Despite the presence of international standards (ICAO, EASA) [3, 4, 5], the problem of objective assessment of the levels of formation of this competence remains insufficiently developed. This especially concerns the coordination of assessment criteria with the real conditions of professional activity.

Setting task. The purpose of the study is to substantiate a system of criteria and indicators for assessing the organizational and management competence of pilots and controllers, as well as to identify approaches to increasing their professional readiness.

Research results. Organizational and managerial competence is considered as the ability of a specialist to effectively organize, coordinate and control professional activities in difficult conditions. It is based on professionally important qualities, including [4, 5]: stress resistance and self-regulation; situational awareness; ability to make quick decisions; communication and leadership skills. For controllers, multitasking and air traffic management skills are additionally important, and for pilots is effective crew management.

The organizational and management competence of pilots and controllers is a professionally important quality that ensures the effective functioning of the aviation enterprise system and flight safety. The selection of criteria and indicators for its diagnosis is based on an analysis of the specifics of the organizational and managerial functions of these professional groups. The professional requirements for organizational and managerial competence for pilots and ATC controllers are different (Table 1) [1].

Table 1 — Professional requirements for organizational and management competence for pilots and controllers

Professional group	Main functions	Professional requirements for organizational and management competence
Pilots	Aircraft control, in-flight decision-making, crew coordination, responding to dangerous situations	High level of cognitive and regulatory skills; effective team management; stress resistance
Air traffic controllers	Air traffic control and coordination, route planning, airspace conflict management	Analytical skills; quick decision-making; workload management; communication competence

Thus, the criteria and indicators of organizational and management competence should

reflect the peculiarities of the professional functions of each group and provide the possibility of assessing their effectiveness in real or simulated conditions.

To diagnose the level of development of organizational and management competence of pilots and dispatchers, we have proposed a comprehensive approach based on six criteria: value-motivational (orientation on the values of safety and teamwork), cognitive (knowledge and understanding of processes), organizational (planning and coordination), managerial (practical application of power and influence), individual-psychophysiological (psychological stability) and subjective (autonomy and initiative).

The value-motivational criterion characterizes a set of professional orientations, beliefs and internal incentives that form the readiness to perform organizational and management functions at a responsible level. For pilots and controllers, it manifests itself in the awareness of the priority of flight safety, the focus on compliance with established standards, the desire for continuous professional development, as well as in the internal readiness to act effectively in conditions of uncertainty and increased psycho-emotional stress.

The cognitive criterion is associated with the ability to deeply analyze situations, their objective assessment, predict possible changes and make optimal management decisions taking into account risks. For pilots, it includes an operational assessment of the flight situation, anticipation of the development of events, rapid response to emergency situations and integration of heterogeneous information (technical, navigational) in the decision-making process. For controllers, this criterion is manifested in the ability to analyze air traffic, plan routes, and timely identify conflict situations in the airspace and make management decisions in conditions of multitasking and stress.

The organizational criterion reflects the ability to rationally build work processes, effectively allocate resources and ensure coordinated interaction between all participants in the activity. In the activities of pilots, this is manifested in a clear distribution of functions between crew members and flight planning, taking into account possible limitations and risks. For controllers, it consists in the ability to coordinate work between different sectors and shifts, as well as to optimize the load on personnel and related services.

The management criterion characterizes the ability to implement basic management functions, in particular planning, organization, control and adjustment of activities. In the professional activities of pilots, it is manifested in the ability to manage the crew, especially in critical situations, as well as to promptly make changes to the flight plan. For controllers, this criterion reflects the effectiveness of managing a given air traffic sector, monitoring compliance with procedures, and responding promptly to possible crew errors.

The individual psychophysiological criterion assesses a set of properties that ensure the reliability of operations under conditions of significant load and stress. Its main manifestations in pilots and controllers include stress resistance, the ability to self-regulate, cognitive flexibility, a high level of concentration, and emotional balance.

The subjective criterion reflects the level of personal maturity, responsibility, and the ability to make independent decisions. For pilots and controllers, it manifests itself in the awareness of the consequences of one's own actions for flight safety, the ability to self-control and self-support, initiative in improving professional activities, and active participation in collective decision-making.

Each of the criteria has a system of indicators that can be assessed using tests, simulations, observation, and expert analysis.

To summarize the results of assessing the readiness of aviation specialists for professional activity, four levels are proposed:

- low — lack of a systematic approach to organizing activities, high risk of errors;
- basic — fulfillment of minimum requirements without flexibility and forecasting;
- sufficient — stable performance of tasks with partial forecasting of situations;
- high — ability to effectively manage in difficult conditions and make non-standard decisions.

This ranking allows objectively assessing the level of training and determining the directions of further development.

It is advisable to carry out the assessment of organizational and management competence using combined approaches: testing of theoretical knowledge; analysis of professional situations (case-study); simulation training; psychological methods; expert assessment. Simulation methods that are as close as possible to real working conditions demonstrate particular effectiveness..

Depending on the level of training of specialists, various measures are proposed to develop the organizational and managerial competence of aviation specialists. For example, for the initial level, these may be basic training and the development of stress resistance. For the middle level, it is important to practice non-standard situations, and for the high level is the development of leadership and strategic skills. In addition, the implementation of systematic assessment and corrective training is important.

Conclusion. As a result of the study, a system of criteria and indicators for assessing the organizational and management competence of aviation specialists was substantiated. The proposed approach allows for a comprehensive assessment of the level of their professional readiness and contributes to improving flight safety. Further research should be directed towards improving assessment methods and adapting them to international standards.

REFERENCES

1. Калашник-Рибалко М.А., Калашник Г.А. Формування організаторської компетентності як професійно-важливої якості пілотів і диспетчерів. *Наукові інновації та передові технології*. 2025. №7 (47). С. 1689-1701. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-7\(47\)-1689-1701](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-7(47)-1689-1701)
2. Калашник-Рибалко М.А., Калашник Г.А. Особливості професійно-важливих якостей майбутніх авіаційних диспетчерів та методи їх оцінки. *Вісник науки та освіти*. 2025. №6 (36). С. 1116-1127. [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-6\(36\)-1116-1127](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-6(36)-1116-1127)
3. Çinar E., & Tuncal A. A comprehensive analysis of competency and training perspectives among air traffic controllers. *Aviation*. 2024. 28(2) 54–63. <https://doi.org/10.3846/aviation.2024.21501>
4. ICAO. Doc. 10056 – Competency-Based Training and Assessment (CBTA) Manual. ICAO, 2023. International Civil Aviation Organization. URL: www.icao.int (accessed 13.04.2026).
5. EASA (2022). Aircrew Competency and Training Guidelines (Part-FCL & Part-ORA). EASA. *European Union Aviation Safety Agency*. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/regulations/aircrew> (accessed 13.04.2026)

THE USE OF COMPETENCY-BASED APPROACH WHILE TEACHING MARITIME ENGLISH TO FUTURE SHIP ENGINEERS

¹Kononova O., ²Diahyleva O., ²Yurzhenko A., ³Sarsenbayev B.S.

¹Maritime Applied College of Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)

²Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)

³Sh. Yessenov Caspian University of Technology and Engineering NP JSC
(the Republic of Kazakhstan)

Introduction. The competency-based approach to training future ship engineers is considered as a holistic and comprehensive educational strategy aimed at forming not only a system of knowledge, skills and abilities, but also the ability to effectively apply them in real professional situations. This approach involves the integration of theoretical training with practical activities, the development of professional thinking, responsibility, autonomy and readiness to make decisions in difficult production conditions.

An important feature of the competency-based approach is its normative certainty, since the key professional competencies of future ship mechanics are clearly regulated by international standards, in particular the requirements of the STCW Convention (STCW). Within the framework of this document, a list of mandatory competencies is defined, which cover the technical, managerial, communicative and safety components of professional activity, which provides a unified approach to the training of maritime specialists at the international level.

At the same time, modern digitalization processes are significantly transforming the content of professional training. The rapid development of digital technologies, automated ship machinery control systems, information and communication tools and artificial intelligence technologies leads to the emergence of new requirements for the professional competence of future ship mechanics. In this regard, there is an objective need to constantly update the content of education, expand the range of competencies and form the readiness of education seekers for continuous professional development.

The competency-based approach in modern conditions is dynamic in nature and requires adaptation to new technological challenges. This involves the integration of digital tools into the educational process, the development of digital literacy, critical thinking and the ability to quickly master new technologies, which is a necessary condition for ensuring the competitiveness of future ship mechanics in the global labour market.

In scientific research on seafarer training, considerable attention is paid to the competency-based approach as the basis of modern maritime education. In particular, the works of L. Martes substantiate the need to introduce competency-based training in sea and river navigation. The scientist proves that such an approach ensures the formation of a single set of key competencies in future seafarers in accordance with international standards, and also contributes to improving shipping safety and mobility of specialists in the labour market [5].

A significant contribution to the development of the competency-based approach in maritime education was also made by April Gunawan Malau and his colleagues. In their research, they emphasize that competency-based educational programs should be aimed at the formation of not only knowledge, but also practical skills, the ability to make decisions and act in real professional situations. The author pays special attention to the integration of digital competencies necessary for work in the conditions of a modern technological maritime industry [6].

In addition, Fitri Suprapti's research has proven that competency-based training significantly affects the level of readiness of cadets for professional activity. In particular, a positive relationship has been established between the implementation of such an approach and the development of both technical and "soft" skills of future seafarers, which are critically important for effective work in the maritime industry [7].

Thus, the analysis of scientific works shows that the competency-based approach in the training of seafarers is considered by researchers as a key tool for the modernization of maritime education, which ensures compliance of training with international standards, orientation to practical activity and readiness of specialists to work in conditions of rapid technological development.

The competency-based approach ensures that the educational process is focused on practical results, i.e., the formation of the ability of students to act effectively in real professional situations. This is especially important for the training of future ship engineers, as it allows combining theoretical knowledge with practical skills in using ship systems and communicating in English.

Another advantage is compliance with international standards, in particular the requirements of the STCW Convention, which ensures the uniformity of training and the competitiveness of specialists in the global labour market. The competency-based approach also contributes to the development of key professional qualities: responsibility, autonomy, critical thinking, and the ability to make decisions in non-standard situations.

In addition, it stimulates the active participation of students in the educational process, increases motivation for learning, develops self-assessment skills, and continuous professional improvement. In the context of digitalization, this approach is easily integrated with modern learning technologies, including ICT and elements of artificial intelligence.

However, the implementation of the competency approach is associated with certain difficulties. Thus, it requires significant changes in teaching methods, teacher training and updating educational and methodological support, which is not always possible in conditions of limited resources.

The difficulty also arises in objectively measuring the level of formation of competencies, especially such components as critical thinking, reflection or professional readiness. This requires the development of clear criteria and assessment indicators, which is a rather laborious process.

Another challenge is the need for a high level of self-organization and motivation on the part of education seekers, after a competency approach their active participation in learning is ensured. In addition, the rapid development of technologies in the maritime industry determines the constant need to update the content of competencies, which makes it difficult to maintain their relevance. Therefore, despite some difficulties, the competency-based approach remains an effective basis for modern professional training, but it requires systematic implementation and adaptation to the conditions of the digital educational environment.

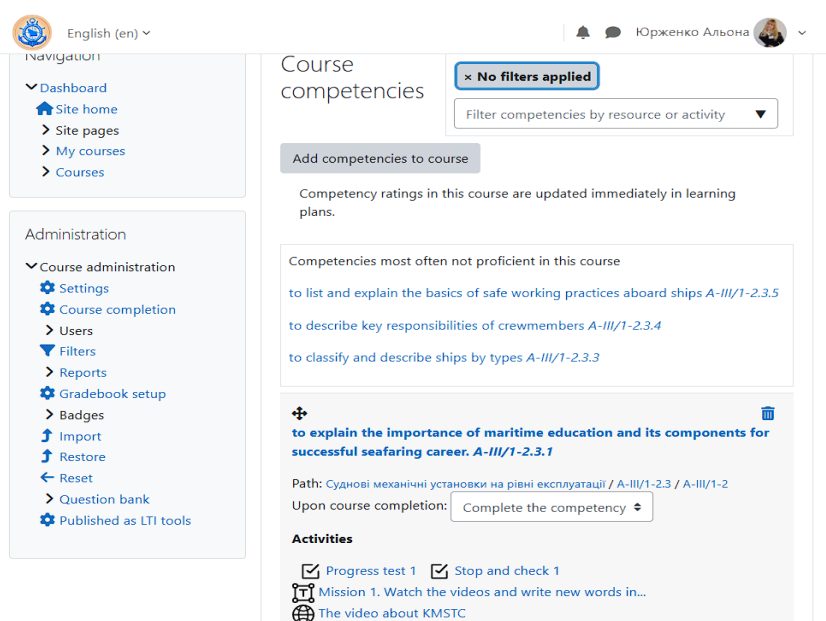


Figure 1 — Course competencies on LMS MOODLE according to competency-based approach

Conclusions. Therefore, the competency-based approach is an effective methodological basis for training future ship engineers, as it ensures the orientation of the educational process towards the formation of practically significant skills and readiness for professional activity in real conditions. Its advantages lie in compliance with international standards, the development of autonomy, responsibility, critical thinking and the ability to continuous professional improvement. At the same time, the implementation of the competency-based approach is accompanied by certain difficulties, in particular the need to update the content of training, improve assessment methods and increase the level of readiness of both teachers and students for active interaction in the educational process.

Thus, the effectiveness of the competency-based approach depends on its systematic implementation, combination with modern digital technologies and adaptation to dynamic changes in the maritime industry, which in general contributes to the training of competitive specialists.

REFERENCES

1. Yurzhenko A. Pedagogical conditions for training of future ship engineers in the process of English for specific purpose learning. *Engineering and Educational Technologies*. 2018. Vol. 6, no. 4. P. 48–57. URL: <https://doi.org/10.30929/2307-9770.2018.06.04.05> (date of access: 03.05.2023).
2. Kononova O. Y., Bevzenko J. Y., Yurzhenko A. Y. Creation of a Distance Communication Channel With Gamification Elements. *Handbook of Research on the Influence and Effectiveness of Gamification in Education*. 2022. P. 226–240. URL: <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-4287-6.ch012> (date of access: 03.05.2023).
3. Sherman M., Yurzhenko A. Experimental research on the formation of future ship engineers' communicative competence based on gamification approach. *Освітній вимір*. 2020. Vol. 55. P. 251–266. URL: <https://doi.org/10.31812/educdim.v55i0.3939> (date of access: 03.05.2023).
4. Kuharenko S., Dzyubenko O., Klyuev D. Information And Educational Authorized Environment For The Study Of The Discipline. *Actual directions of scientific researches of the XXI century: theory and practice*. 2020. Vol. 8, no. 1. P. 278–283. URL: <https://doi.org/10.34220/2308-8877-2020-8-1-278-283> (date of access: 03.05.2023).
5. Martes L. Best Practices in Competency-based Education in Maritime and Inland Navigation. DOI: 10.12716/1001.14.03.06
6. Malau A.G., Purnama C., Mudakir, Simanjuntak M.B. Developing Competency-Based Maritime Education for the Digital Age. *Journal of Maritime Research*, Vol XXII, No. I, 2025, p. 100–106.
7. Suprpti F. The Influence of Competency-Based Training on the Readiness of Nautical Cadets in the Maritime Industry. DOI: 10.37985/jer.v5i4.1941

РОЗВИТОК ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ ЗАСОБАМИ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ФОРМУВАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ

Кононова О.Ю.

*ВСП «Морський фаховий коледж Херсонської державної морської академії»
(Україна)*

Вступ. Цифровізація освіти є одним із ключових чинників трансформації сучасної професійної підготовки фахівців транспортної галузі. Впровадження цифрових технологій змінює не лише форми організації освітнього процесу, а й підходи до навчання, оцінювання та взаємодії між його учасниками. Використання електронних освітніх платформ, систем управління навчанням (LMS), інтерактивних ресурсів і аналітичних інструментів сприяє підвищенню доступності освіти, забезпечує оперативний зворотний зв'язок та створює умови для індивідуалізації навчання [1, 2].

У контексті професійної підготовки майбутніх фахівців транспортної галузі цифровізація відкриває нові можливості для моделювання професійних ситуацій, розвитку практичних навичок та формування професійної компетентності.

Водночас актуалізується необхідність підготовки конкурентоспроможних фахівців, здатних ефективно діяти в умовах глобалізованого ринку праці та відповідати міжнародним стандартам професійної діяльності. Зокрема, у сфері морського транспорту важливу роль відіграють вимоги Міжнародної конвенції про підготовку і дипломування моряків та несення вахти (STCW Convention), які визначають необхідний рівень професійної та іншомовної підготовки майбутніх фахівців [3]. Це зумовлює потребу в оновленні змісту освіти та впровадженні сучасних педагогічних підходів, що забезпечують формування професійно значущих компетентностей відповідно до міжнародних вимог ІМО [4].

Одним із провідних напрямів модернізації професійної освіти є компетентнісний підхід, який орієнтує освітній процес на результат — сформованість у здобувачів освіти здатності застосовувати знання, уміння та навички у професійній діяльності. Компетентнісний підхід передбачає інтеграцію теоретичної та практичної підготовки, розвиток критичного мислення, автономності та відповідальності здобувачів освіти. Як зазначають Р. Black та D. Wiliam, ефективність навчання значною мірою залежить від активної участі здобувачів освіти у процесі оцінювання та розуміння ними критеріїв навчальних досягнень, що безпосередньо пов'язано з формуванням їхньої оцінювальної компетентності [5].

Разом із тим однією з актуальних проблем сучасної професійної освіти залишається підвищення об'єктивності та ефективності оцінювання навчальних досягнень. Традиційні підходи до оцінювання не завжди забезпечують прозорість критеріїв і не сприяють розвитку рефлексивних умінь здобувачів освіти. У цьому контексті особливого значення набуває формувальне оцінювання, яке розглядається як процес постійного зворотного зв'язку між викладачем і здобувачем та інструмент підтримки навчання.

За підходом J. Lodge, ефективне оцінювання можливе за умови чіткого визначення критеріїв і залучення здобувачів до процесу само- та взаємооцінювання, що сприяє розвитку їхньої здатності до саморегуляції та підвищує якість навчальних результатів [6].

Компетентнісний підхід у сучасній освіті розглядається як провідна методологічна основа професійної підготовки, орієнтована на формування здатності здобувачів освіти застосовувати знання, уміння та досвід у реальних професійних ситуаціях. Він передбачає інтеграцію теоретичної і практичної підготовки, розвиток автономності, критичного мислення та відповідальності за результати навчання, що відповідає вимогам сучасного ринку праці.

Професійна компетентність майбутніх фахівців транспортної галузі трактується як інтегрована характеристика особистості, що охоплює спеціальні знання, професійні вміння,

комунікативні навички та здатність діяти відповідно до міжнародних стандартів професійної діяльності. Вона формується у процесі поєднання навчальної діяльності з моделюванням професійних ситуацій і практикоорієнтованими завданнями.

Формувальне оцінювання розглядається як ефективний інструмент розвитку компетентностей, що забезпечує постійний зворотний зв'язок і спрямоване на підтримку навчання. Як зазначають P. Black та D. Wiliam, його ефективність полягає у залученні студентів до процесу оцінювання, зокрема через само- та взаємооцінювання, що сприяє усвідомленню критеріїв і розвитку рефлексії [5].

Цифрові технології відіграють важливу роль у забезпеченні прозорості та об'єктивності оцінювання, оскільки дозволяють автоматизувати процес контролю знань, забезпечують оперативний зворотний зв'язок і накопичення аналітичних даних щодо навчальних досягнень, тоді як бенчмаркінговий підхід забезпечує чіткість критеріїв і орієнтацію на кращі освітні практики. Використання LMS, інтерактивних платформ і цифрових інструментів сприяє підвищенню точності оцінювання та індивідуалізації навчального процесу.

Організація освітнього процесу здійснювалася із використанням LMS Moodle як цифрового навчального середовища, що забезпечує структурованість курсу, доступ до матеріалів та можливість моніторингу результатів. У навчальний процес було інтегровано цифрові інструменти, зокрема SCORM-пакети, інтерактивні вправи LearningApps та онлайн-тести, що сприяли активізації пізнавальної діяльності здобувачів освіти [7].

Важливим компонентом стала імплементація формувального оцінювання, яке реалізовувалося через самооцінювання (checklists), взаємооцінювання за чіткими критеріями та виконання рефлексивних завдань. Використання бенчмарків забезпечило чіткість і прозорість критеріїв оцінювання, орієнтацію на кращі практики та підвищення об'єктивності оцінювання результатів навчання [8].

Застосування цифрових технологій і формувального оцінювання сприяло підвищенню об'єктивності, прозорості та індивідуалізації навчального процесу. Водночас бенчмаркінговий підхід відіграє важливу роль у підвищенні якості освіти через можливість порівняльного аналізу та вдосконалення освітніх практик. Разом із тим, впровадження таких підходів супроводжується певними труднощами, зокрема різним рівнем цифрової компетентності учасників освітнього процесу та технічними обмеженнями.

Висновок. Отже, інтеграція цифрових технологій і формувального оцінювання є ефективним засобом розвитку професійних компетентностей майбутніх фахівців транспортної галузі. Її застосування сприяє підвищенню якості підготовки, забезпечує прозорість оцінювання та обґрунтовує доцільність подальшого впровадження цифрових інструментів у професійну освіту.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розширенням використання цифрових технологій, зокрема інструментів штучного інтелекту, а також поглибленням аналітичних можливостей освітніх платформ для оцінювання навчальних досягнень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Redecker A. Communication and control. Scenarios of digital learning. Communication and Learning in an Age of Digital Transformation, 2020, 141–151. <https://doi.org/10.4324/9780429430114-13>
2. Selwyn N. Rethinking Education in the Digital Age. Digital Sociology. 2012. <https://doi.org/10.1057/9781137297792.0022>
3. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 року (консолідований текст з манільськими поправками). Київ : ВПК «Експрес–Поліграф», 2012. 568 с.
4. IMO. Model Course 3.17. Maritime English. London : International Maritime Organization (IMO), 2014 – 138 p.
5. Black, P., Wiliam, D. Assessment and classroom learning. Assessment in Education.

1998, Vol. 5, No. 1, 7–74. <https://doi.org/10.1080/0969595980050102>

6. Lodge J. M. Technologies, Teaching, and Learning in Higher Education. 2019. Education. <https://doi.org/10.1093/obo/9780199756810-0221>

7. Yurzhenko, A., Diahyleva, O., & Kononova, O. Interactive module «Maritime Security» of Maritime English course on LMS MOODLE for future ship engineers. Journal of Digital Security and Forensics, 2(1), 2025, 1–5. <https://doi.org/10.29121/digisecforensics.v2.i1.2025.39>

8. Kononova O. Formative assessment of learners in the conditions of digital transformation of education. Zhytomyr Ivan Franko State University Journal. Pedagogical Sciences. Vol. 3 (122). Zhytomyr. 2025, 80-96. [https://doi.org/10.35433/pedagogy.3\(122\).2025.6](https://doi.org/10.35433/pedagogy.3(122).2025.6)

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ МАЙБУТНІХ МОРЯКІВ ЗАСОБАМИ КУРСУ «МОРСЬКА АНГЛІЙСЬКА МОВА»

Кудрявцева В.Ф., Барсук С.Л., Фролова О.О.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Компетенції моряків відіграють важливу роль у забезпеченні безпеки екіпажу і судна, причому нетехнічні уміння постають поряд з технічними у визначальні моменти прийняття рішень під час виконання різноманітних операцій на борту судна. Для відтворення типових і атипових дій членів екіпажу у сучасному освітньому процесі вищих навчальних закладів на національному і міжнародному рівнях активно використовуються кейси для поєднання теоретичних основ профільних дисциплін і неочікуваних ситуацій, які відбуваються у сфері морських перевезень. Моделювання професійної поведінки шляхом аналізу реальних ситуацій на морі постає важливим аспектом підготовки майбутніх моряків.

Актуальність дослідження. Сучасна морська справа потребує як технічних знань, так і розуміння людських обмежень та можливостей. Останнім часом все більше уваги звертається на м'які уміння, їх прояв у різних проблемних і неоднозначних ситуаціях та можливості запобігання аваріям шляхом свідомого розвитку цих умінь. Водночас за некоректними діями членів екіпажу криються особистісні цінності, поведінкові шаблони та компетенції. Цілком закономірно, що у наукових публікаціях тільки починає з'являтися саме ця тематика. Міжнародні організації та науковці, які займаються питаннями поведінкових компетенцій, у більшості пов'язують їх з м'якими вміннями.

Розробники настанови про оцінку і верифікацію поведінкових компетенцій у сфері танкерних перевезень [1] наголошують, що поведінка і відношення персоналу є ключовими елементами належної культури безпеки. Важливо не тільки те, що люди роблять, а й як вони це роблять — саме це впливає на якість досягнення мети. Представлена ними структура поведінкових компетенцій складається з шести доменів — «робота в команді», «фокусування на результаті», «комунікація і впливовість», «усвідомлення ситуації», «прийняття рішень», «лідерство і менеджерські уміння», усі з яких є м'якими вміннями.

В іншій структурі поведінкової компетенції [2] розрізняються п'ять кластерів — «думай», «рости», «взаємодій», «фокусуйся», «веди», кожним з яких об'єднано декілька м'яких умінь. Так, кластер «думай» об'єднує прийняття рішень, розв'язання проблем, стратегічну кмітливість, критичне мислення, концептуальне мислення; кластер «рости» — здатність швидко вчитися, гнучкість і пристосування до змін, креативність, професійну і технічну компетентність; кластер «взаємодій» — командну роботу, розв'язання конфліктів, орієнтацію на стейкхолдерів і комунікацію; кластер «фокусуйся» — націленість на результат і орієнтацію на якість; кластер «веди» — управління невизначеністю, спрямування і залучення персоналу. Більшість визначених компетенцій теж відносяться до м'яких умінь.

Аналогічні підходи описуються науковцями в інших сферах діяльності. Результати дослідження у сфері розробки бізнес-проектів [3] підтверджують, що поведінкові компетенції менеджерів (включаючи лідерство, комунікацію, орієнтацію на результат, емоційний інтелект, етика, креативність і мотивація) значно і позитивно пов'язані з успіхом інформаційно-системних проектів. При цьому отримані дані показують, що емоційний інтелект, креативність і етика є найбільш впливовими поведінковими компетенціями для досягнення позитивного результату. Автори наголошують на нестачі емпіричних досліджень з поведінкових компетенцій у контексті інформаційних систем.

Група дослідників [4] висловлює базову думку, що цінності моряків впливають на безпеку морських операцій, а їх визначення допомагає зрозуміти поведінку моряків та процес прийняття ними рішень. Результати їхнього дослідження на основі опитування біля

тисячі респондентів показали, що домінуючими цінностями серед моряків є «безпека», «доброзичливість», «універсалізм» та «конформність». Істотної різниці у цінностях моряків залежно від їхніх демографічних характеристик не було виявлено. На нашу думку, значущість дослідження полягає у визначенні реальних, а не бажаних цінностей працюючих моряків.

Вагомою для розуміння багатьох причин морських аварій є систематизація поведінкових шаблонів, характерних для сучасних мореплавців [5]. До них відносяться 1) презумпція впевненості: коли процес перевірки даних скорочується до критичного мінімуму і подальші дії сприймаються як правильні, а інформація — як актуальна, без належної верифікації; 2) пастка спільної компетентності: коли експерти в одній галузі, працюючи разом, цілком довіряють компетентності один одного, що може призвести до помилкових рішень і створити ситуацію, яка заважає критичному погляду і гальмує перевірку; 3) ілюзія нормальності: коли довгий період безперебійної роботи помилково сприймається як ознака абсолютної безпеки, робиться хибне припущення про ефективність системи; 4) розбіжність у сприйнятті дійсності: уявлення команди більше не відповідає реальному стану речей, як наслідок, спостерігається невідповідність у розумінні ситуації. За твердженням автора, перш ніж з'являється якась очевидна помилка, зазвичай існує низка ледь помітних, повторюваних когнітивних чинників, які поступово погіршують розуміння ситуації задовго до того, як хтось почне діяти явно неправильно.

Метою дослідження є розглянути засоби моделювання професійної поведінки майбутніх моряків у процесі навчання морської англійської мови.

Результати досліджень. Робота з поведінковими компетенціями, шаблонами і цінностями може посідати важливе місце у викладанні кожної освітньої компоненти. У цьому ракурсі можливості курсу морської англійської мови невичерпні завдяки комунікативній основі навчання.

Під час регулярних тематичних занять, вивчаючи модуль «Перевезення небезпечних вантажів» [6], здобувачі освіти діляться власними поглядами, переконаннями та своїм поведінковим досвідом у процесі виконання наступних комунікативних завдань:

1) Визначення тверджень правильними/неправильними/залежно від обставин:

- Safety depends not on rules, but on how people follow them.

- The most dangerous cargo is not the one with the highest hazard class, but the one handled incorrectly.

- Quick action is always better than correct action.

2) Завершення речень на власний розсуд:

- IMO ensures that dangerous goods are transported in thousands of containers worldwide safely ...

- The cargo officer decides where to place dangerous goods ...

- Container ship fires have been seemingly on the rise again ...

3) Рольові ігри:

Student A. You are the Officer on Watch. You receive a report: smoke from a container cargo: dangerous goods (unknown type); crew nearby. Report to the Chief Officer.

Student B. You are the Chief Officer. You receive a report from the OOW. Decide on an action plan.

4) Мовленнєва реалізація сценарію за планом:

During routine checks before departure, the Chief Officer notices that one container carrying dangerous goods has a correct hazard label, but no Dangerous Goods Declaration is attached to the documents. The terminal insists that the cargo is safe and already loaded. The ship is on a tight schedule.

Identify the risks exists and express your opinion on the actions the officer should take.

5) Вирішення етичних дилем:

- If you were Chief Mate, which hazard would you fear most?

- Is «weather» truly a root cause, or does it reveal inadequate preparation?

- Most DG incidents start as small, manageable problems. If the human element is a dominant root cause, what type of training should be strengthened?

6) Завдання на оцінювання ризиків:

- Smoke is detected coming from a container with dangerous goods. Put the actions in the correct order (1–5). What could go wrong if the order is incorrect?

- Read the text and choose the most appropriate action in each situation. Justify your choice. Which wrong answer is the MOST dangerous and why?

Такі комунікативні завдання спонукають курсантів до застосування професійних знань та власного досвіду, вчать приймати рішення в умовах невизначеності, тренують логіку та формують професійне мислення шляхом осмислення особливостей професії.

Обговорення поведінки діючих осіб у кейсах доцільно здійснювати у розрізі декількох аспектів. При аналізі кейсу до модулю «Контейнерні перевезення» можливі такі завдання:

1) Аналіз видимих причин певних дій:

- Was the master's decision to sail under severe weather conditions justified?

- Were the master's attempts to lessen the rolling by steering different headings adequate?

2) Дискусія про можливі причини певної поведінки, про які можна лише здогадуватися:

- Could the master and chief mate know about the deficiencies of the container lashing equipment?

- If yes, why might they take risks, especially being aware of the approaching cyclone?

3) Розробка особистих сценаріїв поведінки студентів в подібній ситуації:

- How would you perform if you were the master / the chief mate / the second mate?

- What are the possible alternatives to the whole situation?

4) Рефлексія щодо реагування на подібні ситуації у власному житті і практиці на судні

- Which of my specific actions (or inactions) in similar situations were most effective, and which ones hindered the resolution of the problem?

Захоплюючим груповим завданням слугують дискусії з визначення поведінкових шаблонів, якими могли керуватися члени екіпажу при допущенні помилкових дій. Такі дискусії можуть бути успішними лише за умови ґрунтовного ознайомлення студентів з існуючими шаблонами і усвідомлення, що кожен із цих факторів сам по собі може призвести до погіршення ефективності роботи. Разом вони створюють передумови для аварій із серйозними наслідками.

Висновки. Поряд з накопиченням професійних знань варто приділяти належну увагу розвитку поведінкової компетенції через аналіз помилок та сценаріїв дій для формування культури безпеки і забезпечення сталого розвитку галузі морських перевезень. Освітня компонента «Морська англійська мова» шляхом впровадження комунікативного та компетентнісного підходів поряд з вдосконаленням професійної іншомовної комунікативної компетенції розвиває уміння оцінювати моделі поведінки, формує особистісні якості, які забезпечують успіх у професійній діяльності та взаємодії з іншими. Презентовані комунікативні засоби моделюють професійну поведінку майбутніх фахівців морської галузі та формують належні передумови для розвитку відповідальності й усвідомленого ставлення до експлуатаційних ризиків з метою запобігання аварійним ситуаціям на морі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Behavioural Competency Assessment and Verification for Vessel Operators. Oil Companies International Marine Forum, INTERTANKO. 1st ed. London : OCIMF ; INTERTANKO, 2018. 34 p.

2. Behavioural Competence Framework. EASA — European Union Aviation Safety Agency. URL: <https://www.easa.europa.eu>

3. Sampaio S., Wu Q., Cormican K., Varajao J. Reach for the sky: analysis of behavioral competencies linked to project success. *International Journal of Managing Projects in Business*. 2021. Vol. 15. Issue 1. P. 192–211. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJMPB-09-2020-0276>
4. Bacasdoon J., Bolmsten J., Bartuseviciene I. Understanding the Core Values of Seafarers: A Study Based on Schwartz's Value Theory. *Scientific Journal of Maritime Research [Pomorstvo]*. 2026. Vol. 40. No. 1. P.148 – 158. DOI: <https://doi.org/10.31217/p.40.1.10>
5. Baker F. The Hidden Engines of Maritime Failure. *Seaways*. The International Journal of The Nautical Institute, 2026. URL: <https://www.nautinst.org/resources-page/seaways>
6. *Sail Safe : coursebook* / Barsuk S. and others. Kherson : KSMA Science Park «Maritime Industry Innovations» Ltd, 2022. 250 p.

ВPROBАДЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ СИМУЛЯЦІЙ В ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ ТЕХНІЧНИХ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Лебедь О.М.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. У технічних закладах вищої освіти, перед розглядом предметних фахових дисциплін, розглядається загальний курс фізики, який відіграє базову роль для набуття здобувачами вищої освіти (ЗВО) фахових компетенцій. Методи і способи викладення матеріалу загального курсу фізики, в свою чергу, базуються на емпіричних методах досліджень, якими є спостереження, експеримент. При цьому експеримент може демонструватися на лекційних та практичних заняттях, але саме на лабораторному практикумі формуються навички роботи з технічним обладнанням.

Актуальність досліджень. При розгляді матеріалу курсу фізики не всі експерименти можливо провести суто фізично. Це, перш за все, експерименти зі шкідливими та небезпечними речовинами. Також унеможливорює виконання певних експериментів їх складність, дорожнеча.

Способом вирішення цих проблем є інтеграція в навчальний процес інформаційних та комунікаційних технологій, здатних реалізовувати фізичні об'єкти на основі математичних моделей. Основним методом створення таких об'єктів є інтеграція в навчальний процес віртуальних симуляцій [1]. При цьому значно збільшується інтерес ЗВО до предмету та покращується засвоєння навчального матеріалу [2].

Постановка задачі. Аналіз сучасних публікацій та досліджень, щодо впровадження в навчальний процес віртуальних методик викладання фізики, свідчить про значну зацікавленість як у вітчизняних джерелах [1–5], так і в зарубіжних роботах [6–9]. Водночас питання інтегрованого лабораторного практикуму з фізики, який передбачає поєднання досліджень на віртуальних платформах із дослідженнями реальних фізичних об'єктів, досі розкрито недостатньо. Метою даного дослідження є вивчення специфіки впровадження віртуального середовища в лабораторний практикум з фізики для технічних закладів вищої освіти з урахуванням їх інтеграції з традиційними експериментами над реальними фізичними процесами.

Результати дослідження. Під час розроблення лабораторного практикуму з фізики для закладів вищої технічної освіти слід орієнтуватися на навчальні робочі плани з урахуванням набуття здобувачами вищої освіти професійних компетенцій. Практикум має включати як реальні лабораторні роботи, так і віртуальні модулі. Реальні експериментальні вправи формуються за умови наявності простого, недорогого та безпечного для здоров'я обладнання. Для застосування віртуальних лабораторних робіт принципових обмежень не встановлено. Особливий інтерес становить підхід, при якому лабораторні роботи виконуються паралельно: спочатку з реальними фізичними об'єктами, а потім у віртуальному середовищі. Таке паралельне виконання сприяє більш диференційованому сприйняттю реального й віртуального вимірів та істотно впливає на рівень засвоєння матеріалу. Для організації лабораторного практикуму з фізики на відомих віртуальних платформах у поєднанні з реальним фізичним обладнанням запропоновано таблицю позитивних і негативних факторів використання віртуальних лабораторних робіт [3].

На основі отриманих результатів, можна стверджувати, що поряд із досить значущими позитивними чинниками застосування віртуальних лабораторних робіт також спостерігаються й негативні. У цих чинниках враховано ефективність засвоєння фахових компетенцій, фізіологічний та психологічний вплив на ЗВО, а також економічну доцільність.

Таблиця 1 — Таблиця позитивних та негативних чинників використання віртуальної симуляції для лабораторної роботи з фізики

№	Позитивні чинники	Негативні чинники
1.	Індивідуальна робота	Зменшення навичок роботи колективної співпраці
2.	Можливість обслуговування надскладних систем	Зменшення адекватного сприйняття світу
3.	Можливість виконання великої кількості досліджень	Зменшення креативного мислення для вирішення проблемної ситуації
4.	Можливість виконання в будь-який час	Зниження вимог до режиму дня
5.	Менший кошторис програмного забезпечення для віртуального обладнання, порівняно з реальним	Втрата компетентності в економічній орієнтації сучасного обладнання
6.	Високі можливості удосконалення лабораторних робіт	Зміна комп'ютерних технологій, оптимізація програмного забезпечення
7.	Простота і доступність обслуговування	Зменшення практичних навичок обслуговування реального обладнання
8.	Можливість працювати з небезпечними речовинами та явищами в екстремальних умовах	Зниження уявлень техніки безпеки при роботі з реальним обладнанням
9.	Відсутність засобів захисту, при небезпечних умовах роботи для людини	Ризик кумулятивної дії несприятливих фізіологічних та психологічних факторів, зумовлених роботою з комп'ютером
10.	Значне зменшення часу виконання експериментальних досліджень	Втрата реального перебігу часу
11.	Можливість автоматичної обробки результатів досліджень	Зниження адекватної оцінки отриманих результатів обчислень
12.	Можливість проведення лабораторних робіт при дистанційному навчанні	Зменшення почуття реального лабораторного науково-дослідного середовища
13.	Можливість розглядати та формувати моделі поза межами класичної фізики	Розмиття границь застосування класичної фізики
14.	Зростання умінь роботи з різноманітними електронними платформами, ресурсами	Погіршення якості практичних навичок роботи з реальним обладнанням
15.	Збільшення інтересу до дисципліни, мотивації її вивчення	Формування ігрового характеру проведення досліджень

Висновки. Лабораторний практикум із фізики у технічних вищих навчальних закладах має включати як реальні, так і віртуальні лабораторні роботи. Такий підхід істотно підвищує ефективність засвоєння професійних компетенцій.

Запропоновано таблицю позитивних і негативних чинників впровадження віртуальних лабораторних робіт у лабораторний практикум з фізики для технічних вищих навчальних закладів. Ця таблиця дозволяє застосовувати більш диференційований підхід при підборі програмного забезпечення та реального фізичного обладнання і може слугувати підґрунтям для інших дисциплін у технічних вищих навчальних закладах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Семеніхіна О.В., Шамо́ня В.Г. Віртуальні лабораторії як інструмент навчальної та наукової діяльності. Педагогічні науки: теорія, історія, інноваційні технології, 2011.

№1(11). с. 341–346.

2. Лебедь О. М. Інтеграція віртуальних методів навчання фізики для здобувачів вищої освіти морської галузі. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, Одеса, 2025. с. 368–373. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33677.86240/1>

3. Лебедь О.М., Лебедь Н.І. Інтеграція віртуальних методів навчання в лабораторний практикум з фізики технічних закладів вищої освіти. Вісник науки та освіти, 2025. №4(34). С. 1334-1342. [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-4\(34\)-1334-1342](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-4(34)-1334-1342)

4. Лебедь О.М., Лебедь Н.І. Форми реалізації лабораторного практикуму з фізики для технічних закладів вищої освіти в умовах дистанційного навчання. Актуальні питання у сучасній науці, 2025. №5(35). С. 1169–1176. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2025-5\(35\)-1169-1177](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2025-5(35)-1169-1177)

5. Лебедь О.М., Лебедь Н.І. Застосування віртуальних платформ при вивченні фізики в технічних закладах вищої освіти. Наукові інновації та передові технології, 2025. №5(45). С. 1221–1231. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-5\(45\)-1221-1231](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-5(45)-1221-1231)

6. T. de Jong, M. C. Linn, Z. C. Zacharia. Physical and virtual laboratories in science and engineering education. Science, 2013. V. 340. no. 6130. pp. 305–308. DOI: 10.1126/science.1230579

7. W-K. Wong, K-P. Chen, H-M. Chang. A comparison of a virtual lab and a microcomputer-based lab for scientific modeling by college students. Journal of Baltic Science Education, 2020. V.19, no. 1, pp. 157-173. doi: <https://doi.org/10.33225/jbse/20.19.157>

8. G. Hamed, A. Aljanazrah. The effectiveness of using virtual experiments on students' learning in the general physics lab. Journal of Information Technology Education: Research, 2020. V. 19, pp. 977–996. DOI: 10.28945/4668

9. P. G. Crandall, C. A. O'Bryan, S. A. Killian, D. E. Beck, N. Jarvis, E. Clausen. A comparison of the degree of student satisfaction using a simulation or a traditional Wet Lab to teach physical properties of ice. Journal of Food Science Education, 2015. V.14, no. 1. pp. 24-29. doi: <https://doi.org/10.1111/1541-4329.12049>

СПОСОБИ ВПРОВАДЖЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З ФІЗИКИ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ПРИ ДИСТАНЦІЙНІЙ ФОРМІ НАВЧАННЯ

Лебедь О.М.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. В технічних закладах вищої освіти, практичні навички роботи з обладнанням мають визначальну роль при формуванні фахових компетенцій здобувачів вищої освіти (ЗВО). Базовою дисципліною для формування практичних навичок є загальний курс фізики, однією з форм проведення якого є лабораторний практикум.

Актуальність досліджень. У сучасних умовах (пандемія, воєнні конфлікти) більшість навчальних закладів переходить на дистанційну форму навчання, що унеможливорює виконання лабораторних робіт у ЗВО з використанням реального фізичного обладнання. Однією з форм організації лабораторного практикуму з фізики в технічних вищих навчальних закладах є застосування віртуальних симуляцій. Питання впровадження симуляцій у лабораторний практикум докладно висвітлене в працях вітчизняних та зарубіжних науковців. Водночас, при формуванні лабораторного практикуму з фізики виключно на основі віртуальних симуляцій відсутні практичні вміння роботи в ЗВО з реальним обладнанням і не забезпечується можливість формування повного комплексу фахових компетенцій.

Постановка задачі. Визначення оптимальних моделей реалізації лабораторного практикуму з фізики в технічних закладах вищої освіти становить актуальну проблему в умовах дистанційного навчання. Метою дослідження є вивчення способів впровадження лабораторного практикуму з фізики для технічних вишів у режимі дистанційного навчання з огляду на забезпечення здобуття ЗВО повного комплексу фахових компетентностей.

Результати дослідження. Використання віртуальних симуляцій у лабораторних практикумах з фізики в закладах вищої технічної освіти широко розповсюджене, зокрема при організації дистанційного навчання [1–5]. Здебільшого застосовують готові симуляції, розміщені на певних віртуальних платформах. У роботі [2] наведено найбільш розповсюджені віртуальні платформи, які можуть бути використані в Україні для формування лабораторних практикумів з фізики. При цьому, покладатися на одну лише віртуальну платформу для організації лабораторного практикуму не доцільно, оскільки жодна з платформ повністю не відповідає вимогам робочих програм вищих технічних навчальних закладів.

Незважаючи на численні переваги, впровадження віртуальних симуляцій не здатне повністю замінити роботу з реальним обладнанням. Найбільш ефективною є комбінована стратегія формування лабораторного практикуму з фізики, яка поєднує віртуальні симуляції та реальне фізичне обладнання. За умов дистанційного навчання єдиною можливістю для ЗВО працювати з реальним обладнанням залишається виконання домашнього експерименту [6–8].

Під домашнім експериментом розуміють експериментальні дослідження, що проводяться здобувачами вищої освіти в побутових умовах із застосуванням підручних матеріалів. Головні вимоги до таких експериментів полягають у тому, що їх технічно можливо виконати в неспеціалізованих приміщеннях із простим устаткуванням, яке не потребує значних фінансових витрат.

Розглянемо кілька лабораторних робіт іноземних авторів у контексті проведення домашнього експерименту.

Так, Шаєр Г. С. у роботі [7] детально описує виготовлення домашньої установки для дослідження параметрів коливань біфілярного маятника (рис. 1). На базі цієї установки пропонується виконати низку експериментів, що дозволяє простежити поведінку багатьох

фізичних параметрів та проаналізувати їхні залежності.



Рисунок 1 — Домашній експеримент: Дослідження параметрів коливань біфілярного маятника [7]

Е.Д. Компарі, М. Барбетта та інші [8] пропонують виконати домашні експерименти з кінематики та оптики. Зокрема, в оптичному досліді рекомендується продемонструвати хвильову природу світла за допомогою його проходження через дифракційну решітку з наступним утворенням світлової плями (однієї або двох). В якості дифракційної решітки автори радять застосувати CD- або DVD-диски, які підсвічуються вузьким пучком світла (світловим лазером) (рис.2). У роботі обґрунтовується вибір такого обладнання, детально описується процедура виконання експерименту та інтерпретується його результат. Запропонований домашній експеримент може бути використаний для визначення довжини хвилі світла.



Рисунок 2 – Домашній експеримент: Визначення довжини хвилі світла за допомогою дифракційної решітки [8]

Таким чином, можна констатувати, що для повного оволодіння фаховими компетенціями в технічних закладах вищої освіти за умов дистанційного навчання,

лабораторний практикум з фізики має включати віртуальні симуляції та домашній експеримент.

Слід також підкреслити, що за наявності можливості одночасного проведення однієї й тієї самої лабораторної роботи у форматі домашнього експерименту та віртуальної симуляції, встановлюється чітка межа між реальним і віртуальним простором. Впровадження паралельних лабораторних робіт додатково сприяє засвоєнню навчального матеріалу.

Наприклад, відому роботу «Дослідження коливань пружинного маятника» легко здійснити у форматі домашнього експерименту: для цього необхідні пружина, комплект вантажів, лінійка та прилад для вимірювання часу. Віртуальну симуляцію для цієї роботи можна реалізувати за допомогою відомої платформи **PhET**, яка зображена на рисунку 3.

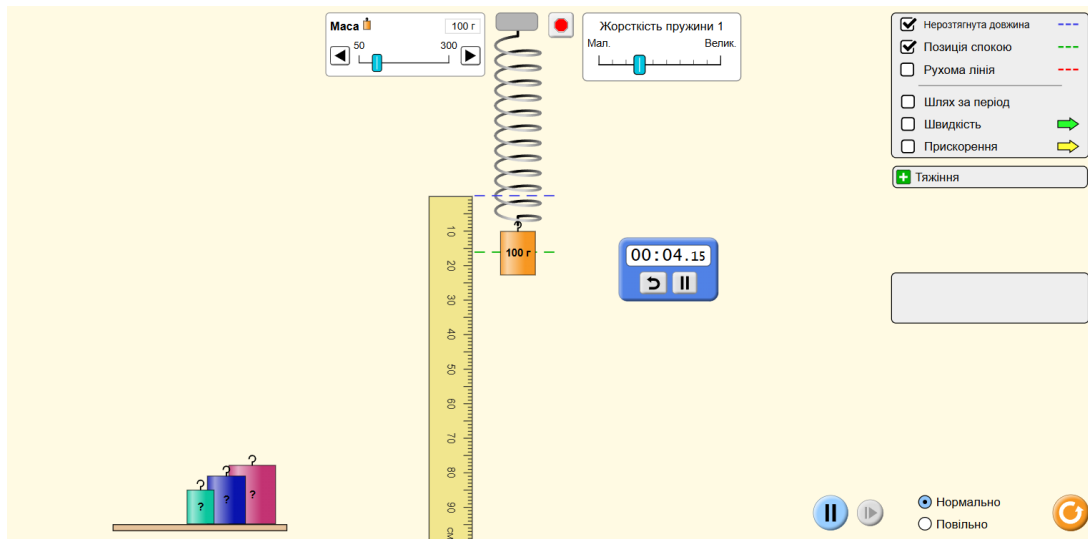


Рисунок 3 — Демонстрація симуляції віртуальної платформи PhET для створення лабораторної роботи «Дослідження коливань пружинного маятника»

Висновки. Лабораторний практикум з фізики, в технічних закладах вищої освіти, повинен формуватися на основі віртуальних симуляцій та домашнього експерименту. Підбір віртуальних симуляцій здійснюється на основі певного набору віртуальних платформ.

Виконання однієї лабораторної роботи на основі віртуальних симуляцій та домашнього експерименту підвищує засвоєння навчального матеріалу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мазур М.П. Особливості розробки віртуальних практичних інтерактивних засобів навчальних дисциплін для дистанційного навчання. Інформаційні технології в освіті, 2010. №7. с. 40–46.
2. Лебедь О. М. Інтеграція віртуальних методів навчання фізики для здобувачів вищої освіти морської галузі. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету, Одеса, 2025. с.368-373. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33677.86240/1>
3. Лебедь О.М., Лебедь Н.І. Форми реалізації лабораторного практикуму з фізики для технічних закладів вищої освіти в умовах дистанційного навчання. Актуальні питання у сучасній науці, 2025. №5(35). С. 1169-1176. [https://doi.org/10.52058/2786-6300-2025-5\(35\)-1169-1177](https://doi.org/10.52058/2786-6300-2025-5(35)-1169-1177)
4. Лебедь О.М., Лебедь Н.І. Застосування віртуальних платформ при вивченні фізики в технічних закладах вищої освіти. Наукові інновації та передові технології, 2025. №5(45). С. 1221-1231. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-5\(45\)-1221-1231](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2025-5(45)-1221-1231)
5. Лебедь О.М., Лебедь Н.І. Інтеграція віртуальних методів навчання в лабораторний

практикум з фізики технічних закладів вищої освіти. Вісник науки та освіти, 2025. №4(34). С. 1334-1342. [https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-4\(34\)-1334-1342](https://doi.org/10.52058/2786-6165-2025-4(34)-1334-1342)

6. Подласов С., Снарський А. Домашній експеримент по визначенню відношення теплоємностей c_p/c_v для повітря. Фізико-математична освіта, 2024. Т. 39. № 4. С. 28-32. <https://doi.org/10.31110/fmo2024.v39i4-04>

7. Schajer G. A build-at-home student laboratory experiment in mechanical vibrations. International Journal of Mechanical Engineering Education, 2021. no. 50(2). pp. 240-252. doi:10.1177/03064190211025954

8. Anna Carmela B. Bonifacio, Anna Carmela B. Bonifacio. Development and Validation of Manipulatives for Home-based Physics Experiments. KnE Social Sciences, 2024. no. 9(8), pp. 651–659. doi: 10.18502/kss.v9i8.15629.

APPLYING OUTCOME-BASED EDUCATION TO MARITIME ENGLISH TRAINING

Lipshyts L. V.

*Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)*

Introduction. The growing demands for seafarers' competencies in the international maritime industry, the requirements of international standards, the need to develop practical skills of future specialists, the high level of responsibility on board ships, and the risks associated with the maritime profession necessitate the implementation of effective approaches to the training of competent maritime professionals. These considerations are equally relevant to Maritime English training.

Taking into account the requirements of the STCW Code regarding English language proficiency outlined in Table A-II/1 (competence: «Use English in written and oral form»; knowledge, understanding and proficiency: Adequate knowledge of the English language to enable the officer to use charts and other nautical publications, to understand meteorological information and messages concerning ship's safety and operation, and to communicate with other ships, coast stations and VTS centres»), the training process should be aimed at developing the competencies in professional oral and written communication, business correspondence writing etc. [1].

Main part. In our opinion, outcome-based education (OBE) is an effective approach to Maritime English learning that promotes the development of professional foreign language communicative competence through the formulation of learning outcomes, the use of flexible and adequate teaching methods and competency-based assessment.

Furthermore, outcome-based education can not be separated from the STCW Code as it is a practical methodological way how to implement the STCW standards in Maritime English training.

The main focus of outcome-based approach is what students are expected to know, understand and be able to do by the end of a course. Outcome-based education emphasizes what students achieve instead of emphasizing what information teachers give [2].

When implementing outcome-based education in Maritime English training we should start with clearly defined learning outcomes. They guide the program design, teaching methods and assessment strategies.

Thus, students know definitely what knowledge and skills they must obtain and demonstrate as the focus is on supporting students' progress and success rather than on teaching content. For this purpose, teachers can adapt different methods such as discussions, problem-solving tasks, projects etc. to facilitate and help students reach the outcomes defined. Students' results are not evaluated just on memorization of training materials.

Moreover, students' progress is assessed based on whether they have achieved the defined learning outcomes by demonstrating the ability to solve professionally-oriented tasks (including professional writing) using knowledge of basic program concepts.

It should be noted that, in order to meet the principles of outcome-based education, careful consideration is to be given to Maritime English course planning, including assessment, as its implementation can be complex and challenging.

In the process of designing the module «Mooring» for second-year students, the following learning outcomes have been identified: 1. characterize mooring arrangement and types of ropes; 2. describe the actions before and while mooring, exchange information on mooring methods and mooring hazards; 3. understand and respond correctly to the commands and SMCP for mooring / unmooring, hand signals; 4. demonstrate understanding of personal safety measures during mooring operation [3]. It is expected that students achieve the learning outcomes upon completion of each part of the module. To achieve this objective, the tasks have been designed to develop competencies in the given topic. The following are some examples of the tasks: fill in the gaps,

name the pictures and ask and answer questions about mooring equipment parts and their functions, complete the sentences, role-play the situation (Student A. You are Third Officer. Conduct a briefing with mooring team members to prepare for mooring. Instruct them. Student B. You are OS. Ask Third Officer about all necessary preparations for mooring operation.), discuss the questions, list guidelines on mooring equipment maintenance, label the mooring lines and describe their positions and purposes, compose Vessel Mooring Plan and others. Through the exercises, students master relevant maritime terminology and learn to apply it when performing problem-solving tasks. Gradually, students acquire competencies and are able to effectively apply them in professional maritime communication.

Outcome-based education is closely aligned with the requirements of the STCW Convention. They both emphasize clearly defined and measurable learning outcomes as well as performance-based assessment.

Conclusion. According to the above-stated considerations, the following key features of outcome-based education can be formulated: clear learning outcomes, a student-oriented approach, flexible teaching techniques, alignment between learning, assessment and real needs of maritime industry, clear students' expectations, practical skills orientation.

In conclusion, outcome-based approach ensures that students possess not only theoretical knowledge but also practical skills necessary for safe and effective professional performance on ships. The application of OBE contributes to aligning Maritime English training with international standards and enhancing the overall quality of maritime specialists' training.

ЛІТЕРАТУРА

1. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW), 1978, as amended: incorporating the 2010 Manila Amendments. London: International Maritime Organization, 2017.
2. Harden R. M. Outcome-based education: the future is today. Medical Teacher. 2007. Vol. 29, № 7. P. 625–629.
3. Lucky Voyage : coursebook / Boiko K. and others. Kherson : KSMA Science Park «Maritime Industry Innovations» Ltd., 2022. 308 p.

ОРГАНІЗАЦІЯ ДІЯЛЬНОСТІ МИТНИХ ОРГАНІВ ЯК ЕЛЕМЕНТА СИСТЕМИ НАЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ

Лужанська Н.О., Лебідь І.Г., Тарасенко Д.К., Юрик М.-С.А.
Національний транспортний університет
(Україна)

Вступ. В умовах сучасних глобальних трансформацій, що супроводжуються військовими конфліктами, економічною нестабільністю та структурними змінами у світовій торгівлі, роль митних органів суттєво зростає та набуває стратегічного характеру. Особливо це проявляється в Україні, де повномасштабна війна спричинила кардинальні зміни у функціонуванні логістичних систем, міжнародних транспортних коридорів та зовнішньоекономічних зв'язків. Військові дії суттєво трансформували структуру міжнародної торгівлі, маршрути перевезень та механізми митного контролю. Зокрема, відбулося скорочення обсягів експорту та імпорту, зміна географії торговельних потоків, зростання ролі наземних транспортних коридорів, а також переорієнтація зовнішньоекономічної діяльності на ринки Європейського Союзу. У таких умовах митні органи виступають ключовим інструментом забезпечення стабільності зовнішньоторговельних процесів та адаптації економіки до нових викликів.

Актуальність дослідження. Особливого значення набуває діяльність митних органів як елемента системи національної безпеки. В умовах війни митна служба виконує не лише фіскальні та контрольні функції, але й забезпечує протидію незаконному переміщенню товарів, зброї, стратегічних ресурсів, а також запобігає обходу санкцій. При цьому виникає необхідність балансування між спрощенням митних процедур для підтримки економіки (зокрема, критичного імпорту та гуманітарних вантажів) та посиленням контролю для мінімізації безпекових ризиків.

Крім того, в умовах воєнного стану митні органи відіграють важливу роль у забезпеченні безперервності логістичних ланцюгів, функціонуванні гуманітарних коридорів та підтримці експортного потенціалу країни. Їх діяльність трансформується у складову елементу міжнародної безпекової архітектури, що поєднує контрольні, правоохоронні та аналітичні функції.

Не менш важливим є вплив економічних криз на діяльність митних органів. Глобальні та національні економічні потрясіння супроводжуються зниженням обсягів торгівлі, зміною структури попиту, нестабільністю валютних курсів та скороченням інвестицій. У таких умовах митні органи виконують стабілізаційну функцію, забезпечуючи надходження митних платежів до державного бюджету, регулюючи імпорто-експортні потоки та створюючи передумови для відновлення економічного зростання. Водночас митне регулювання сприяє формуванню прозорого середовища для здійснення зовнішньоекономічної діяльності та захисту національного ринку [1].

Постановка задачі. У контексті розвитку міжнародної торгівлі митні органи виступають важливим інституційним механізмом її підтримки та стимулювання. Вони забезпечують ефективне адміністрування митного законодавства, контроль за переміщенням товарів, а також створюють рівні умови для всіх учасників зовнішньоекономічної діяльності. Ефективна діяльність митниці сприяє лібералізації торгівлі, зростанню обсягів експорту та інтеграції країни у світову економічну систему.

Результати досліджень. В умовах економічних та військових викликів особливого значення набуває міжнародне співробітництво митних органів. Обмін інформацією, гармонізація митного законодавства, впровадження міжнародних стандартів та інтеграція до глобальних інформаційних систем дозволяють підвищити ефективність митного контролю, зменшити ризики правопорушень та забезпечити безпеку міжнародних перевезень. Тому, в умовах війни, економічної нестабільності та трансформації міжнародної торгівлі діяльність митних органів набуває системоутворюючого значення.

Вони виступають не лише елементом митно-логістичної інфраструктури, а й ключовим інструментом забезпечення економічної стійкості, національної безпеки та інтеграції держави у світовий економічний простір. Це обумовлює необхідність подальшого наукового дослідження, удосконалення організаційних механізмів їх функціонування та впровадження сучасних технологічних рішень у сфері митного адміністрування.

У сучасних умовах глобалізації світової економіки, інтенсифікації міжнародної торгівлі та поглиблення інтеграційних процесів особливого значення набуває ефективне функціонування митних органів як ключового елемента регулювання зовнішньоекономічної діяльності. Міжнародні перевезення вантажів виступають матеріальною основою зовнішньоторговельних операцій, а митні органи забезпечують правове, організаційне та контрольне супроводження переміщення товарів через митний кордон держави. Митне оформлення та митний контроль є невід'ємними складовими логістичного ланцюга доставки товарів у міжнародному сполученні, оскільки вони безпосередньо впливають на тривалість транспортного процесу, рівень витрат, надійність постачання та дотримання умов зовнішньоторговельних контрактів. Виконання митних формальностей є обов'язковим етапом при перетині державного кордону для всіх категорій товарів незалежно від митного режиму, що зумовлює необхідність високого рівня організації даних процесів та ефективної взаємодії між суб'єктами ринку транспортних послуг і митними органами [2].

Актуальність дослідження діяльності митних органів у контексті міжнародних перевезень зумовлена значною кількістю проблем, що виникають у процесі здійснення митних процедур та негативно впливають на ефективність логістичних операцій. Серед них доцільно виокремити тривалість проходження митного оформлення та контролю, наявність черг у пунктах пропуску, недостатній рівень технічного оснащення митної інфраструктури, обмеженість інвестицій у розвиток митної системи, а також неузгодженість національного законодавства з міжнародними нормами і стандартами. Вказані чинники призводять до затримок у доставці товарів, підвищення транспортних витрат і зниження рівня конкурентоспроможності суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності. Крім того, складність процедур митного оформлення обумовлюється необхідністю правильного визначення класифікації товарів, їх митної вартості, країни походження, а також підготовки відповідного пакету документів. Помилки або неточності на цих етапах можуть спричиняти додаткові перевірки, затримки або застосування санкцій, що ускладнює процес організації міжнародних перевезень і створює ризики для всіх учасників логістичного ланцюга.

Важливим аспектом є те, що митні органи виконують не лише контрольні, але й регуляторні та сервісні функції. Вони забезпечують дотримання встановленого порядку переміщення товарів і транспортних засобів через митний кордон, здійснюють статистичний облік зовнішньоторговельних операцій, а також сприяють формуванню прозорого та передбачуваного середовища для здійснення бізнесу. Таким чином, діяльність митних органів виступає важливим фактором забезпечення економічної безпеки держави та розвитку її зовнішньоекономічних зв'язків [3].

Особливої щодо актуальності питання ефективності функціонування митних органів набуває в умовах сучасних викликів, пов'язаних із трансформацією логістичних маршрутів, зростанням навантаження на пункти пропуску, а також необхідністю адаптації до європейських стандартів митного регулювання. В умовах зміни геополітичної ситуації та обмеження доступу до окремих транспортних напрямків значно зростає роль митних органів у забезпеченні безперебійності міжнародних перевезень та оптимізації логістичних потоків.

Суттєвий вплив на ефективність митних процедур має рівень організації роботи персоналу митних органів та суб'єктів ринку транспортних послуг. У цьому контексті важливим є впровадження сучасних методів управління, зокрема системи ключових показників ефективності, що дозволяє оцінювати результативність діяльності працівників митної служби за такими параметрами, як швидкість оформлення, якість перевірок, рівень

виявлення порушень, дотримання нормативних термінів та ефективність взаємодії з клієнтами. Це сприяє підвищенню продуктивності праці, зменшенню часу обслуговування та покращенню якості митних послуг. Не менш важливим напрямом є розвиток міжнародної співпраці між державами, гармонізація митного законодавства та впровадження сучасних інформаційних технологій у діяльність митних органів. Використання електронного документообігу, автоматизованих систем управління ризиками, попереднього декларування та цифрових платформ дозволяє суттєво спростити митні процедури, скоротити час оформлення вантажів та зменшити адміністративні бар'єри у міжнародному сполученні.

Висновки. Оптимізація митних формальностей та вдосконалення організації міжнародних перевезень мають мультиплікативний ефект, оскільки впливають не лише на транспортну галузь, але й на розвиток суміжних сфер економіки. Підвищення ефективності митного контролю сприяє зростанню обсягів експорту, розширенню зовнішніх ринків збуту, залученню інвестицій та підвищенню міжнародного іміджу держави як надійного торговельного партнера. Таким чином, діяльність митних органів у системі міжнародних перевезень вантажів є стратегічно важливою складовою функціонування логістичних систем і зовнішньоекономічної діяльності. Необхідність вирішення існуючих проблем, підвищення ефективності митних процедур та адаптації до сучасних умов розвитку міжнародної торгівлі обумовлює високу наукову та практичну актуальність дослідження у даній сфері.

ЛІТЕРАТУРА

1. Митне оформлення вантажних перевезень: навч. посіб. / Берестов І. В. та ін. Харків: УкрДУЗТ, 2023. 121 с.
2. Прокопенко В. В. Виконання митних формальностей при переміщенні товарів через митний кордон України різними видами транспорту: монографія. Дніпро: Ун-т митної справи та фінансів. 2018. – 336 с.
3. Тіхосова Г. А., Вербицький О.М., Калінський Є.О. Митний контроль та експертиза товарів : навч. посіб. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2019. 312 с.

DECISION-MAKING SKILLS DEVELOPMENT WHILE TEACHING MARITIME ENGLISH

Moroz O.

*Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)*

Currently humanity lives in the era of volatility, uncertainty, complexity and ambiguity when fast and unpredictable changes of the social and professional environment pose constant challenges and thus demand new skills and abilities to allow for the adaptation and innovative solutions finding. With the emerging technological advances and increasing interest in the ethical and psychological aspects of human relationships it is not sufficient to possess technical skills only. The employers expect their employees not only to work with tools and devices but also to critically assess and analyse the situation, cooperate with the others, to be flexible and curious as well as ready to learn lifelong. In the sphere of maritime transportation with the introduction of the digital tools, automation of operations, international maritime trade globalization new challenges are faced and the requirements to the professional competencies of seafarers are heightened.

The annual analysis of the maritime transport industry's performance and future trends conducted by the International Chamber of Shipping highlights the need to introduce changes in professional training of future seafarers to ensure stable supply of human resources for the industry. These changes primarily relate to the need for identifying soft skills to be a learning objective at the same level as technical skills as they foster cooperation, teamwork and enhance shipboard operations efficiency. Being the main international standard for the seafarers skills and competencies requirements worldwide, the International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers (STCW) includes both technical skills, such as how various parts of the equipment onboard are to be operated and maintained, and non-technical skills, such as communication, teamwork and decision making to be the maritime professionals' core competencies. The latest revision of the STCW in 2010 increased the demands on non-technical skills (NTS) for officers onboard.

The «softened» interpersonal relations onboard have a decisive effect on the crew psychological well-being during long voyages [1] and thus are of great value in the shipping industry as they complement technical skills, and contribute to considerable decreasing of accidents at sea. Since non-technical skills are increasingly becoming more critical for the safety of people and cargo onboard it seems important to explore how they are trained and developed in the course of Maritime English. So, the paper is aimed at exploring the concept of «decision making» as one of the soft skills and suggesting the practical recommendations to develop it while teaching Maritime English.

The concept of non-technical skills has been applied to a large number of domains and is usually defined as «the cognitive, social and personal resources skills that complement technical skills and contribute to safe and efficient task performance» [2]. The common idea underlying the definition of soft skills in multiple research works analyzed: soft skills are argued to be the non-technical skills necessary for any professional domain and which determine how well a person can interact socially with other employees around. Another common fact that goes without saying in almost any research on the topic is the fact that higher education cannot be considered to study hard skills only.

We recognize the necessity for maritime education institutions to develop students' soft skills and to implement appropriate strategy and methodology at the lessons, particularly Maritime English lessons. In order to identify specific soft skills to be taught a survey has been conducted by the group of Maritime English teachers of the English language department for Deck Officers. The results of the survey allowed for the development of the three-set classification of soft skills essential for the design of the Maritime English study programme: communicative (persuasion,

negotiation and emotional intelligence), behavioural (leadership, teamwork, conflict management) and cognitive (critical thinking, problem solving and decision-making) [1]. We would like to focus more detail on the development of decision-making skill while teaching maritime English though as it will be shown later most of the skills are interrelated and cannot go one without another.

So, decision-making is an important part of leadership and can be described as a process of reaching a judgement or choosing an option. The study of maritime accident reports showed that the 85 per cent of collisions were caused by unsafe acts related to decision-making [3]. This fact emphasizes the importance of decision-making in maintaining safe watch-keeping at the bridge or in the engine room, and highlights the importance of utilizing all available resources in this process. It has generally been assumed that learning to make good decisions can only be attained through experience. However, research has shown that decision making skills can be shaped through training if to concentrate on strategies surrounding the giving and receiving information, as well as the processing of the information so that appropriate decisions can be made.

The focus of our research interest is the discovery of the efficient methods and teaching strategies for the soft skills development while teaching Maritime English. Thorough analysis and literature review as well as our own teaching experience allow for the conclusion that the use of Maritime Accident Report analysis for higher order thinking skills development (decision-making inclusive) is one of the best methodological options because it enables students' active engagement into meaningful educational activities. This method can be viewed as an extended version of case method as it involves reading of much longer texts, additional research done by students thus requiring blended learning technique implementation and can be done during few lessons.

Only under the condition of thoroughly planned and arranged sequence of communicative tasks the texts of Maritime Accident Reports may provide for the increase of students' interest and motivation, nudge them to participate in discussion and analysis and thus foster the new skills development. In our research we suggest four-staged process of developing decision-making skill while working with Maritime Accident Reports.

The first stage is gathering information (gaining familiarity). During this stage students need to be allowed enough time to read carefully the text of the report so that they could get familiar with all relevant fact, events, deeds, etc. thus gaining general situational awareness. At this stage we suggest to offer students to answer factual questions in small groups first to make sure they haven't missed any details or understood the situation correctly. After that each group shall present the brief description of the situation with the final formulation of the problem they have identified. During the whole class discussion the results of each group are discussed and compared. It is also determined here what additional information is needed and where the needed information may be achieved from. Students are suggested to discuss the possible scope of additional reading and research which will teach them to feel to balance between too little and too much of information. At this point we turn to the implementation of the flipped class technique and ask students to perform further reading theoretical reading including texts of relevant Codes, Conventions and the like. This part is done individually at home at the students' own pace and style of work so that by the next lesson they would have sufficient background knowledge and situational awareness for the next stage.

At the next lesson it is possible to move to the next step which is recognizing or identifying a problem. At this stage it is possible to critically evaluate and assess the information (the events, actions and conditions) received. We believe that critical thinking as a professional ability to analyze available facts or observations about a certain situation, process, state or certain relations is of primary importance for seafarers as they work in small crews onboard ships and frequently encounter unpredictable situations that require contending against imminent dangers. Tasks and questions to the MARs at this stage should promote higher order thinking skills development. For example, answering the question «What mistakes were made by the crew?» students are taught to analyze the situation and answering the question «Could the situation/action have had more severe consequences?» allows for the assessment of the situation. In other words at this stage the whole complex global situation is divided into smaller constituent parts/impact factors to establish a

logical pattern and clearly formulate a problem, establish chains of misdoings or wrongful actions by logical assumptions, critical and analytical thinking. In such a way, during this stage it becomes possible to identify the key input elements and the way they interact and influence one another in the whole system of an overall situation.

During the next stage — identifying and evaluating alternative solutions — we suggest a group project work where the key focus of attention is on the process of exploring possible options for coming to a rational solution of those matters. This step includes discussing probable causal or limiting factors, evaluating advantages as well as risks associated with each alternative and selecting the optimum one to present as a final project of the group. The information and situational awareness achieved at the previous stages becomes crucial at this stage as it allows to finally make a risk assessment and to eventually select and clearly state the best option. Teacher as a facilitator of the group project work shall make sure all the group members have an equal opportunity and enough encouragement to speak up. For that purpose it is highly important to make students aware that any objections from the «crew» shall be taken seriously, that everybody shall be open to suggestions so that an appropriate climate and favourable atmosphere could be created. Everyone is expected to share their opinions to make it possible to identify and critically assess all possible options and, as a result, to make sound shared decisions.

As the last step in this chain is evaluating the consequences of the decision. At this stage each group presents their final product — the decision made in the course of the alternatives assessment. After the presentation the whole class discussion is aimed at reviewing the possible outcomes of the judgement formed and communicated. This process serves as an opportunity to learn, assessing and verifying the consequences of the decision and actions considering and sharing with others the risks of different lines of action. It is essential in building a reliable organization because we believe that the possibility to avoid incidents, fatal in some instance, comes with the working environment where misdoings are welcome to be reported and analyzed in order to come forward with the best decision for similar processes in future and where open sharing of information is stimulated [1].

So, to sum up everything above, we argue that case studies and Maritime Accident Report analysis proved to be a perfect methodological tool for the soft skills development as they are detailed descriptions of the real events at sea in professional environment, thus, enabling the use of the knowledge gained in real-life professional situations in their further career. Texts of Maritime Accident Reports enable the analysis of wrong and right actions, the assumptions as for the reasons of this or that action/decision and the development of students' own alternative plans of action for the situation described. Sharp monitoring and the deep situational awareness during facts discussion, logical and critical thinking together with the systematic analysis during problem statement and alternative options creation stages provide for the development of decision making skill making your students able to adapt to the changing circumstances in the workplace.

REFERENCES

1. Kudryavtseva, V., Barsuk, S., & Frolova, O. (2024). Soft skills for maritime students: possibility VS necessity. Proceedings of the 29th International Maritime Lecturers Association (IMLA) Conference (September 25–28, 2024). Istanbul: ITU Maritime Faculty & Piri Reis University. P. 226–235. Retrieved from <https://rep.ksma.ks.ua/server/api/core/bitstreams/234a3768-f3ff-428f-80ac-07fb0a0f9b54/content>
2. Flin, R., O'Connor, P., & Mearns, K. (2002). Crew resource management: Improving teamwork in high reliability industries. *Team performance management* 8(3/4), 68–78. DOI:10.1108/13527590210433366
3. Wahl, A., & Kongsvik, T. (2018) Crew resource management training in the maritime industry: a literature review. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 17(4), 1–20. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/326854492_Crew_resource_management_training_in_the_maritime_industry_a_literature_review

ВІДКРИТА НАУКА ТА ПРИНЦИПИ FAIR: МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Самойлов С.О., Поливода В.В.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Сучасний етап розвитку наукового пізнання характеризується безпрецедентною інтенсифікацією процесів створення, обміну та аналізу дослідницьких даних. Глобалізація дослідницького простору, експонентне зростання обсягів цифрових активів та поява надпотужних обчислювальних систем, зумовили необхідність фундаментального перегляду традиційних моделей наукової комунікації. До широкого розповсюдження мережі Інтернет наука функціонувала у «ізольованих» умовах: наукова інформація обмежувалася розповсюдженням через академічні бібліотеки, обмін "сирими" даними був практично неможливим через логістичні та технологічні бар'єри, а складні обчислювальні методи могли виконуватися лише у спеціалізованих центрах із закритим доступом. Доступ до науки та науковців вимагав безпосередньої фізичної або інституційної приналежності до університетської спільноти [1].

Актуальність теми. Розвиток інтернету та комп'ютерних технологій зняв фізичні обмеження на спільне використання, відкритість та співпрацю, що стало каталізатором виникнення та розвитку руху за Відкритою науку (Open Science). Цей рух прагне не лише забезпечити доступність наукових знань для широкого загалу, але й зробити сам процес виробництва цих знань інклюзивним, рівноправним і сталим.

Водночас, паралельно з ідеологічною трансформацією, виникла гостра технологічна потреба у стандартизації управління дослідницькими даними. Проблема полягає вже не у відсутності інформації, а в її надлишку та низькій якості структурування, що часто унеможливорює ефективний пошук та повторне використання результатів. Відповіддю на цей виклик стала розробка та впровадження принципів FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), які сформували новий концептуальний каркас для управління цифровими науковими активами [1]. Для України, яка інтегрується в Європейський дослідницький простір, впровадження цих принципів є не просто трендом, а критичною умовою збереження конкурентоспроможності науки.

Постановка задачі. Основним завданням є здійснення аналізу розвитку концепції Відкритої науки та розбір архітектури принципів FAIR. Дослідження також має на меті визначити роль цих стандартів у побудові європейських та світових дослідницьких інфраструктур і провести критичний огляд процесу, перешкод і перспектив імплементації відкритої науки у національну наукову систему України станом на 2024–2026 роки.

Результати досліджень. Історично концепція відкритої науки розглядається не як раптова революція, а радше як логічне і закономірне продовження практик, що зародилися у XVII столітті зі створенням перших академічних наукових журналів. Ці перші періодичні видання дозволили вченим обмінюватися ресурсами та результатами своїх спостережень, що стало відповіддю на зростаючий суспільний попит на достовірні наукові знання. Проте сучасний рух за відкритую науку виник переважно через внутрішні напруженості та суперечності в самому науковому середовищі. З одного боку, існують професійні етичні кодекси, що категорично вимагають прозорості, відтворюваності та співпраці. З іншого боку, сучасна академічна система створює колосальний конкурентний тиск, який змушує дослідників зосереджуватися на кількісних показниках випуску наукових статей та ексклюзивному володінні результатами досліджень задля отримання грантів та кар'єрного просування [2]. Цей дисбаланс часто посилювався інституційними інтересами щодо захисту конфіденційної та пропрієтарної інформації для отримання комерційного прибутку від патентів та закритих публікацій.

З розвитком руху термінологічний апарат еволюціонував та розширювався. Поряд із

терміном «Відкрита наука» з'явилися такі поняття, як «відкриті дослідження» (Open Research), що використовуються як ширша альтернатива для включення досліджень з мистецтва та гуманітарних наук поряд з традиційними STEM-дисциплінами (наука, технології, інженерія, математика). Також був запропонований термін «відкрита стипендія» або «відкрита академічна діяльність» (Open Scholarship), який має на меті охопити не лише дослідницькі практики, але й різні ролі, які дослідники виконують як освітяни, комунікатори та ментори.

На міжнародному рівні найбільш консенсусне визначення було закріплено в Рекомендаціях ЮНЕСКО щодо відкритої науки (2021) [3]. Згідно з нею, архітектура відкритої науки спирається на чотири ключові стовпи: відкриті наукові знання (публікації, дані, програмне та апаратне забезпечення), відкриті наукові інфраструктури, відкрите залучення суспільних діячів та відкритий діалог з іншими системами знань.

Парадигма FAIR: Архітектура та розвиток управління дослідницькими даними. У березні 2016 року групою авторів під егідою консорціуму FORCE11 було офіційно опубліковано керівні принципи FAIR для управління науковими даними. Принциповою інновацією принципів FAIR є зміщення фокусу з людини-дослідника на обчислювальні машини, акцентуючи увагу на здатності алгоритмів автоматично знаходити, отримувати доступ, інтегрувати та використовувати дані.

Принципи FAIR — це набір суворих правил, що формують архітектуру життєвого циклу цифрових активів [4]:

- **Відшукуваність (Findable).** Гарантує, що цифрові активи не загубляться. Даним присвоюються глобально унікальні та постійні ідентифікатори (PID, такі як DOI), вони описуються розширеними метаданими та реєструються у каталогах, придатних для автоматизованого пошуку.
- **Доступність (Accessible).** Визначає, як користувачі чи агенти отримують доступ. Метадані завантажуються через відкриті, стандартизовані комунікаційні протоколи (наприклад, HTTP), які можуть включати процедури авторизації. Метадані мають зберігатися навіть у разі втрати самих даних.
- **Сумісність (Interoperable).** Здатність даних інтегруватися. Вимагає використання формальної, спільної мови репрезентації знань, FAIR-словників та кваліфікованих посилань для побудови графів знань.
- **Багаторазовість (Reusable).** Метадані та дані забезпечуються машинно-зчитуваними ліцензіями, детальною історією походження та відповідають галузевим стандартам спільноти, гарантуючи їхню реплікацію з можливістю повторного використання в нових дослідженнях.

Відкриті дані проти FAIR-даних. Однією з небезпечних помилок є повне ототожнення принципів FAIR з Відкритими даними (Open Data). Літера «А» у FAIR означає «Доступний за чітко визначених умов» (Accessible under well-defined conditions), а не «Абсолютно відкритий».

Існують об'єктивні причини (конфіденційність пацієнтів, національна безпека, комерційна таємниця) для обмеження публічного доступу до даних. Жоден принципів FAIR не вимагає, щоб дані обов'язково були безкоштовними або відкритими для всіх. Це розмежування породило ключову вимогу європейської політики: «Настільки відкрито, наскільки можливо, настільки закрито, наскільки необхідно». FAIR-дані гарантують прозорість умов доступу, що дозволяє залучати корпоративний та медичний сектори без порушення прав.

Інфраструктурний ландшафт: європейська хмара відкритої науки (EOSC). В Європейському Союзі флагманською ініціативою стала Європейська хмара відкритої науки (EOSC), яка є одним із спільних європейських просторів даних [5]. Її стратегічна мета — створення «павутини FAIR-даних та послуг» для науковців Європи. EOSC не буде новою інфраструктурою з нуля, а федералізує вже існуючі бази, з'єднуючи їх через вузли (як-от перший загальноєвропейський EOSC EU Node). Проєкт фінансується через Horizon Europe

та керується через Тристоронню співпрацю (Єврокомісія, країни-члени ЄС, Асоціація EOSC), з безпрецедентним бюджетом у понад 1 мільярд євро.

Державна політика України у сфері Відкритої науки. Інтеграція України в ЄС стала каталізатором ухвалення Кабінетом Міністрів розпорядження № 892-р «Про затвердження Національного плану щодо відкритої науки». План передбачає ряд заходів, зокрема імплементацію Директиви ЄС про відкриті дані (зокрема, обов'язковий відкритий доступ до досліджень за бюджетні кошти), розробку електронних систем реєстрації дисертацій та інтеграцію показників відкритої науки у звітність ЗВО тощо [6].

Фундаментальним інструментом є *Національний репозитарій академічних текстів (НРАТ)* — державна розподілена електронна база дисертацій, статей і звітів, якою керує УкрІНТЕІ [7].

Інституційні ініціативи та міжнародні проекти в Україні. Через брак бюджетного фінансування ключові кроки робляться завдяки міжнародним грантам:

- Проект FAIRIO (ДНТБ та Німецька бібліотека TIB). Спрямований на розробку дорожньої карти інтеграції технологій CRIS та FAIR-принципів в Україні, включаючи навчання дата-стюардів.
- Проект OPTIMA (за програмою Erasmus+). Координується «Львівською політехнікою» і спрямований на боротьбу з академічною недоброчесністю шляхом впровадження онлайн-платформи *відкритого рецензування (Open Peer Review)*. Проект залучає переміщені університети та фокусується на прозорості науки.
- Окремі політики впроваджуються галузевими закладами, наприклад Концепція розвитку відкритої науки НАПН України (2025–2027) та політики Національного авіаційного університету.

Системні бар'єри та виклики імплементації в Україні. Процес імплементації в Україні стикається з глибокими системними викликами:

1. Відсутність цифрової інфраструктури (~35%). Гостра нестача репозитаріїв даних для сирих машинно-зчитуваних масивів.
2. Дефіцит фінансування (~25%). Брак коштів на оплату публікаційних зборів у журналах відкритого доступу, купівлю глобальних ідентифікаторів та утримання серверів.
3. Захист даних та нормативні обмеження (~15%). Побойовання щодо втрати інтелектуальної власності, відсутність єдиних вимог до наукових журналів.
4. Культурний спротив та низька обізнаність (~10%). Ототожнення відкритої науки виключно з безкоштовними статтями та відсутність знань про те, як технічно структурувати дані за FAIR.
5. Технічні / мовні бар'єри. Необхідність використання англomовних протоколів обміну метаданими для забезпечення видимості українських досліджень у семантичних алгоритмах Європи.

Крім того, існує ризик глобальної технологічної нерівності, коли науковці з країн з перехідною економікою отримують доступ до масивів FAIR-даних, але не мають обчислювальних потужностей чи компетенцій для їх обробки.

Висновки. Концепція «Відкритої науки» та її технологічний авангард — принципи FAIR, які кардинально змінюють глобальну архітектуру виробництва, оцінювання та розповсюдження наукового знання. Спостерігається незворотний перехід від застарілої моделі «наука як закритий продукт для одноразової публікації» до парадигми «наука як відкритий, прозорий, машинно-керований і безперервний процес співпраці». Цей розвиток має критичне значення для вирішення масштабних і складних викликів сучасності.

Принципи FAIR відіграють роль фундаментального мосту між людським інтелектом і штучним інтелектом. Найважливішим розумінням цих принципів є те, що FAIR-дані не вимагають безумовної публічності, що дозволяє інтегрувати в екосистему закриті, чутливі та комерційні дані, забезпечуючи їх суворий правовий захист.

Європейський Союз наразі є безумовним лідером цих технологічних трансформацій

завдяки потужним системним інвестиціям у розбудову Європейської хмари відкритої науки (EOSC) та створення вичерпного арсеналу метрик автоматизованого оцінювання.

Для України, яка прагне повноцінної інтеграції в Європейський дослідницький простір (ERA), беззаперечне впровадження цих стандартів стає питанням глобальної конкурентоспроможності. Прийняття Національного плану щодо відкритої науки, розвиток Національного репозитарію академічних текстів (НРАТ) та реалізація міжнародних проєктів (OPTIMA, FAIRIO) формують стійку платформу. Проте ліквідація розриву між політичними деклараціями та реальною технологічною спроможністю вимагатиме комплексного підходу: збільшення фінансування на створення національних репозитаріїв даних, системного перегляду критеріїв оцінювання праці дослідників, запровадження відкритого рецензування та інтеграції компетенцій з FAIR-менеджменту в обов'язкові програми підготовки наукових кадрів. Тільки завдяки консолідації зусиль держава зможе повноцінно стати частиною глобальної павутини FAIR-даних.

ЛІТЕРАТУРА

1. Open Science Isn't Always Open to All Scientists. URL: <https://www.americanscientist.org/article/open-science-isnt-always-open-to-all-scientists> (date of access: 14.04.2026)
2. Open science – Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Open_science (date of access: 14.04.2026)
3. UNESCO Recommendation on Open Science URL: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379949.locale=en> (date of access: 14.04.2026)
4. A Guide to the FAIR Principles | openscience.eu URL: <https://www.openscience.eu/article/infrastructure/guide-fair-principles> (date of access: 14.04.2026)
5. European Open Science Cloud (EOSC). URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/strategy/strategy-research-and-innovation/our-digital-future/open-science/european-open-science-cloud-eosc_en (date of access: 14.04.2026)
6. Концепція розвитку відкритої науки в НАПН України на 2024-2030 роки. URL: <https://naps.gov.ua/ua/press/announcements/3373/> (date of access: 14.04.2026)
7. ВІДКРИТА НАУКА, EOSC I DATAVERSEUA. Національний репозитарій академічних текстів. URL: <https://nrat.ukrintei.ua/vidkryta-nauka-eosc-i-dataverseua/> (date of access: 14.04.2026)

DEVELOPING MEDIATION COMPETENCE IN MARITIME ENGLISH THROUGH DIGITAL LEARNING ENVIRONMENTS

Shvetsova I.

*Kherson State Maritime Academy
(Ukraine)*

Introduction. Digital transformation and the international character of maritime professions continue to reshape approaches to foreign language education in maritime higher institutions. Contemporary maritime specialists are expected to operate effectively in multilingual crews, participate in intercultural professional interaction, and process information in rapidly changing communicative situations. Under these conditions, Maritime English instruction should focus not only on linguistic accuracy but also on learners' ability to support communication and mutual understanding in professional contexts.

Within the updated *CEFR Companion Volume*, mediation is regarded as one of the key dimensions of communicative competence [1]. In this study, mediation is considered in the context of Maritime English instruction for future navigators and involves interpreting professional information, reformulating specialised content, clarifying operational meanings, and facilitating interaction in multilingual maritime settings.

Despite the growing academic interest in mediation, its application in Maritime English education remains insufficiently investigated, particularly in relation to digitally supported learning environments. Moodle-based courses, simulation activities, and collaborative online interaction create favourable conditions for integrating mediation-oriented tasks into professional language training.

The *purpose of the study* is to examine the potential of digital learning environments for developing mediation competence in Maritime English instruction and to identify pedagogical approaches that support effective communication in multilingual maritime contexts.

The relevance of the study lies in contemporary transformations in maritime communication and the increasing role of digitally mediated interaction in professional education. Maritime specialists increasingly operate in multilingual and multicultural environments where effective communication requires not only linguistic competence but also the ability to explain, interpret, summarise, and coordinate professional interaction in complex operational contexts. These communicative demands correspond to the mediation-oriented practices emphasised in the *CEFR Companion Volume* [1]. In the context of Maritime English education, this creates the need for pedagogical approaches capable of developing future navigators' ability to relay professional information, facilitate intercultural interaction, and participate effectively in digitally supported maritime communication.

Recent studies in applied linguistics and ESP pedagogy emphasise the need to integrate mediation-oriented approaches into professional language training. Nevertheless, the practical implementation of mediation descriptors in Maritime English education remains insufficiently explored. Existing research mainly focuses on general communicative competence, whereas limited attention has been devoted to digitally supported mediation activities designed specifically for maritime educational contexts.

At the same time, the development of digital educational technologies creates new opportunities for mediation-oriented instruction. Moodle platforms, simulation-based learning, and collaborative online international learning (COIL) support authentic professional interaction and contribute to flexible, inclusive, and sustainable approaches to higher education. In this regard, the integration of mediation competence into Maritime English training represents both a pedagogical challenge and a promising direction for contemporary ESP research.

Problem Statement. In the context of Maritime English education, mediation may be understood as the ability of future navigators to interpret, reformulate, clarify, and communicate professional maritime information effectively within multilingual crews and digitally mediated

professional environments. Such mediation practices involve processing navigational instructions, explaining technical procedures, facilitating intercultural interaction, and ensuring mutual understanding in communication related to maritime safety and professional cooperation.

For the purposes of this study, mediation competence in Maritime English is defined as an integrated communicative ability that enables future navigators to facilitate professional interaction, transfer specialised maritime information, and support collaborative communication in multicultural and digital learning contexts.

Despite the growing interest in mediation-oriented pedagogy and plurilingual communication within contemporary language education [2; 3], the practical integration of mediation descriptors into digitally supported Maritime English instruction remains insufficiently developed. Current Maritime English research traditionally focuses on professional terminology, standard operational communication, and safety-related interaction, while mediation-oriented communicative activities in digital learning environments receive comparatively limited attention. This creates the need for methodological approaches capable of adapting CEFR mediation principles to professionally oriented Maritime English training for future navigators.

Results. The study demonstrates that digital learning environments create favourable conditions for the development of mediation competence in Maritime English education. The integration of Moodle-based instruction, simulation-oriented communication tasks, and collaborative online international learning (COIL) activities enables students to participate in professionally relevant interaction requiring interpretation, reformulation, and transfer of maritime information in multilingual settings.

Particular attention was given to mediation-oriented activities aligned with selected descriptors from the *CEFR Companion Volume* [1], including relaying specific information, processing professional texts, facilitating communication in group interaction, and explaining technical content to participants with different linguistic backgrounds. These activities were incorporated into digitally supported Maritime English tasks connected with navigational communication, safety procedures, and professional problem-solving scenarios.

Table 1 — Mapping CEFR Mediation Descriptors to Digital Maritime English Activities

CEFR Mediation Descriptor	Maritime English Activity	Digital Learning Tool	Expected Learning Outcome
Relaying specific information	Transmitting navigational instructions during simulated bridge communication	Moodle forum / simulation platform	Accurate transfer of professional information
Processing text	Summarising safety regulations and technical manuals	Moodle assignments / collaborative documents	Development of professional text mediation skills
Facilitating communication in group interaction	Coordinating multicultural crew discussions during emergency scenarios	COIL activities / breakout discussions	Intercultural communication and collaborative interaction
Explaining data	Interpreting weather reports and voyage plans for crew members	Interactive presentations / Moodle quizzes	Ability to clarify and adapt technical information
Mediating concepts	Collaborative problem-solving in maritime case studies	Online simulations / group projects	Development of analytical and communicative mediation skills

Source: developed by the author based on the *CEFR Companion Volume* [1].

The proposed mapping demonstrates how CEFR mediation descriptors can be integrated into digitally supported Maritime English instruction through professionally oriented communicative activities. The combination of simulation-based tasks, online interaction, and mediation-oriented communication practices creates opportunities for practising specific communicative actions relevant to Maritime English, including relaying navigational information, summarising safety-related texts, explaining operational data, and facilitating group interaction in professional scenarios. Within Moodle-based and simulation-supported environments, such tasks may contribute to the development of intercultural awareness, collaborative problem-solving, and professional communicative competence required in contemporary maritime contexts. Therefore, the proposed approach should be understood not as a universal solution for developing communicative competence, but as a pedagogical framework for organising selected mediation-oriented activities in Maritime English education.

The study suggests that digitally mediated ESP instruction may broaden traditional approaches to Maritime English training by incorporating mediation-oriented communicative practices into professional language education. In this regard, the proposed approach highlights the pedagogical relevance of combining CEFR mediation principles with digital learning technologies in maritime higher education contexts.

Conclusions. The obtained results confirm that digital learning environments provide effective pedagogical conditions for the development of mediation competence in Maritime English education. The integration of mediation-oriented tasks into Moodle-based instruction and simulation-supported communication activities contributes to communicative flexibility, intercultural interaction, and collaborative problem-solving skills essential for future maritime professionals.

The proposed approach demonstrates the pedagogical potential of combining CEFR mediation principles with digitally supported ESP instruction and may be applied in the further development of mediation-oriented Maritime English courses and digitally supported professional communication training.

REFERENCES

1. Common European Framework of Reference for Languages: Learning, Teaching, Assessment. Companion Volume. Strasbourg: Council of Europe Publishing, 2020. 235 p.
2. North B., Piccardo E. Developing illustrative descriptors of aspects of mediation for the CEFR. *Language Teaching*. 2016. Vol. 49, Issue 3. P. 455–459.
3. Piccardo E. Plurilingualism and mediation within the CEFR. *Journal of e-Learning and Knowledge Society*. 2019. Vol. 15, Issue 1. P. 9–19.

СЕКЦІЯ:

**ПРОБЛЕМИ ВПРОВАДЖЕННЯ «ЗЕЛЕНОГО»
ТРАНСПОРТУ: ДЖЕРЕЛА ТА НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ,
НОВІТНІ МАТЕРІАЛИ, БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

SECTION:

**IMPLEMENTING «GREEN TRANSPORT»: ENERGY SOURCES
AND STORAGE DEVICES, LATEST MATERIALS, OPERATIONAL
SAFETY**

АНАЛІЗ ОБМЕЖЕНЬ ПРИ РЕМОНТІ КОРОЗІЙНИХ ДЕФЕКТІВ НАПЛАВЛЕННЯМ НА ДІЮЧИХ ГАЗОНАФТОПРОВОДАХ

¹Біщак Р.Т., ²Сапронов О.О., ³Lasenko I., ²Брайло М.В.

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
(Україна)

²Херсонська державна морська академія
(Україна)

³Riga Technical University
(Latvia)

Вступ. Магістральні газо- та нафтопроводи є одним із найбільш ефективних і безпечних способів транспортування енергоносіїв на великі відстані. Водночас тривала експлуатація трубопровідних систем супроводжується розвитком корозійних процесів, деградацією металу та накопиченням дефектів, що можуть призводити до аварійних ситуацій, значних економічних втрат і негативного впливу на довкілля. Одним із найбільш поширених способів відновлення працездатності трубопроводів є ремонт методом наплавлення без виведення об'єкта з експлуатації. Однак виконання таких робіт в умовах дії внутрішнього тиску та транспортування продукту суттєво ускладнює контроль теплових, структурних і механічних процесів у місці ремонту [1–4].

Постановка задачі. Проаналізувати основні технологічні та експлуатаційні обмеження, що виникають при ремонті корозійних дефектів методом наплавлення на діючих газонафтопроводах, а також визначити фактори, які впливають на надійність і довговічність відремонтованих ділянок.

Результати досліджень. Встановлено, що ремонт корозійних дефектів на діючих магістральних нафтогазопроводах методом наплавлення потребує комплексного врахування теплових, металургійних і механічних процесів у реальних експлуатаційних умовах. Такий ремонт виконується без виведення трубопроводу з експлуатації, що принципово ускладнює контроль процесів і підвищує ризики. Ключовою проблемою є ризик пропалу стінки трубопроводу. Під час наплавлення в локальній зоні формується інтенсивне джерело тепла, яке може знизити міцність металу до критичного рівня. Особливо небезпечна ситуація виникає при малій залишковій товщині стінки в зоні корозійного дефекту. З одного боку, внутрішній потік продукту (газ або нафта) виконує функцію охолодження, створюючи тепловідвід, але з іншого – формує значні температурні градієнти, що можуть призвести до локальної втрати стійкості матеріалу [3–5]. Таким чином, виконавці робіт стикаються з необхідністю точного балансу тепловкладення.

Не менш важливим аспектом є формування внутрішніх та залишкових напружень, що пов'язано з нерівномірним нагрівом і охолодженням металу. У процесі наплавлення матеріал локально розширюється, а потім стискається, що призводить до складного напружено-деформованого стану. У результаті виникають розтягуючі залишкові напруження, які знижують опір руйнуванню і можуть ініціювати тріщини. Це явище має вирішальне значення для оцінки довговічності відремонтованої ділянки.

Тепловий вплив під час наплавлення зумовлює структурно-фазові перетворення у зоні ремонту, що може призводити до утворення локальних ділянок із підвищеною твердістю та крихкістю. Формування мартенситних структур супроводжується зниженням ударної в'язкості та зростанням ризику крихкого руйнування металу. Ефективним способом зменшення таких негативних явищ є регулювання швидкості охолодження і попередній підігрів металу.

Окрему проблему становить контроль тепловкладення. Тепловкладення визначається параметрами зварювання — струмом, напругою і швидкістю переміщення дуги. Надмірне тепловкладення може призвести до пропалів або перегрівання стінки трубопроводу, тоді як недостатнє — до утворення дефектів непровару та зниженої локальної міцності. У реальних умовах експлуатації цей параметр необхідно жорстко контролювати, часто із застосуванням математичного моделювання.

Суттєвий вплив, при виконанні робіт, має також внутрішнє середовище

трубопроводу. Потік продукту визначає інтенсивність тепловідведення, а також може впливати на подальші корозійні процеси. У випадку газопроводів додатковим фактором ризику є вибухонебезпечність, що створює обмеження на технологію виконання робіт.

Проблема сумісності матеріалів також має принципове значення. Наплавлений метал може мати інший хімічний склад і механічні властивості, ніж основний матеріал труби. Різниця коефіцієнтів теплового розширення і фазового складу може призводити до утворення внутрішніх напружень і мікротріщин [5–9].

При ремонті тривалоексплуатованого трубопроводу необхідно враховувати структурну деградацію матеріалу, що призводить до необхідності зішліфовування поверневих шарів перед виконанням наплавлення. Під час наплавлення металу на корозійний дефект в метал дифундує водень із вологи, флюсів або покриття електродів. У поєднанні з високими залишковими напруженнями це може призвести до утворення холодних тріщин, особливо у зоні термічного впливу. Цей ефект є критичним для високоміцних трубних сталей, які широко застосовуються в магістральних трубопроводах.

Висновки. Встановлено, що ремонт корозійних дефектів методом наплавлення на діючих газонафтопроводах супроводжується комплексом взаємопов'язаних теплових, металургійних і механічних процесів, які визначають надійність відремонтованої ділянки. Основними обмеженнями є ризик пропалу стінки трубопроводу, формування залишкових напружень, структурна деградація металу та утворення холодних тріщин. Доведено, що забезпечення довговічності трубопровідних систем потребує комплексного контролю тепловкладення, оптимізації режимів наплавлення та застосування методів чисельного моделювання для прогнозування напружено-деформованого стану і структурних змін у зоні ремонту.

Роботу виконано за фінансової підтримки гранту Національного фонду досліджень України («Підвищення надійності обладнання газо-нафтотранспортного комплексу шляхом впровадження алгоритмів діагностування їх технічного стану та застосування новітніх полімерних матеріалів»). Реєстраційний номер проекту 2025.07/0008).

ЛІТЕРАТУРА

1. Belvederesi C., Thompson M.S., Komers P.E. (2018). Statistical analysis of environmental consequences of hazardous liquid pipeline accidents. *Heliyon* 4 (11), e00901.
2. Bubbico R. (2018). A statistical analysis of causes and consequences of the release of hazardous materials from pipelines. The influence of layout. *J. Loss Prev. Process Ind.* 56, 458–466.
3. Shahriar, A., Sadiq, R., Tesfamariam, S. (2012). Risk analysis for oil & gas pipelines: a sustainability assessment approach using fuzzy based bow-tie analysis. *J. Loss Prev. Process Ind.* 25 (3), 505–523.
4. Singh, M., Markeset, T., (2009). A methodology for risk-based inspection planning of oil and gas pipes based on fuzzy logic framework. *Eng. Fail. Anal.* 16 (7), 2098–2113.
5. Krasovskii A. Ya., Lokhman I. V., Orynyak I. V. (2012). Stress-corrosion failures of main pipelines. *Strength of Materials.* 44(2), 129-143.
6. Tsyrl'nyk O. T., Voloshyn V. A., Petryna D. Yu., Hredil' M. I., Zvirko O. I. (2011). Degradation of properties of the metal of welded joints in operating gas mains. *Materials Science.* 46(5), 628-632.
7. Tsyrl'nyk O. T., Kryzhanivs'kyi E. I., Petryna D. Yu., Taraevs'kyi O. S., Hredil' M. I. (2004). Susceptibility of a welded joint of 17G1S steel in a gas main to hydrogen embrittlement. *Materials Science.* 40(6), 844-849.
8. Khotinov V.A., Farber V.M., Morozova A.N., Valov M.A., Sharipov G.A. (2014). Structure and mechanical properties of welded joints of gas transmission pipes. *Metal Science and Heat Treatment.* 56(5), 315-319.
9. Pang S., Chen W., Wang W. (2014). A quantitative model of keyhole instability induced porosity in laser welding of titanium alloy. *Metall. Mater. Trans. A* 45. 2808–2818.

АНАЛІЗ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НАНОСЕКУНДНИХ РОЗРЯДІВ У ПОВІТРЯНИХ БУЛЬКАХ У ВОДІ ПРИ ЇЇ ЗНЕЗАРАЖЕННІ

¹Бойко М.І., ²Макогон А.В.

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
(Україна)

²Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України
(Україна)

Вступ. Високовольтні імпульсні плазмові розряди генерують активні частинки, сильні електричні поля, ультрафіолетове випромінювання та ударні хвилі, швидкі електрони, які сприяють високому ступеню знезараженню води. Доцільно генерувати такі розряди поблизу поверхні води або в повітряних бульках у ній, що дозволяє локалізувати і посилювати плазмову взаємодію на границі розділу фаз, де всі діючі фактори розряду безпосереднього потрапляють у воду. Оскільки процеси відбуваються в наносекундному часовому діапазоні, а доступ до дороговартісного експериментального обладнання часто є обмеженим, виникає необхідність у розробленні математичних моделей, які б дали змогу цілісно описати перебіг цих явищ на основі наявних експериментальних даних.

Актуальність досліджень обумовлена необхідністю створення новітніх методів знезараження баластних вод, які б відповідали сучасним екологічним вимогам і міжнародним стандартам [1, 2]. Аналіз характеристик таких розрядів, їх особливостей і механізмів впливу на водне середовище є необхідним етапом для обґрунтування ефективності цієї технології та її подальшого використання у системах обробки баластних вод.

Постановка задачі. Для подальшого моделювання та розроблення плазмохімічних моделей формування наносекундного стримера у багатофазній системі перед авторами постало завдання проаналізувати експериментальні фотографії та отриманні результати з урахуванням даних інших дослідників.

Результати досліджень. На фотографіях на рис.1 продемонстровані фото наносекундних розрядів в бульках у воді під час її знезараження, де в область розряду подають атмосферне повітря. Вони були зафіксовані на експериментальному обладнанні, детально описаному в роботі [3]. У таких розрядах амплітуда напруги може сягати 30-40 кВ, струму — 90-100 А, тривалість імпульсу — близько 70 нс, з фронтом 10 нс, з частотою повторення імпульсів ~ 2300 імпульсів за секунду.



Рисунок 1 – Фото експериментальних наносекундних розрядів в повітряних бульках у воді при її знезараженні

Фото на рис. 1 являють собою інтегральні зображення, де спостерігається сукупний ефект різної інтенсивності іонізації, розвитку стримерів, перерозподілу яскравості плазми,

які накладаються в один кадр. Для розділення цих стадій у часі потрібні спеціальні дороговартісні високошвидкісні методи зйомки.

Проведений літературний аналіз низки наукових праць зі спектроскопії високовольтних розрядів [4–8] і порівняння з кольоровою гамою експериментальних фотографій дає змогу зробити лише попередні висновки, які створять основу для розробки адекватних базових плазмохімічних моделей розвитку імпульсного розряду у повітряній бульбці.

Синьо-фіолетові відтінки в зоні стримерів, що розвиваються в повітряній бульбці, можна пов'язати з випромінюванням молекулярного азоту N_2 , насамперед смуг другої позитивної системи N_2 (SPS, приблизно 300–430 нм), а також іонізованого молекулярного азоту N_2^+ – смуг першої негативної системи N_2^+ (FNS, приблизно 380–480 нм). Серед них автори найчастіше виділяють компоненти 391,4 нм та 427,8 нм.

Лілові відтінки на фото, ймовірно, із-за накладання кількох спектральних компонент. У водовмісній плазмі експериментально спостерігають також випромінювання атомарного водню H, для якого характерні лінії серії Бальмера: H_α — 656,3 нм, H_β — 486,1 нм, H_γ — 434,1 нм, H_δ — 410,2 нм і H_ϵ — 397,0 нм [8].

Жовто-помаранчеві та червонуваті ділянки можуть бути пов'язані з випромінюванням молекулярного азоту N_2 у довгохвильовій області, зі смугами першої позитивної системи N_2 (FPS), що простягаються приблизно від 550 нм у червону та ближню інфрачервону область.

Для повітряно-водної плазми в статтях інших дослідників експериментально підтверджено і випромінювання гідроксильного радикала OH — смугу переходу OH(A–X) поблизу 306–310 нм, а також випромінювання оксиду азоту NO — γ -систему в діапазоні 200–270 нм. Молекулярний кисень O_2 та його іонізовані форми O_2^+ також проявляються в ультрафіолетовій області, орієнтовно в діапазоні 175–250 нм. Для атомарного кисню O(I) характерні лінії поблизу 777 та 844 нм, а для атомарного азоту N(I) — поблизу 746 та 822 нм.

Такий опис узгоджується з уявленнями про розвиток високовольтного розряду у повітрі, де у зонах максимальної напруженості електричного поля відбуваються найінтенсивніші процеси ударної іонізації та збудження, що може проявлятися посиленням випромінювання у фіолетово-синій області спектра.

Висновки. Для уточнення інтерпретації фотографій потрібні подальші експериментальні та теоретичні дослідження, які дадуть змогу прояснити механізми розвитку наносекундних розрядів у повітряних бульбах у воді та вдосконалити розрахункові моделі цих процесів для їх подальшого використання в екологічних і енергоощадних технологіях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко М. І., Макогон А. В. Метод обробки рідин за допомогою високовольтних імпульсних розрядів для знезараження баластних вод. Збірник матеріалів XVI Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (MINTT – 2024), м. Одеса, 2024. С. 388–389.
2. Бойко М. І., Макогон А. В. Електрофізичні технології для знезараження баластних вод. Збірник матеріалів XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (MINTT – 2025), м. Одеса, 2025. С. 372–375.
3. Boyko N. I., Makogon A. V. High voltage plant with 3 MW pulse power for disinfection flow of water by nanosecond discharges in gas bubbles. *Technical Electrodynamics*. 2020. No. 5. Pp. 80–83.
4. Horst R. M. van der, Verreycken T., Veldhuizen E. M., Bruggeman P. J. Time-resolved optical emission spectroscopy of nanosecond pulsed discharges in atmospheric pressure N_2 and N_2/H_2O mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2012. Vol. 45, No. 34. P. 1–11. Art.

345201.

5. Sun J., Ba Y., Ravelid J., Nilsson S., Konnov A. A., Ehn A. Application of emission spectroscopy in plasma-assisted NH_3 /air combustion using nanosecond pulsed discharge. Combustion and Flame. 2024. Vol. 263. Art. 113400.

6. Bruggeman P. J. et al. Plasma–liquid interactions: a review and roadmap. Plasma Sources Science and Technology. 2016. Vol. 25, No. 5. Art. 053002.

7. Shydlovska N. A., Zakharchenko S. M., Zakharchenko M. F., Kulida M. A., Zakusilo S. A. Spectral and optic-metric methods of monitoring parameters of plasma channels caused by discharge currents between metals granules in working liquids. Electrical Engineering & Electromechanics. 2024. No. 6. Pp. 72–83.

ТЕРМОСТІЙКІ ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

Букетов А.В., Сапронова Л.О.

*Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Надійність трубопроводів газо-нафтотранспортного комплексу значною мірою визначається технічним станом їх зовнішніх і внутрішніх поверхонь. Тривала експлуатація трубопроводів супроводжується розвитком корозійних пошкоджень, утворенням тріщин, локальних деформацій та деградацією зварних з'єднань, що призводить до зниження міцності та підвищення ризику аварійних ситуацій. Одним із перспективних напрямів відновлення працездатності трубопроводних систем є використання полімерних композитів для створення бандажних виробів, здатних забезпечувати локальне підсилення пошкоджених ділянок без зупинки транспортування енергоносіїв.

Постановка задачі. Дослідити теплофізичні характеристики наномодифікованих епоксидних композитів, призначених для ремонту трубопроводів газо-нафтотранспортного комплексу.

Результати досліджень. Для формування полімерних матеріалів використовували епоксидний олігомер ЕД-20, отверджений поліетиленполіаміном (ПЕПА). Як функціональні модифікатори застосовували триметоприм (5–15 мас.ч.) та нанодисперсну фулерено-сажову суміш (0,050 мас.ч.). Методом термогравіметричного аналізу (ТГА) встановлено, що введення бідисперсної системи наповнювачів забезпечує підвищення температури початку втрати маси композитів з $T_0 = 587$ К для немодифікованої матриці до $T_0 = 634$ – 642 К для розроблених матеріалів. Максимальні показники термостійкості характерні для композиції, яка містить 10 мас.ч. триметоприму та 0,050 мас.ч. фулерено-сажової суміші. Для даного складу встановлено зниження відносної втрати маси до $\varepsilon_m = 54$ % та підвищення температури максимального термоокислювального ефекту до $T_{max} = 568$ К.

На основі математичного опрацювання результатів термогравіметричного аналізу методом Бройдо визначено енергію активації термічної деструкції полімерів, ска становить $E_a = 175$ кДж/моль. Це свідчить про формування більш стабільної та щільно зшитої полімерної структури з підвищеною стійкістю до термічного впливу. Підвищення термостійкості пояснюється синергічною дією трьох механізмів: бар'єрного ефекту нанодисперсного наповнювача, який обмежує дифузію кисню; додаткового хімічного зшивання за участю аміногруп триметоприму; а також фізичної π – π -взаємодії між ароматичними структурами триметоприму та графітоподібною поверхнею наночасток. Це сприяє зменшенню сегментальної рухливості макромолекул та стабілізації полімерної матриці в умовах підвищених температурних навантажень.

Висновки. Встановлено, що модифікація епоксидної матриці триметопримом і нанодисперсною фулерено-сажовою сумішшю забезпечує підвищення термічної стабільності полімерних композитів, що підтверджується збільшенням температури початку деструкції на 47–55 К та підвищенням енергії активації термічної деструкції. Доведено, що розроблені наномодифіковані епоксидні композити доцільно використовувати як матеріал для ремонту трубопроводів газо-нафтотранспортного комплексу, які експлуатуються в умовах підвищених температурних навантажень.

Роботу виконано за фінансової підтримки гранту Національного фонду досліджень України («Підвищення надійності обладнання газо-нафтотранспортного комплексу шляхом впровадження алгоритмів діагностування їх технічного стану та застосування новітніх полімерних матеріалів»). Реєстраційний номер проєкту 2025.07/0008).

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ І БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ «ЗЕЛЕНОГО» ТРАНСПОРТУ: ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ

Гриценко Н.В., Козодой Д.С.

*Український державний університет залізничного транспорту
(Україна)*

Вступ. Глобальні кліматичні зміни, зростання вартості традиційних енергоресурсів та посилення міжнародних екологічних вимог зумовлюють необхідність трансформації транспортної галузі у напрямі декарбонізації та підвищення енергоефективності. Транспорт є одним із найбільших споживачів викопного палива та джерел викидів парникових газів, що формує потребу в розвитку так званого «зеленого» транспорту - систем перевезень, заснованих на використанні відновлюваних джерел енергії, електротяги, водневих технологій та інноваційних матеріалів.

Разом із перевагами екологізації транспорту постають питання безпеки експлуатації нових технологій, довговічності накопичувачів енергії, стабільності енергопостачання та економічної доцільності впровадження інноваційних рішень. У цьому контексті особливої ваги набуває комплексний підхід до оцінки енергоефективності та безпеки «зеленого» транспорту з урахуванням технічних і економічних чинників.

Актуальність досліджень. Актуальність дослідження зумовлена зростаючими вимогами до скорочення викидів CO₂, підвищення енергетичної незалежності держав і забезпечення стійкості транспортної інфраструктури. У межах європейської кліматичної політики та глобального переходу до низьковуглецевої економіки транспортна система зазнає структурних змін, що передбачають активне впровадження електромобілів, гібридних транспортних засобів, водневих поїздів і використання альтернативних видів палива.

Постановка задачі. Умови переходу транспортної галузі до низько-вуглецевої моделі розвитку зумовлюють необхідність комплексного дослідження взаємозв'язку між енергоефективністю та безпекою експлуатації «зеленого» транспорту з урахуванням технологічних і економічних чинників. Незважаючи на активне впровадження електричних, гібридних і водневих транспортних засобів, залишається низка невирішених питань, пов'язаних із підвищенням ефективності використання енергоресурсів, забезпеченням надійності накопичувачів енергії, мінімізацією технічних ризиків та обґрунтуванням економічної доцільності інноваційних рішень.

Перехід до «зеленого» транспорту супроводжується низкою проблем: високою вартістю інфраструктури зарядних станцій, обмеженим ресурсом акумуляторних батарей, ризиками перегріву та пожежонебезпечності накопичувачів енергії, складністю утилізації відпрацьованих елементів живлення, а також значними початковими інвестиційними витратами. Водночас забезпечення безпеки експлуатації є критичним чинником довіри користувачів і стабільності функціонування транспортної системи. Тому дослідження взаємозв'язку між енергоефективністю, технологічною надійністю та економічною доцільністю впровадження «зеленого» транспорту є важливим науковим і практичним завданням.

Метою дослідження є формування науково обґрунтованого підходу до забезпечення енергоефективної та безпечної експлуатації «зеленого» транспорту на основі поєднання сучасних технологічних рішень і економічних механізмів управління.

Результати досліджень. На сьогоднішній день ключовими напрямками розвитку «зеленого» транспорту є електрифікація, використання водневих паливних елементів та впровадження гібридних систем. Найбільш поширеними накопичувачами енергії залишаються літій-іонні акумулятори, які характеризуються високою питомою енергоємністю та тривалим циклом експлуатації. Водночас вони потребують вдосконалення систем терморегуляції та захисту від короткого замикання. Перспективними

є твердотільні акумулятори, що забезпечують підвищену безпеку та більшу щільність енергії [4].

У сфері водневого транспорту значну увагу приділяють безпечному зберіганню та транспортуванню водню під високим тиском. Технологічні рішення передбачають використання композитних матеріалів підвищеної міцності та систем багаторівневого контролю герметичності.

Застосування легких композитних матеріалів (алюмінієвих сплавів, карбонових волокон) дозволяє зменшити масу транспортних засобів, що безпосередньо впливає на зниження споживання енергії та підвищення енергоефективності [3].

З економічної точки зору впровадження «зеленого» транспорту супроводжується значними початковими витратами, однак у довгостроковій перспективі забезпечує зниження експлуатаційних витрат за рахунок економії палива, зменшення витрат на технічне обслуговування та скорочення екологічних платежів.

Економічна складова безпеки експлуатації «зеленого» транспорту відображає взаємозв'язок між рівнем технічної надійності, ризиками аварійності та фінансовими результатами діяльності підприємства. Безпека в цьому контексті розглядається не лише як технічна характеристика, а як економічний чинник, що впливає на витрати життєвого циклу транспортного засобу, інвестиційну привабливість та стабільність грошових потоків.

Базовим показником є сукупні витрати життєвого циклу (*Life Cycle Cost, LGK*) формула 1 [2]:

$$LGK = K_{\text{кан}} + E_B + B_{\text{оп}} + R_B + V_{\text{рес}} \quad (1)$$

де $K_{\text{кан}}$ — капітальні інвестиції (придбання рухомого складу, накопичувачів енергії, інфраструктури);

E_B — експлуатаційні витрати (електроенергія, водень, інші ресурси);

$B_{\text{оп}}$ — витрати на технічне обслуговування та ремонт;

R_B — очікувані втрати від ризиків і аварій;

$V_{\text{рес}}$ — залишкова вартість активу.

Економічна безпека безпосередньо залежить від мінімізації складової витрат від ризиків і аварій, яка визначається як математичне очікування можливих втрат:

$$R_B = \sum_{i=1}^n P_i \cdot L_i ,$$

де P_i — ймовірність настання i -го небезпечного сценарію (пожежа акумулятора, відмова системи охолодження, витік водню тощо);

L_i — фвєличина збитків у разі його реалізації (ремонт, простої, штрафи, компенсації).

Зменшення P_i досягається шляхом інвестування у системи моніторингу, автоматичного захисту та навчання персоналу. Економічна доцільність таких інвестицій оцінюється через співвідношення витрат на безпеку (C_{safe}) та зменшення очікуваних збитків, формула 2:

$$E_{\text{ff}} = \Delta C_r - C_{\text{safe}} , \quad (2)$$

де ΔC_r — скорочення очікуваних втрат завдяки впровадженню заходів.

Якщо $E_{\text{ff}} > 0$, інвестиції в безпеку є економічно виправданими.

Важливим показником є коефіцієнт технічної готовності рухомого складу, який визначається за формулою 3:

$$K_{\text{tg}} = \frac{T_{\text{work}}}{T_{\text{work}} + Y_{\text{dow}}} , \quad (3)$$

де T_{work} — час фактичної роботи;

Y_{dow} — час простою через несправності.

Підвищення безпеки зменшує час простою через несправності, що збільшує доходи від перевезень та має вигляд 4:

$$D = Q \cdot t \cdot K_{tg}, \quad (4)$$

де Q — середній обсяг перевезень за одиницю часу;

t — тарифна ставка.

Таким чином, безпечна експлуатація безпосередньо впливає на зростання доходів. Треба відзначити, що актуальність безпечної експлуатації «зеленого» транспорту зумовлена активним впровадженням новітніх енергетичних технологій, електричних та водневих систем, сучасних накопичувачів енергії, високовольтного обладнання, які, поряд із екологічними перевагами, створюють нові технічні та виробничі ризики [1]. Забезпечення безпеки є критично важливим для запобігання аваріям, пожежам, витокам небезпечних речовин і технічним відмовам, що можуть призвести до людських жертв, матеріальних збитків та втрати довіри до інноваційного транспорту. Крім того, високий рівень експлуатаційної безпеки сприяє стабільності транспортного процесу, безперервності перевезень і фінансовій стійкості підприємств. У контексті сталого розвитку безпечна експлуатація «зеленого» транспорту є необхідною умовою його широкого впровадження, соціального прийняття та ефективної інтеграції в національну транспортну систему.

Окремо враховується економія від підвищення енергоефективності, яка має стратегічне значення для розвитку транспорту, оскільки безпосередньо впливає на зниження експлуатаційних витрат і підвищення фінансової стійкості транспортних підприємств. Підвищення енергоефективності зменшує навантаження на енергетичну інфраструктуру, продовжує строк служби обладнання та знижує витрати на технічне обслуговування. Для транспортних підприємств це створює можливість оптимізувати собівартість перевезень, підвищити рентабельність діяльності та спрямувати вивільнені кошти на модернізацію рухомого складу й інфраструктури. У ширшому масштабі енергоефективність сприяє зміцненню енергетичної незалежності держави, зменшенню екологічних витрат та підвищенню конкурентоспроможності національної транспортної системи. Економія від підвищення енергоефективності за формулою 5:

$$G_{energ} i = E \cdot P_e \quad (5)$$

де E — обсяг спожитої енергії;

P_e — ціна енергоносія.

Зниження питомого енергоспоживання ($кВт \cdot год \cdot км$) через впровадження сучасних накопичувачів і систем контролю дозволяє скоротити G_{energy} , що позитивно впливає на рентабельність. Загальна формала визначення рентабельності має вигляд 6:

$$W_{prof} = \frac{P_{profit}}{Costs} \quad (6)$$

Отже, економічна складова безпеки експлуатації «зеленого» транспорту полягає у зменшенні ризикових втрат, підвищенні технічної готовності, скороченні енергетичних витрат та оптимізації витрат життєвого циклу. Інвестиції в системи безпеки, цифровий моніторинг і підготовку персоналу мають розглядатися як стратегічний інструмент підвищення фінансової стійкості та конкурентоспроможності транспортних підприємств. Ефективність реалізації екологічних транспортних програм значною мірою залежить від державної підтримки, стимулювання інвестицій, податкових пільг та розвитку відповідної інфраструктури. Крім того, інтеграція відновлюваних джерел енергії у транспортну систему підвищує рівень енергетичної незалежності та знижує ризики коливання цін на традиційні енергоносії.

Важливим результатом дослідження є визначення необхідності комплексного

управління ризиками, що включає технічний моніторинг стану накопичувачів енергії, впровадження стандартів безпеки, навчання персоналу та використання цифрових систем контролю.

Висновок. У результаті проведеного дослідження встановлено, що енергоефективність і безпека експлуатації є взаємопов'язаними складовими розвитку «зеленого» транспорту. Підвищення енергоефективності досягається завдяки використанню сучасних джерел енергії, удосконаленню систем накопичення, впровадженню легких конструкційних матеріалів та цифрових технологій управління. Безпека експлуатації потребує розроблення комплексних технічних стандартів, систем моніторингу та контролю ризиків, пов'язаних із використанням новітніх енергетичних технологій. З економічної точки зору перехід до «зеленого» транспорту є доцільним за умови державної підтримки, розвитку інфраструктури та формування сприятливого інвестиційного середовища. У стратегічній перспективі екологізація транспортної галузі сприятиме зменшенню енергетичної залежності, підвищенню конкурентоспроможності економіки та забезпеченню екологічної безпеки держави. Інтеграція технологічних інновацій та економічних механізмів стимулювання є ключовою умовою формування безпечної, енергоефективної та сталої транспортної системи майбутнього.

ЛІТЕРАТУРА

1. Костюк С.М., Петренко О.В. Прогнозування енергоспоживання з використанням хмарних технологій. Вісник енергетики, 2020, 45(2). С. 52–63.
2. Міронов Д.В. Електричні та гібридні транспортні засоби. Методичні вказівки до виконання практичних робіт. Тернопіль: ТНТУ, 2024. 65 с.
3. Петренко В.В., Соловйов О.П. Аналіз стабільності енергетичних мереж: методи і моделі. Енергетична безпека, 2021, 7(3). С. 14–22.
4. IISD — Green Reconstruction of Ukraine: Міжнародна ініціатива сталого відновлення України. URL: <https://www.iisd.org/projects/greenreconstruction-of-ukraine> (дата звернення 16.02.2026).
5. Smith, J., Taylor, P. Advanced Algorithms for Cloud-Based Energy Optimization. Renewable Energy, 2022, 163: 127–139.

АНТИКОРОЗІЙНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПОВЕРХОНЬ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

¹Даниленко Д.О., ²Даниленко О.Б., ¹Торопенко В.В., ¹Банга М.М.

¹Херсонська державна морська академія
(Україна)

²Дунайський інститут національного університету «Одеська морська академія»
(Україна)

Вступ. Експлуатація поверхонь транспортних засобів, зокрема елементів навігаційного обладнання, палубних механізмів і металоконструкцій, супроводжується впливом агресивних середовищ та органічних розчинників. Проникнення полярних компонентів у структуру полімерного покриття призводить до набухання, руйнування міжмолекулярних зв'язків та зниження бар'єрних властивостей матеріалу. У зв'язку з цим актуальним є розроблення епоксидних композиційних покриттів із підвищеною стійкістю до дії органічних розчинників і здатністю зберігати експлуатаційні характеристики упродовж тривалого періоду експлуатації [1–2].

Постановка задачі. Дослідити антикорозійні характеристики модифікованих епоксидних покриттів у середовищі ацетону.

Результати досліджень. Для формування захисних покриттів використовували епоксидний олігомер ЕД-20, отверджений поліетиленполіаміном (ПЕПА). Як модифікуючі добавки застосовували нанодисперсню фулерено-сажову суміш (30–40 нм) та триметоприм (5–10 мкм). Оптимізацію складу композицій виконували з використанням програмного середовища STATGRAPHICS® Centurion XVI. Дослідження антикорозійних характеристик проводили методом імпедансної спектроскопії шляхом визначення питомого опору та питомої ємності покриттів у середовищі ацетону впродовж 30 діб експозиції.

Встановлено, що контрольне покриття ЕКП-1 характеризується поступовим зниженням питомого опору від $\rho = 0,23 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ до $\rho = 0,18 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ та одночасним збільшенням питомої ємності від $c = 24 \text{ пФ/м}^2$ до $c = 40 \text{ пФ/м}^2$. Це свідчить про проникнення молекул ацетону у вільний об'єм полімеру, набухання аморфної фази та часткове руйнування структури матриці. Розроблені композиційні покриття ЕКП-2, ЕКП-3 та ЕКП-4 характеризуються значно стабільнішими параметрами. Після 30 діб експозиції значення питомого опору залишалося у межах $\rho = 0,25\text{--}0,26 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, тоді як питома ємність не перевищувала $c = 27\text{--}29 \text{ пФ/м}^2$. Найвищими захисними характеристиками відзначалося покриття ЕКП-3, яке містить 10 мас.ч. триметоприму та 0,050 мас.ч. нанодисперсної фулерено-сажової суміші. Підвищення антикорозійних характеристик пояснюється формуванням тривимірної щільно зшитої полімерної сітки. Триметоприм забезпечує додаткове хімічне зшивання епоксидної матриці, тоді як нанодисперсний наповнювач формує «лабіринтову структуру», яка ускладнює дифузію молекул ацетону та підвищує бар'єрні властивості покриття.

Висновки. Експериментально встановлено, що модифікація епоксидної матриці триметопримом і нанодисперсною фулерено-сажовою сумішшю забезпечує підвищення стійкості покриттів до дії ацетону, що підтверджується стабільними значеннями питомого опору та питомої ємності впродовж 30 діб експозиції. Доведено, що покриття ЕКП-3 характеризується щільною гідрофобною структурою з підвищеними бар'єрними властивостями. Розроблені покриття доцільно використовувати для захисту поверхонь металоконструкцій, що експлуатуються в умовах дії органічних розчинників.

ЛІТЕРАТУРА

1. Barhoumi N., Ghanem A., Koudhai M., et al. (2022). Improving the mechanical, wear and anti-corrosion performance of polyester coating on structural steel by graphite addition. *Express Polym. Lett.*, 16 (5), 476–487.
2. Sienkiewicz A., Czub P. (2023). Modification of Epoxy Compositions by the Application of Various Fillers of Natural Origin. *Materials*, 16, 3149.

СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА БАКТЕРИЦИДНА АКТИВНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ МЕМБРАН НА ОСНОВІ ПОЛІСАХАРИДІВ І НАНОЧАСТИНОК СРІБЛА

Демченко В.Л.

Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України
(Україна)

Вступ. Нанокompозитні матеріали з наночастинками срібла, міді та оксиду цинку привертають значну увагу завдяки вираженим антимікробним, протівірусним, протизапальним та імунomodulatory властивостям. Перспективними полімерними матрицями для створення таких матеріалів є полісахариди, зокрема пектин і карбоксиметилцелюлоза (КМЦ), які характеризуються біосумісністю, нетоксичністю та здатністю стабілізувати наночастинки срібла. Полімерні мембрани, модифіковані наночастинками срібла, демонструють високий потенціал для застосування у водоочищенні, біомедицині та пакувальних технологіях завдяки своїм антимікробним властивостям і можливості пролонгованого вивільнення іонів срібла. Актуальним завданням є розроблення нових екологічно безпечних мембранних матеріалів на основі природних полімерів із підвищеною бактерицидною ефективністю та низькою токсичністю для людини і довкілля.

Постановка задачі. Дослідити структуру та властивості полімерних мембран на основі полісахаридів і наночастинок срібла.

Результати досліджень. У ході роботи було синтезовано полімерні нанокompозитні матеріали, що містять наночастинки срібла, на основі Na-карбоксиметилцелюлози та пектину з використанням поліаніліну (ПАН) як відновлювача іонів срібла. Формування наночастинок у полімерних матрицях здійснювали як за кімнатної температури, так і при термічній обробці, що забезпечило одержання стабільних срібловмісних структур без застосування додаткових токсичних реагентів. Додатково методом лазерної абляції були отримані нанокompозити на основі поліелектролітних комплексів карбоксиметилцелюлози та хітозану різної молекулярної маси.

Результати рентгеноструктурного аналізу підтвердили відновлення іонів Ag^+ до металічного срібла у полімерних системах за участю поліаніліну, а морфологічні дослідження засвідчили формування рівномірно розподілених наночастинок срібла нанорозмірного діапазону в об'ємі полімерної матриці. Встановлено, що композити Na-КМЦ–Ag–ПАН та пектин–Ag–ПАН проявляють виражену антимікробну активність щодо культур *S. aureus* та *E. coli*, тоді як матеріали, синтезовані методом лазерної абляції, не продемонстрували бактерицидного ефекту. Отримані нанокompозити можуть бути перспективними для використання у технологіях очищення води, створенні біомедичних матеріалів та виробництві функціональних пакувальних систем.

Висновки. Синтезовано срібловмісні полімерні нанокompозити Na-КМЦ–Ag–ПАН та пектин–Ag–ПАН методом відновлення іонів Ag^+ поліаніліном за кімнатної температури та при 150 °C. Результати рентгеноструктурного аналізу підтвердили, що введення поліаніліну до систем Na-КМЦ– AgNO_3 і пектин– AgNO_3 забезпечує перехід іонів срібла у металічний стан у процесі формування композитів. Морфологічні дослідження показали утворення нанорозмірних частинок срібла, рівномірно розподілених у полімерній матриці на основі полісахаридів і поліаніліну. Отримані матеріали продемонстрували виражену антимікробну дію щодо тестових культур мікроорганізмів *S. aureus* та *E. coli*.

Роботу виконано за фінансової підтримки гранту Національного фонду досліджень України «Формування та дослідження біополімерних мембран на основі поліелектролітних комплексів і наночастинок срібла, перспективних для нанофільтрації» (Ідентифікатор заявки 2025.02/0018).

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕКРАНОПЛАНІВ В ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Дреус А.Ю., Сохацький А.В.

*Дніпровський Національний Університет імені Олеся Гончара
(Україна)*

Вступ. Беззаперечним трендом розвитку сучасних транспортних технологій є використання безпілотних літальних апаратів. Війна, яку розв'язала московія проти України, чітко продемонструвала важливість безпілотних технологій, зокрема значимість високошвидкісних водних, підводних та надводних систем. Збільшення швидкості таких систем є ключовою проблемою для забезпечення тактичних переваг.

Актуальність досліджень. Переведення транспортного засобу в безконтактний режим руху з опорною поверхнею (екраном), разом з використанням ефекту істотного збільшення несучих властивостей і аеродинамічної якості крила під час польоту поблизу поверхні, є фізичним підґрунтям для створення високошвидкісних низьколітальних апаратів-екранопланів, або Wing-in-Ground crafts (WIG crafts) в західній термінології [1]. Перші розробки таких великих апаратів, що використовують динамічний принцип підтримки над поверхнею, були виконані ще в 60-ті роки XX сторіччя [2]. Наприклад проекти «Орленок» (CPCP), «Large Weincraft» (West Coast, US), «AWIG 751» (MARIC, China), Airfish 8 — Fligtfish 8 (Hanno Fisher, Germany). Проте, внаслідок технічних і економічних чинників, на сьогодні, військове та комерційне використання екранопланів з динамічним принципом підтримки є обмеженим.

Слід зазначити, що більшість відомих проектів стосуються великих та середніх суден, що пілотуються екіпажем. Міжнародною морською організацією (ІМО) екраноплани або WIG crafts віднесено до морських транспортних засобів. Останнім часом, інтерес до WIG систем зростає у зв'язку з можливістю їх використання в якості невеликих безпілотних апаратів [1–6]. Проте використання екранопланів як безпілотних систем потребує додаткового вивчення, оскільки попередні дослідження орієнтувались в основному на апарати великих і середніх розмірів. Разом з тим, геометричні характеристики є визначальними з точки зору ефективного використання екранного ефекту.

Основною проблемою при створенні технологій безпілотних WIG систем є відсутність обґрунтованої теорії польоту таких апаратів, на основі якої можна забезпечити безпечну автономну роботу на всіх крейсерських етапах польоту. Саме на дослідженнях різних аеродинамічних схем та компоновок, впливу профілю екранної поверхні на аеродинамічну якість, питань стабілізації польоту спрямовано більшість сучасних досліджень з аеродинаміки екранопланів.

Постановка задачі. Аналіз та узагальнення нових теоретичних і прикладних результатів досліджень, щодо застосування інноваційних технологій у транспортній галузі. Отже, розробка методологічного забезпечення для вивчення аеродинамічних характеристик екранопланів, що можуть використовуватися у тому числі, як безпілотні апарати, є актуальною задачею.

Результати досліджень: місце екранопланів в транспортній системі. Відомо кілька типів транспортних засобів, що використовують принцип безконтактного руху замість принципів водотоннажності або спирання на поверхню. Це використання статичної повітряної подушки [3], магнітної подушки [4] і динамічної аеродинамічної підйимальної сили [2].

Динамічний принцип підтримки зокрема реалізований в суднах на підводних крилах. Це дозволяє підвищити швидкість руху таких суден до 100 км/год, а в окремих випадках і до більших. Разом із цим їх економічна ефективність не дуже висока.

Судна на повітряній подушці створюють область підвищеного тиску під корпусом або крилами апарату. Такі апарати знайшли своє застосування на практиці і можуть

розвивати швидкість до 200 км/год та більше. Проте використання таких суден пов'язано з низкою технічних проблем: низька відносна ваговантажність (відношення повного навантаження до повної ваги засобу), проблема відбору потужності на високих швидкостях руху для підтримки, проблема шуму, тощо.

Ще один високошвидкісний тип «безконтактного» транспортного засобу – засоби, що використовують магнітну подушку, яка генерується магнітними (електромагнітними) полями між апаратом і шляховою структурою. Експериментальні проекти таких апаратів демонструють можливість досягнення достатньо високих швидкостей до 600 км/год. В комерційну експлуатацію введено декілька таких систем, дослідження і випробування прототипів магнітних поїздів проводяться в різних країнах. У цьому контексті варто зазначити проєкт Hyperloop, який знаходиться на стадії дослідно-конструкторських робіт та випробувань експериментальних зразків. Проте, використання таких транспортних засобів потребує наявності спеціальної шляхової інфраструктури, яку вкрай важко або неможливо забезпечити у зв'язку з необхідністю зниження густини повітря в інфраструктурних шляхопроводах.

Для оцінки ефективності різних типів транспортних засобів найчастіше використовують швидкісні характеристики та енергоозброєність Габріеля-Кармана [7]. Цей аналіз ґрунтується на безрозмірному фізичному параметрі, який має назву питомої потужності ε . Цей показник визначається як відношення вихідної потужності двигуна до добутку загальної маси транспортного засобу на максимальну швидкість

$$\varepsilon = \frac{N}{G \cdot V_{\max}},$$

де N — потужність на виході силової установки (Вт); G — загальна вага транспортного засобу (Н); $V_{\max}$ — максимальна швидкість руху (м/с).

На рис.1а представлена діаграма Габріеля-Кармана на якій порівнюється питома потужність традиційних транспортних засобів і суден, що використовують принцип зменшення контакту з опорною поверхнею: суден на підводних крилах, суден на повітряній подушці і крилатих екранопланів. Аналіз виконаний на основі даних [8–10].

З даних на рис.1а випливає, що за швидкістю та енергоефективністю судна на повітряній подушці, судна на підводних крилах та екраноплани займають положення між тихохідними транспортними засобами з незначною енергоозброєністю і швидкісними з високими значеннями питомої потужності.

Сукупність характеристик, що відбивають здатність судна до руху і маневрування оцінюють безрозмірним параметром ходова якість K , який залежить від багатьох факторів і, як правило, визначається експериментально. Пропонується ходову якість визначати, як відношення ваги транспортного засобу до усередненого опору. На рис.1б представлено графік залежності параметра K , від швидкості руху для різних видів транспортних засобів за даними [10]. Як видно з рис.2а за швидкості більше 30 м/с ходова якість екранопланів значно перевищує показники інших видів транспорту.

Швидкість звичайних (водовитіснувальних) суден обмежується різким зростанням хвильового опору. З збільшенням величини швидкості за Фрудом $Fr(D) = 2,5$ виникає так званий горб опору. Зниження лобового опір вдалося досягти шляхом підйому корпусу судна над водою за допомогою гідродинамічних і аеростатичних пристроїв, що частково реалізовано на судах на підводних крилах, на повітряній подушці і на катамаранах з глісувальним корпусом. Але виявилось, що і в цих апаратах є фізичні обмеження швидкості. У судах на підводних крилах виникає ефект кавітації крил на швидкостях близьких до 100 км/год. Для суден на повітряній подушці характерний «поршневий ефект» при проходженні над профілем хвилі, що призводить до зростання гідродинамічного опору, ударних навантажень та зниження безпеки руху. Для глісувальних суден на великих швидкостях постає проблема забезпечення поздовжньої стійкості від різкого збільшення

аерогідродинамічних сил. При вітрохвильових збуреннях можуть відбуватися підліт і перекидання судна. На сьогодні пошуки способів підвищення швидкості та безпеки руху на водному транспорті тривають.

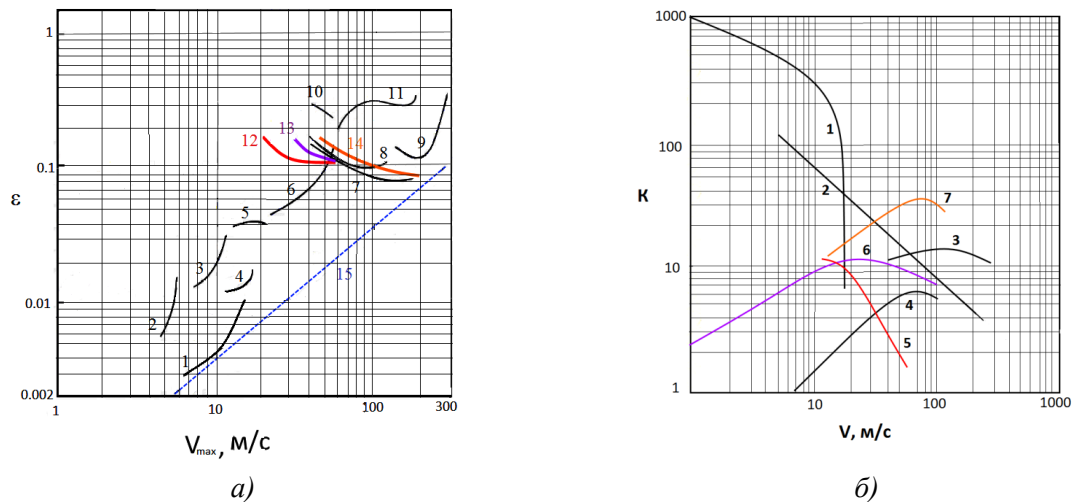


Рисунок 1 — Характеристики транспортних засобів:

а) діаграма Габрієля-Кармана для питомої потужності транспортних засобів:

- 1 — комерційний корабель; 2 — підводний човен в підводному положенні; 3 — підводний човен в надводному положенні; 4 — лінкор; 5 — вантажний автомобіль без причепа; 6 — легковий автомобіль; 7 — комерційний літак; 8 — гідролітак; 9 — винищувач; 10 — гвинтокрил; 11 — спорткар; 12 — апарати на підводних крилах; 13 — апарати на повітряній подушці; 14 — WIG апарати; 15 — лінія Габрієля-Кармана (лінія обмеження продуктивності); б) ходова якість транспортних засобів: 1 — водотоннажні судна; 2 — колісний транспорт; 3 — літаки (різні); 4 — гелікоптери; 5 — апарати на підводних крилах; 6 — апарати на повітряній подушці; 7 — екраноплани

Таким чином екраноплани мають наступний ряд переваг над іншими видами транспорту:

- вони мають високу економічність та набагато більшу вантажопідйомність порівняно з літаками та гелікоптерами;
- для них характерна більш висока швидкість ніж водних транспортних засобів;
- для використання в оборонних задачах важливе значення має малопомітність екраноплана на радарях внаслідок польоту на низьких висотах, швидкохідність та несприйнятливості до протикорабельних мін;
- екраноплани відносяться транспортних засобів, яким для злітання та посадки не потрібна спеціально підготовлена злітна смуга, а лише достатня за розмірами акваторія або рівна ділянка суші;
- екраноплани можуть переміщатися над замерзлою водною гладдю, сніжною рівниною, над бездоріжжям тощо; як наслідок, вони можуть переміщатися «прямими» маршрутами, їм не потрібна наземна інфраструктура: мости, дороги тощо;
- екраноплани мають більш безпечний рівень ніж звичайні літаки чи гелікоптери, так, як у разі виявлення несправності під час польоту він може сісти на воду навіть при сильних хвилях.

Ще одним важливим показником економічної ефективності використання транспортних систем є витрати на перевезення. В роботі [2] наведено оцінку витрат на перевезення одного умовного пасажирів різними видами високошвидкісних систем, включно з екранопланами. Дослідження виконано основі аналізу існуючих і перспективних зразків техніки та їх техніко-економічних показників. Результати порівняльного аналізу вартості перевезення одного пасажирів різними типами високошвидкісних засобів

показують ефективність екранопланів в межах оптимальної дальності польоту.

Проведені дослідження показують, що екраноплани мають більш високу економічну привабливість у порівнянні з суднами на підводних крилах і повітряних подушках для перевезення на відстані до 1000 км. Для перевезень на відстані більше за 1000 км екраноплани поступаються реактивним літакам з точки зору вартості перевезення пасажирів. Проте, такі судна мають низку інших переваг, зокрема можливість безаеродромного базування, можливість використання в режимі амфібії, більш високу морехідність у порівнянні з гідролітаками, високу аеродинамічну якість. У разі бойового використання таких систем слід додати малопомітність для засобів радіолокаційного спостереження. В доповіді обговорюються особливості Wing-in-Ground crafts.

Висновок. Отже, з проведених досліджень випливає, що екраноплани заповнюють нішу між іншими швидкісними кораблями та реактивними літаками. За оцінками багатьох експертів [1–10] найближчим часом екраноплани можуть стати революційною технологією в галузі транспортних систем. Робота була виконана в рамках проекту «Обґрунтування аеродинамічних та конструктивних параметрів високошвидкісного літального апарата типу «wing-in-ground», що профінансований Національним фондом наукових досліджень України (проект № 179/0170).

ЛІТЕРАТУРА

1. Yun L., Bliault A., DooJ., WIG Craft and Ekranoplan. Ground Effect Craft Technology Springer, New York, 2010. 450 p.
2. Аеродинамічні аспекти проектування безпілотних екранопланів / Дреус А.Ю., та ін.; за ред. А.Ю. Дреуса. Дніпро, 2024, 180 с.
3. McLeavy R, Hovercraft and hydrofoils. Arco Pub, New York, 1977. 215p.
4. Розвиток економічних та науково-технічних основ транспорту п'ятого покоління / Гесць В.М. та ін. Київ: Інститут економіки та прогнозування НАН України. 2020. 254 с.
5. Сохацький А. В. Теоретичні основи створення аеродинамічних компонувань перспективних швидкісних транспортних апаратів: дис. доктора технічних наук: 05.07.01. Дніпропетровськ. 2010. 364 с.
6. Sokhatskyi A., Dreus A., Radovsky V., Horbonos S. A review of the problem of modeling the aerodynamics of small-sized ekranoplanes. MATEC Web Conf. 3rd International Scientific and Practical Conference «Energy-Optimal Technologies, Logistic and Safety on Transport» (EOT-2023) Volume 390, 2024. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202439004011>
7. Gabrielli G., von Karman T.H. What Price Speed? Mechanical Engineering. 1950. Vol.72, N10.P.775-781
8. Trancossi, Michele. (2015). What price of speed? A critical revision through constructal optimization of transport modes. International Journal of Energy and Environmental Engineering. 7. 10.1007/s40095-015-0160-6.
9. Сохацький А.В. До проблеми моделювання аеродинаміки надводних транспортних апаратів. Системи та технології. 2022. № 2 (63), С. 5–13.
10. Белавін М.І. Екраноплани. Київ: КІЩА, 1987. 220 с.

УДК 629.5:620.91

ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА РУШІЙНА СИСТЕМА (WAPS) — ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ ЗАХІД ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ СУДНОПЛАВСТВА. ОГЛЯДОВИЙ АНАЛІЗ АЕРОДИНАМІЧНИХ ЯКОСТЕЙ РІЗНИХ ТИПІВ ВІТРИЛ

*Маменко П. П.**Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. Четверте дослідження ІМО щодо парникових газів 2020 року, опубліковане у квітні 2018 року, запропонувало впровадження Початкової стратегії ІМО щодо скорочення викидів парникових газів з суден. Ця знакова Початкова стратегія забезпечує міжнародну політичну основу високого рівня, яка визначає чіткий шлях до скорочення викидів парникових газів з суден; передбачає: скоротити викиди CO₂ на транспортну роботу (вуглецеємність) щонайменше на 40% до 2030 року та скоротити загальні річні викиди парникових газів щонайменше на 50% до 2050 року. З цією метою ІМО запропонувала низку відповідних правил щодо скорочення викидів парникових газів (ПГ) у 2018 році [1–2], як показано на рис. 1. Однак, все ще існує значний розрив між поточними викидами вуглецю в судноплавній галузі та ціллю скорочення викидів на 2050 рік, встановленою ІМО, й тому слід досліджувати та впроваджувати нові технології та методи для ефективного зменшення викидів CO₂ у судноплавній галузі [3–4].



Рисунок 1 — Ілюстрація стратегій ІМО щодо парникових газів, запропонованих у 2018 році

Для зменшення викидів парникових газів та відповідності дедалі суворішим нормативним вимогам, стратегії впровадження WAPS, аміаку, метанолу та акумуляторів стали основними рішеннями для досягнення декарбонізації судноплавної галузі [5].

Постановка задачі. Технології використання альтернативних типів палива як аміак, метанол та застосування акумуляторів все ще стикаються з деякими проблемами:

- 1) виробництво, зберігання та транспортування аміаку, метанолу та акумуляторів потребують спеціального обладнання та технологій;
- 2) застосування аміаку, метанолу та акумуляторів вимагає спеціальних двигунів та систем згоряння.

WAPS (Wind Assisted Propulsion Systems/Системи вітрової тяги) має переваги вражаючого енергозбереження та зменшення викидів, низьких експлуатаційних витрат, зрілої технічної бази та широкої адаптивності. Таким чином, WAPS став більш перспективним та практичним варіантом для судноплавної галузі для досягнення декарбонізації [6–7].

Перелік вирішуваних питань. Оптимальне керування роботою суден з вітровою енергією може значно покращити експлуатаційні характеристики всієї гібридної

енергетичної системи для ефективного використання енергії вітру, і таким чином ще більше розкрити потенціал скорочення споживання енергії. Технологія вітрової енергії WAPS є одним з найефективніших способів зменшення викидів CO₂ суднами, а отже, реалізації екологічно чистого розвитку морського сектору.

У багатьох дослідженнях, розглянуто поточний розвиток використання методів WAPS у морських перевезеннях, та запропоновано потенційні ефекти економії палива, визначивши ключові фактори, що впливають на експлуатаційну ефективність WAPS, включаючи екологічні, бортові та комерційні фактори. Проведено комплексний огляд різних типів вітрил у морському секторі, розглянуто останні розробки та застосування WAPS для існуючих суден, а також потенціал методів WAPS у розвитку зеленого морського сектору в майбутньому [8–9].

Суть дослідження. У науковій літературі досі розглядаються різні теми: від потенціалу вітру для скорочення шкідливих викидів у судноплавстві, через можливе підвищення енергоефективності суден, до важливості цін на бункерне паливо та політичних дій для впровадження вітроенергетичних технологій. Таким чином, у цьому дослідженні розглядається стан використання WAPS та його основні переваги та недоліки, залишається брак комплексного аналізу вітрових технологій, щоб надати посилання для подальшого вивчення та практичного застосування WAPS. Для повного використання ресурсів вітрової енергії необхідно проаналізувати аеродинаміку різних типів вітрил та аеродинаміку зчеплення кількох вітрил для покращення тягового ефекту [10].

Аналіз аеродинаміки різних типів вітрил. Вже розроблено або розробляється кілька різних концепцій вітрильних технологій, включаючи вітрила з жорсткими або м'якими крилами, ротори Флетнера та вентилязовані фольги, або повітряні змії. Більшість сучасних систем зараз використовують найсучасніші інтелектуальні системи управління та автоматизації для безпечної роботи без необхідності додаткового екіпажу. Поєднання передової аеродинаміки, автоматизації, комп'ютерного моделювання та сучасних матеріалів відкриває нове покоління інноваційних вітрильних систем для океанських суден.

1. *Вітрило повітряного змія* перетворює енергію вітру на кінетичну енергію за допомогою повітряних зміїв, що летять попереду судна, що може тягнути корпус вперед і забезпечувати допоміжну потужність для навігації судна. На створеній числовій моделі повітряного змія проаналізували динамічні характеристики на основі даних про швидкість вітру для п'яти навігаційних маршрутів. Результати показали, що рушійна потужність повітряного змія становить 127–461 кВт, а витрата палива судна з вітрильним двигуном може бути зменшена на 1–32 % на цільовому маршруті плавання .

2. *Аеродинамічний аналіз вітрила типу «крило»* базується на теорії аеродинаміки крила літака, завдяки різниці тиску між верхньою та нижньою частинами, коли повітря протікає через вітрило типу «крило», то різниця тиску перетворюється на тягу, щоб штовхати судно вперед. Аеродинамічний аналіз вітрил на основі CFD (метод обчислювальної гідродинаміки) та оптимізація аеродинамічних параметрів вітрил типу «крило», дозволило досягти зниження витрати палива на 17–65 %, а також збільшення коефіцієнта тяги на 6,5% .

3. *Аеродинамічний аналіз ротора Флеттнера*, пристрій, що використовує ефект Магнуса для створення підйомної сили та за допомогою аналізу аеродинамічних характеристик ротора Флетнера надає розуміння взаємодії між ротором й вітром що може сприяти практичному застосуванню Флеттнера на морських суднах.

Результати випробуваннями в аеродинамічній трубі показали, що нафтовий танкер, оснащений шістьма роторами Флетнера, може заощадити до 30% витрат на тривалому океанському маршруті а потенційна економія від використання судна типу Ro-Ro, оснащеного чотирма роторами Флеттнера, на коротшому морському переході становить приблизно 14%.

4. *Аналіз аеродинаміки телескопічних крил та складних крил.* Телескопічні серповидні крилові вітрила мають функцію телескопування та можуть складатися або розкладатися відповідно до різних навігаційних умов плавання, та адаптуватися до змін

вітру у порівнянні з фіксованими вітрилами крилами, що для судна з вітровою системою має велике значення для посилення енергозберігаючого ефекту.

Результати випробування з високоточною моделлю CFD показали, що коефіцієнт підйомної сили та опору вітрила становить 2,102 та 0,456 у повністю розкладеному стані, а коефіцієнт підйомної сили зменшується на 8,9%, а коефіцієнт опору збільшується на 17,1%, коли вітрило повністю складене.

5. *Аналіз аеродинаміки зчеплення кількох вітрил.* При застосуванні кількох вітрил на одному судні може привести до певного ефекту взаємної інтерференції між вітрилами, який слід пом'якшити шляхом відповідного розташування відносного положення вітрил, щоб посилити рушійну силу застосованих кількох вітрил на судні. Проведений аналіз аеродинамічних характеристик трьох однакових вітрил типу крила, показав, що типовий коефіцієнт тяги в середньому може бути зменшений на 21%~43% порівняно з коефіцієнтом тяги одного вітрила через ефект інтерференції кількох вітрил [11–14].

Таблиця 1 — Характеристики різних типів вітрил

Тип вітрила	Переваги	Недоліки
 Вітрило повітряного змія	1. Висока робоча висота; 2. Зменшення ударної та скручуючої сили хвиль на судно;	1. Аеродинамічні характеристики не такі хороші, як у вітрила типу «крило»; 2. Складна система керування та погана стійкість до зустрічного вітру; 3. Потреба у великій площі кайта; 4. Високі витрати на обслуговування/експлуатацію
 Вітрило типу «крило»	1. Проста конструкція та найпоширеніший варіант вітрила; 2. Придатний для суворих умов експлуатації; 3. Низькі витрати на обслуговування/експлуатацію; 4. Хороші характеристики проти зустрічного вітру	1. Потрібна велика площа вітрил; 2. Потрібне велике конструктивне підсилення; 3. Велика вага та високий центр ваги; 4. Високі інвестиційні витрати
 Роторне вітрило	1. Особливо добре працює в умовах бічного вітру; 2. Компактне встановлення та низький опір вітру; 3. Проста інтеграція та низькі експлуатаційні витрати; 4. Підходить для суворих умов експлуатації	1. Підйомна сила дуже низька при зустрічному або попутному вітрі; 2. Потрібен допуск до судового генератору; 3. Існують проблеми із застосуванням на контейнеровозах (конструкція судна).
 Телескопні та складні вітрила	1. Гнучка адаптація до різних навігаційних середовищ (погодних умов, тощо); 2. Покращення остійності суден; 3. Можливість керування гідравлічними пристроями або електродвигунами, а також проста експлуатація	1. Високі початкові інвестиційні витрати; 2. Складне технічне обслуговування та ремонт; 3. Існують проблеми сумісності з різними типами суден
 Комбіновані вітрила (зчеплення кількох вітрил)	1. Гнучка експлуатація дозволяє використання залежно від різних сценаріїв; 2. Ефективність керування хороша, і його можна складати під різними кутами; 3. Підходить для змінних вітрових та морських умов	1. Технологія складна та висока вартість; 2. Складані вітрила-крила відносно великі та займають значну площу палуби; 3. Вартість обслуговування висока.

Висновки. Аналіз аеродинамічних характеристик вітрила є міцною основою для оптимального проектування та оптимізації робочого стану вітрил для посилення рушійної сили судна. Особливо слід відзначити дослідження на основі методу CFD та випробування в аеродинамічній трубі, які можуть забезпечити міцну основу для оптимального проектування та керування експлуатацією вітрил.

Хоча аеродинамічний аналіз типових вітрил був ретельно вивчений, залишається кілька питань та викликів, які потребують вирішення:

а) Аеродинамічний аналіз повітряного змія, вітрила типу «крило» та роторів Флеттнера можна виконати за допомогою випробувань в аеродинамічній трубі та методів CFD. Однак, вплив аеродинаміки вітрил на енергетичну ефективність судна з вітрильним рухом слід додатково вивчити, застосувавши методи числового моделювання та експериментальної перевірки, які є значними для підвищення енергоефективності судна.

б) Загальні аеродинамічні характеристики можна ефективно покращити шляхом оптимізації розташування вітрил, щоб уникнути ефекту інтерференції між кількома вітрилами на судні. Однак, аналіз характеристик інтерференції кількох вітрил, заснований на поєднанні методів числового моделювання та експериментальної перевірки, потребує подальшого вивчення, що є важливим для зменшення взаємної інтерференції та покращення загальних аеродинамічних характеристик.

с) Загальний аналіз підвищення продуктивності кількох вітрил на основі реальних даних експлуатації судна все ще відсутній, а вплив характеристик рушійної сили кількох вітрил на комплексну продуктивність суден з вітрильним двигуном все ще відсутній.

Існує також кілька проблем для широкого впровадження WAPS, таких як потреба в надійних та ефективних технологіях, які можуть працювати в різних умовах [15].

ЛІТЕРАТУРА

1. Fourth IMO GHG Study 2020 Full Report. Published in 2021 by the INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION 4 Albert Embankment, London SE1 7SR www.imo.org

2. International Maritime Organization. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. 2023. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx>.

3. Joung TH, Kang SG, Lee JK, Ahn J. The IMO initial strategy for reducing Greenhouse Gas (GHG) emissions, and its follow-up actions towards 2050. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping* 2020;4:1-7. DOI: 10.1080/25725084.2019.1707938

4. Cheng L, Xu L, Bai X. Cargo selection, route planning, and speed optimization in tramp shipping under carbon intensity indicator (CII) regulations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 2025. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103948.

5. Inal OM, Charpentier JF, Deniz C. Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. (2022). DOI: 10.1016/j.rser.2021.111965

6. Laryea H, Schiffauerova A. A novel standalone hybrid renewable energy systems onboard conventional and autonomous tugboats. *Energy* 2024. DOI: 10.1016/j.energy.2024.131948

7. Маменко П.П. Повернення вітроенергетики в судноплавство. Економічний та операційний огляд. Збірник матеріалів V Міжнародної науково-практичної конференції «ПРОБЛЕМИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ МОРСЬКОЇ ГАЛУЗІ». с.233. 03-04 2025 грудня Одеса. https://ksma.ks.ua/wp-content/uploads/2025/12/PSDMI-ЗБІРНИК-2025_2.pdf

8. Chou, T.; Kosmas, V.; Acciaro, M.; Renken, K. A Comeback of Wind Power in Shipping: An Economic and Operational Review on the Wind-Assisted Ship Propulsion Technology. *Sustainability* 2021, 13, 1880. <https://doi.org/10.3390/su13041880>

9. Kolodziejski, M.; Sosnowski, M. Review of Wind-Assisted Propulsion Systems in Maritime Transport. *Energies* 2025, 18, 897. <https://doi.org/10.3390/en18040897>

10. A. Persson, L. Larsson, C. Finnsgård. (2024). A time-domain model for unsteady upwind sail aerodynamics using the indicial response method. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117311>
11. R. Borobia-Moreno, D. Ramiro-Rebollo, R. Schmehl, G. Sánchez-Arriaga. Identification of kite aerodynamic characteristics using the estimation before modeling technique. *Wind Energy* 24(6):596-608. DOI: 10.1002/we.2591
12. Chen W, Wang H, Liu X. (2023). Experimental investigation of the aerodynamic performance of Flettner rotors for marine applications. *Ocean Engineering* 281(6). DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.115006
13. Zhu H, Nikmanesh M, Yao H, Ramne B, Ringsberg JW. (2022) Propulsive performance of a novel crescent-shaped wind sail analyzed with unsteady RANS. Conference: The ASME 2022 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE 2022). DOI: 10.1115/OMAE2022-79867
14. Zhang R, Huang L, Chen J, Ma R, Wang K, Ruan Z, Wang C, Wu J, Li X, Li B. (2025) Numerical Investigation on the Aerodynamic Performance of a Combined Flettner Rotor and U Sail System. *Ships and Offshore Structures*. DOI: 10.1080/17445302.2025.2487576
15. Kai Wang, Zhongwei Li, Xing Liu, Zhiqiang Hu, Lianzhong Huang, Qiushi Song, Hongzhi Liang, Xiaoli Jiang. (2025). Wind-assisted propulsion system for shipping decarbonization: Technologies, applications and challenges. *Energy* Volume 336. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138420>

MODELING OF SURFACE STRUCTURE DAMAGES IN TUNGSTEN DURING ITS USE IN THERMONUCLEAR REACTORS

¹Prokhorenko E.M., ¹Lytvynenko V.V., ^{2,4}Manuilenko O.V., ²Onishchenko I.N., ²Pavlii K.V.,
²Zajtsev B.V., ²Butenko V.I., ³Prokhorenko T.G.

¹*Institute of Electrophysics and Radiation Technologies NAS of Ukraine
(Ukraine)*

²*NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology»
(Ukraine)*

³*Kharkiv National Automobile and Highway University
(Ukraine)*

⁴*V.N. Karazin Kharkiv National University
(Ukraine)*

Introduction. Currently, demand for electrical energy significantly exceeds production. The physical expansion of power generation facilities is accompanied by various negative consequences, including environmental pollution and increased space for ash and other waste disposal. At the same time, fossil fuel consumption increases. Hydroelectric power plants require water resources, significantly increasing the area subject to flooding. Consequently, other types of power generation plants also face challenges. Nuclear fusion reactors are a promising option.

Currently, a number of projects have been completed to develop such reactors. It should be noted that the core of a fusion reactor is subject to a significant number of critical factors. The main factors are: a) high temperature (>1200 K), intense thermal effects; b) strong radiation and beams of various charged particles generated by nuclear fusion; c) the impact of high-temperature plasma on the reactor walls. All of these factors alter the structure of the wall surface of reactor. This can lead to sputtering of material from the surface and localized failure of the material of wall.

Therefore, to create the first wall of a fusion reactor, it is necessary to use materials that are least susceptible to these factors. Tungsten is an effective material for the first wall. Tungsten has a high melting point and high strength. Tungsten has low residual radioactivity. Therefore, tungsten can be a suitable material for the first wall of a fusion reactor or a divertor. However, exposure to radiation fluxes disrupts the surface structure of tungsten, altering its properties and causing surface degradation.

Purpose of the work. The aim of the study was to use numerical and experimental methods to determine how the main properties of change of tungsten when used as the material for the first wall of a fusion reactor.

Experimental part. Building a fusion reactor is a very expensive process, so it's essential to know in advance how the materials in the core will change throughout its entire operating life. Furthermore, the emergence and development of damage and defects occurs over a long period of time. This makes it impossible to obtain real-time information about changes in the surface structure. Therefore, physical and mathematical modeling of the reactor's operation is necessary.

Experimental studies use charged particle beams that simulate radiation fluxes. In our experiments, we used ion beams of helium. Because ions of helium have a large mass, they can be accelerated to high energies. High-energy ions of helium create significant crystal of grate defects. This allows for the creation defects of surface that would take several years to develop in a real reactor. Ions of helium dissolve poorly in tungsten. Therefore, after irradiation, the radioactivity of the samples is low.

The experiments were performed using a ion of helium accelerator [1]. This accelerator had pulse current $700\text{ }\mu\text{A}$, pulse length $500\text{ }\mu\text{s}$, average current $0.7\text{ }\mu\text{A}$, repetition frequency $2...5\text{ imp./s}$, current density $(0.15...0.44)\times 10^{13}\text{ part./cm}^2$. The accelerator could operate in: a) injection mode (ion beam energy is 0.12 MeV); b) acceleration mode (ion beam energy is 4 MeV). The experiments were performed in "cold" mode, without taking into account the thermal effect.

In this case, the crystal grate defects that arose only as a result of the radiation exposure of ions of helium were studied.

Mathematical modeling of the processes that occur in tungsten during its irradiation was performed using the SRIM software package [2].

Tungsten with a purity of 99.7% (W-n) was used in the experiments. These samples contained impurities such as Fe, Al, Cr, Ni, Co, and Mo. However, their contribution to the overall structure of the defects was small, and the results exhibited minimal distortions. The samples were disk-shaped, 2 mm thick and 10 mm in diameter. Irradiation was performed perpendicular to the end face. To reduce distortion of the results due to reflections, the disk ends were polished. We were able to examine the defects of structural on both the irradiated and from an opposite side.

Irradiation was performed with a beam of ion with energy of 0.12 MeV. In this case, the dose of radiation was $1,7 \times 10^{18}$ ion/cm², and the radiation damage dose was 93.78 dpa.

Photographs of the surface (magnified) are shown in Fig. 1 [3].

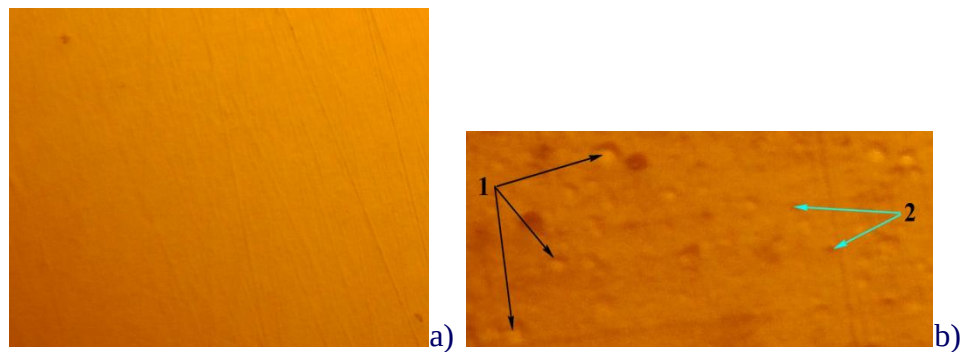


Figure1 — Photographs of the surface of samples of tungsten (W-n (99.7%)): a) non-irradiated sample, b) irradiated sample (1 — craters, 2 — peaks). Irradiation with ions of helium (energy of 0.12 MeV)

When a sample of tungsten is irradiated with a beam of ion of helium, several main effects occur.

Firstly, irradiation causes ion implantation into the crystal grate. Some of the ions are incorporated into the crystal grate. Disrupting the grate and altering the structure of the layer of surface of tungsten. Implantation alters the microscopic properties of the first wall material (tungsten) [3].

Also factors which change macroscopic properties of tungsten show up as a result of irradiation.

The second effect that occurs as a result of irradiation is the appearance of effects of "flaking" and "blistering." Since helium is almost insoluble in tungsten, microbubbles form and rise to the surface (flaking). Upon reaching the surface of tungsten, the bubbles burst, forming micro pits (craters).

Consequently, the formation of pits is a process of bubble bursting (removal of the bubble cap). These pits are quite clearly visible in micrographs (Fig. 1(b), points 1). However, some bubbles do not burst. Bumps (peaks) remain on the surface. This is the «blistering» effect. Points 2 (Fig. (b)) correspond to this process. The «blistering» process is the uncompleted process (is an incomplete) «flaking» process [3].

The third effect that occurs when tungsten is irradiated with helium ions is the formation of «fluff» of tungsten. This effect occurs as a result of the diffusion of individual ions of helium from deep within the tungsten toward the surface. This also forces atoms of tungsten to the surface. As a result, thin microscopic threads (fluff) form on the surface. A «flaking» effect appears on the surface [3]. While the implantation effect can strengthen the surface of tungsten, the «flaking» and «fluff» effects reduce the surface strength.

It was found that the number of craters was five times greater than the number of peaks. It was also found that the height of the «fluff» filaments was three times greater than their thickness.

These results demonstrate that when irradiating tungsten (W-n) (99.7%) by the beams of ions of helium with energies of 0.12 MeV, the surface of sample has a high degree of destruction.

Conclusion.

1. Experimental work was conducted irradiating samples of tungsten (99.7% pure) by the beams of ion of helium with energies of 0.12 MeV.

2. Flaking processes were found to be five times more intense than blistering processes. This is evidenced by the fivefold increase in the number of pits over the peaks.

3. The height of the «fluff» of tungsten filaments was found to be three times greater than its thickness.

4. The surface of tungsten (99.7% pure) was found to be highly damaged by irradiation with 0.12 MeV ion beams.

REFERENCES

1. I.M. Onishchenko, O.V. Manuilenko, B.V. Zajtsev, S.M. Dubniuk, A.P. Kobets, A.I. Kravchenko, K.V. Pavlii, V.M. Reshetnikov, V.A. Soshenko, S.S. Tishkin, O.V. Zhuravlyov, V.G. Zhuravlyov. Experimental research and work development on the helium ions linac. *Problems of atomic science and technology*. 2021, № 6, v. 136, p. 197–200. <https://doi.org/10.46813/2021-136-197>

2. SRIM.org. Stopping and Range of Ions in Matter (SRIM). Режим доступу: <http://www.srim.org>

3. E.M. Prokhorenko, O.V. Manuilenko, I.N. Onishchenko, V.V. Lytvynenko, K.V. Pavlii, B.V. Zajtsev, V.A. Soshenko, V.I. Butenko, T.G. Prokhorenko. Disturbances in the surface structure of tungsten samples 99.5 and 99.7% purity irradiated by 0.12 or 4 MeV helium ions. *Problems of atomic science and technology*. 2026, № 1, v. 161, p. 81–89. <https://doi.org/10.46813/2026-161-081>.

ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ У СЕРЕДОВИЩІ МОРСЬКОЇ ВОДИ

¹Сапронов О.О., ²Lasenko I., ³Шаранов В.Д., ¹Банга М.М.

¹Херсонська державна морська академія
(Україна)

²Riga Technical University
(Latvia)

³Дунайський інститут національного університету
«Одеська морська академія»
(Україна)

Вступ. Проблема антикорозійного захисту металевих конструкцій морського транспорту є однією з ключових у забезпеченні їх довговічності. Значна частина елементів суднового обладнання, поверхонь металоконструкцій функціонують в умовах постійного впливу агресивних факторів: морської води, атмосферної вологості, соляного туману та змінних температур. У таких умовах навіть корозійностійкі матеріали піддаються руйнуванню, що призводить до зниження експлуатаційних характеристик і значних економічних витрат. Одним із ефективних шляхів підвищення корозійної стійкості є застосування полімерних покриттів. Сучасні дослідження показують, що введення нанодисперсних матеріалів і активних органічних сполук дозволяє формувати щільну полімерну структуру з покращеними бар'єрними властивостями, що істотно обмежує дифузію агресивних компонентів.

Постановка задачі. Дослідити динаміку зміни питомого опору і питомої ємності залежно від вмісту активних інгредієнтів.

Результати досліджень. Дослідження проводили в умовах впливу морського середовища (солоність 35 ‰) впродовж 30 діб із використанням методу імпедансної спектроскопії. Як критерії оцінювання аналізували зміну питомого опору (ρ) та питомої ємності (c), що характеризують бар'єрні властивості покриттів. Встановлено, що контрольне покриття на основі немодифікованої епоксидної матриці характеризується зниженням питомого опору до рівня $\rho = 0,22 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ та зростанням питомої ємності – $c = 28 \text{ пФ/м}^2$, що свідчить про проникнення вологості та іонів у структуру полімеру. Тоді як модифіковані композиції демонструють стабільні характеристики впродовж усього періоду експозиції. Зокрема, для розробленого покриття ЕКП-3 (епоксидна смола ЕД-20 – 100 мас.ч. + твердник ПЕПА – 10 мас.ч. + триметоприм – 10,0 мас.ч. + нанодисперсна фулерено-сажова суміш – 0,050 мас.ч.) значення питомого опору становить $\rho = 0,29 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, а питома ємність не перевищує $c = 16\text{--}18 \text{ пФ/м}^2$, що свідчить про формування щільної гідрофобної структури. Покращення характеристик пояснюється комплексною дією наповнювачів. Триметоприм забезпечує додаткове хімічне зшивання полімерної матриці за рахунок взаємодії аміногруп з епоксидними кільцями, тоді як нанодисперсна фулерено-сажова суміш формує «лабіринтову структуру», що ускладнює дифузію агресивних компонентів. Крім того, реалізується ефект гідрофобізації та зменшення кількості полярних груп.

Порівняння з комерційними покриттями (HEMPEL, HEMPALIN ENAMEL) показало, що розроблені композиції перевищують їх за показниками корозійної стійкості.

Висновки. Встановлено, що модифікація епоксидної матриці бідисперсною системою наповнювачів забезпечує підвищення корозійної стійкості покриттів у середовищі морської води, що підтверджено зростанням питомого опору до $\rho = 0,29 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ та зниженням питомої ємності до $c = 16\text{--}18 \text{ пФ/м}^2$. Підвищення захисних властивостей зумовлено синергічною дією трьох механізмів: хімічного зшивання полімерної матриці, формування дифузійного бар'єру нанонаповнювачем та гідрофобізації структури, що забезпечує обмеження проникнення агресивних компонентів і підвищення довговічності покриттів.

Публікація містить результати досліджень, що фінансувалися у рамках іменної стипендії Верховної Ради України для молодих учених — докторів наук за 2025 рік (Постанова Верховної Ради України від 21 серпня 2025 року № 4583-IX).

БАР'ЄРНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ У КИСЛОТНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ПРИ ЗАХИСТІ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД

Сапронова А.В., Воробйов П.О., Литвиненко О.В.

Херсонська державна морська академія

(Україна)

Вступ. Експлуатація інженерних споруд у промислових умовах часто супроводжується впливом агресивних середовищ, зокрема кислотних дощів. Такі середовища є типовими при експлуатації поверхонь металоконструкцій у хімічній, енергетичній та транспортній інфраструктурі. Дія сірчаної кислоти призводить до інтенсифікації електрохімічної корозії металевих елементів, розвитку підплівкових процесів і деградації захисних покриттів. Традиційні лакофарбові матеріали в таких умовах демонструють обмежену ефективність через високу проникність для води та іонів, що пов'язано із недостатньою адгезійною міцністю. Перспективним напрямом підвищення довговічності інженерних споруд є застосування епоксидних композитних покриттів, модифікованих активними наповнювачами. Формування щільної полімерної сітки та наноструктурованих бар'єрів знижує проникність покриття для агресивних компонентів, що забезпечує підвищення корозійної стійкості металевої основи інженерних споруд.

Постановка задачі. Дослідити бар'єрні властивості епоксидних композитів у кислотному середовищі (сірчана кислота) та встановити механізм підвищення їх корозійної стійкості при захисті інженерних споруд.

Результати досліджень. Дослідження проводили в умовах дії 10%-го розчину сірчаної кислоти впродовж 30 діб. Як критерії оцінювання використовували питомий опір (ρ , Ом·м²) та питому ємність (c , пФ/м²), які характеризують здатність покриття протидіяти проникненню електроліту. Експериментально доведено, що немодифіковані епоксидні покриття характеризуються швидким зниженням питомого опору та зростанням ємності, що свідчить про інтенсивне проникнення кислоти в полімерну матрицю та розвиток підплівкової корозії. Тоді, як модифіковані епоксидні композити демонструють значно вищу стабільність досліджуваних параметрів. Зокрема, значення питомого опору зберігається на рівні $\rho \approx 0,25 \dots 0,30$ Ом·м², тоді як питома ємність не перевищує $c \approx 21 \dots 24$ пФ/м², що свідчить про формування ефективного бар'єрного шару покриття. Покращення властивостей пояснюється формуванням щільної полімерної структури та «звивистого» шляху дифузії агресивних компонентів. Введення функціональних наповнювачів забезпечує підвищення ступеня зшивання полімеру, зменшення кількості пор і мікродфектів, а також зниження проникності для іонів H⁺ та SO₄²⁻. Отримані результати свідчать про високий потенціал модифікованих епоксидних композитів як ефективних бар'єрних покриттів у кислотних середовищах. Їх застосування дозволяє підвищити експлуатаційну надійність і довговічність інженерних споруд.

Висновки. Встановлено, що модифікація різнодисперсними добавками епоксидних композитів забезпечує підвищення їх бар'єрних властивостей у середовищі сірчаної кислоти, що підтверджується стабільними значеннями питомого опору ($\rho = 0,25 \dots 0,30$ Ом·м²) та зниженими значеннями питомої ємності ($c = 21 \dots 24$ пФ/м²). Доведено, що підвищення корозійної стійкості обумовлене синергічною дією ущільнення полімерної сітки та формування дифузійного бар'єру, що обмежує проникнення агресивних компонентів і забезпечує підвищення довговічності інженерних споруд.

Роботу виконано за рахунок коштів гранту Президента України, наданого Національним фондом досліджень України («Створення полімерних покриттів призначених для захисту і післявоєнного відновлення поверхонь промислових об'єктів та інженерних споруд». Реєстраційний номер проєкту 2025.05/0003).

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ЕПОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ НАПОВНЕНИХ ДИСКРЕТНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ

Соценко В.В., Сапронова А.В., Браїло М.В.

Херсонська державна морська академія

(Україна)

Вступ. Одним із перспективних напрямів підвищення експлуатаційних характеристик епоксидних композитів є модифікація полімерної матриці дискретними волокнистими наповнювачами. Введення волокон органічного походження дозволяє впливати на процеси структуроутворення, міжфазову взаємодію інгредієнтів та механізм руйнування полімерів. Водночас ефективність армування значною мірою залежить від ступеня адгезійної взаємодії між волокнистим наповнювачем і епоксидною матрицею, що обумовлює необхідність комплексного дослідження структури композитів із використанням сучасних методів аналізу [1, 2].

Постановка задачі. Дослідити структурні особливості епоксидних покриттів, наповнених сумішшю дискретних волокон, методом ІЧ-спектрального аналізу.

Результати досліджень. Для формування композитних матеріалів використовували епоксидний діановий олігомер ЕД-20, отверджений поліетиленполіаміном (ПЕПА). Як наповнювач застосовували суміш дискретних волокон органічного походження за вмісту $q = 0,25 \dots 2,00$ мас.ч.

ІЧ-спектральний аналіз проводили у діапазоні хвильових чисел $\nu = 400 \dots 4000$ см^{-1} . Встановлено наявність широкого спектра смуг поглинання, що відповідають валентним і деформаційним коливанням функціональних груп полімерної матриці та волокнистого наповнювача. Аналіз ІЧ-спектрів дозволив виявити зміни інтенсивності пропускання (T , %), відносної площі піків (S , %) та зміщення характеристичних смуг поглинання. Для композитів, наповнених $q = 0,50 \dots 0,75$ мас.ч. дискретних волокон, встановлено зміщення смуги поглинання гідроксильних груп О–Н та N–H у ділянці $\nu = 3408$ см^{-1} у бік нижчих частот на $\Delta\nu = 3,86$ см^{-1} . Одночасно спостерігали зменшення відносної площі піку з $S = 98,9$ % до $S = 88,1$ %, що свідчить про посилення міжмолекулярної взаємодії між гідроксильними групами волокнистої складової та полярними групами епоксидної матриці.

Встановлено також зміну характеристик смуги поглинання при $\nu = 914$ см^{-1} , яка відповідає коливанням епоксидних груп С–О–С. Зменшення відносної площі піку з $S = 25,4$ % до $S = 17,5$ % для композитів, наповнених $q = 0,50 \dots 0,75$ мас.ч., вказує на активне протікання реакцій полімеризації та підвищення ступеня конверсії епоксидних груп. Додатково спостерігали підвищення інтенсивності смуг поглинання при $\nu = 1700$ см^{-1} та $\nu = 1112$ см^{-1} , що характеризують коливання груп С=О та С–О–С. Це свідчить про участь волокон у формуванні міжфазової взаємодії та структури композитного матеріалу.

Висновки. Методом ІЧ-спектрального аналізу встановлено структурно-хімічну взаємодію між епоксидною матрицею та сумішшю дискретних волокон. Це підтверджується зміщенням характеристичних смуг поглинання та зміною відносної площі піків функціональних груп О–Н, N–H і С–О–С. Встановлено, що введення $q = 0,50 \dots 0,75$ мас.ч. дискретного наповнювача забезпечує підвищення ступеня зшивання епоксидної матриці та формування більш структурно впорядкованої композитної системи за рахунок посилення міжфазової взаємодії інгредієнтів.

ЛІТЕРАТУРА

3. Khalimov S., Nurmuhhammadov R., Sadikov M., Khasanov M. Study evaluation of adhesion between polymer and reinforcing fillers. International journal of research in commerce, IT, Engineering and social sciences. 2022. 16 (5). 67-72.
4. Sapronov O., Buketov A., Kim B., et all. L. Increasing the Service Life of Marine Transport Using Heat-Resistant Polymer Nanocomposites. Materials. 2024. Vol. 17. 1503.

ПРУЖНИЙ ПІДХІД ПРИ МОДЕЛЮВАННІ РАДІАЦІЙНОГО РОСТУ ЦИРКОНІЮ, ВІДПОВІДАЛЬНОГО ЗА СТАБІЛЬНІСТЬ ФОРМИ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕАКТОРІВ НА ТЕПЛОВИХ НЕЙТРОНАХ, КЛАСТЕРНА ДИНАМІКА

Троценко О.Г., Остапчук П.М.

*Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України
(Україна)*

Вступ. Сучасний розвиток технологій ставить перед морським транспортом виклик — забезпечити ефективну і екологічну енергетику. У цьому контексті використання ядерної енергетики стає одним із потенційних шляхів досягнення енергетичної стабільності в морському транспорті. Ядерна енергетика на даному етапі має наступні переваги: ядерні енергетичні установки забезпечують тривале та стабільне виробництво енергії, що особливо важливо для довгих переходів по морях і океанах; відмова від нафти і газу на користь ядерної енергетики робить морський транспорт менш чутливим до коливань цін на енергоносії; ядерна енергія не виробляє парникових газів та інших шкідливих речовин. Це актуально в умовах зростаючого занепокоєння екологічними проблемами. Однак є деякі труднощі та ризики, пов'язані з використанням ядерної енергії в морському транспорті. Перш за все, це стосується безпеки. Ядерні установки потребують високих стандартів безпеки. Навіть невелика аварія може мати серйозні наслідки. З огляду на це постає задача перегляду базових радіаційно-індукованих явищ, відповідальних за безпеку експлуатації ядерних установок. Одним з таких явищ є радіаційний ріст (РР) оболонок тепловідільних елементів (ТВЕЛів) ядерного палива [1–5]. Воно негативно впливає на експлуатаційні характеристики елементів конструкцій реакторів. Стабільність їх розмірів, а також здатність прогнозувати зміни їх форми дуже важливі для розробників та операторів таких реакторів, оскільки деформація впливає на працездатність та термін служби активної зони реактора.

Актуальність досліджень. Паливні канали та паливні збірки всіх звичайних ядерних реакторів, які виробляють енергію за рахунок поділу урану тепловими нейтронами, виготовлені з цирконію та його сплавів, так як вони мають низький поперечний переріз поглинання теплових нейтронів. Але при експлуатації виникають проблеми. Цирконій та його сплави піддаються радіаційному росту, тобто анізотропній деформації без будь-яких зовнішніх навантажень. Це явище було виявлено на початку шістдесятих років минулого століття [2]. Воно полягає в скороченні гексагонально щільно упакованого (ГЩУ) - металу уздовж осі c і подовженні уздовж осі a . Buckley [2] відразу ж припустив, що міжвузельні петлі формуються і ростуть на призматичних площинах, а вакансійні — на базисних. спостерігаються вакансійні петлі досить великих розмірів. На тепер встановлено такі експериментальні факти. Базисні або c — петлі формуються у площині $(000\bar{1})$ та мають вектор Бюргерса $\vec{b} = \langle 0001 \rangle$ або $\vec{b} = 1/2 \langle 0001 \rangle$. Вони майже завжди вакансійного типу. Призматичні або a — петлі мають вектор Бюргерса $\vec{b} = 1/3 \langle 11\bar{2}0 \rangle$ і формуються приблизно у площині $(10\bar{1}0)$. У більшості випадків петлі різної природи можуть співіснувати. При нейтронному опроміненні a — петлі формуються першими, c — петлі з'являються після набору певної дози. Розуміння фізики таких спостережень, як співіснування міжвузельних і вакансійних петель у призматичній площині цирконію [3–5] чи існування тільки вакансійних петель у базисній площині [3–5], дають можливість удосконалити розуміння загальних механізмів деформації цирконію і його сплавів. Тому актуальність проблеми прогнозування поведінки цирконію та його сплавів при опроміненні сумнівів не викликає. А вирішення цієї проблеми не можливе без розуміння цього явища.

Постановка задачі. Модель радіаційного росту цирконію, заснована на підході

кластерної динаміки, дозволяє описати мікроструктуру дислокаційної петлі під впливом опромінення протягом тривалого часу

Щодо деформації цирконію у $\langle a \rangle$ -, $\langle c \rangle$ - напрямках при його РР, то у найпростішому варіанті вона описується формулами [6]:

$$\varepsilon_a \approx 1/2 \omega (C_v - C_i); \quad \varepsilon_c = -\omega C_v V_v^{rel}, \quad (1)$$

де C_v , C_i — концентрації вакансій та міжвузельних атомів (см^{-3}); ω — атомний об'єм; V_v^{rel} — вакансійний релаксаційний об'єм ($V_v^{rel} = 0.43$). Оскільки базисні вакансійні петлі формуються після певної дози опромінення (3 зна), а від'ємна деформація ε_c спостерігається при дозі <1 зна її пов'язують з релаксацією вакансій у $\langle c \rangle$ -напрямку.

Розраховуємо деформацію росту, наприклад, уздовж головної осі монокристала:

$$\varepsilon_g = \varepsilon_a \sin^2 \varphi + \varepsilon_c \cos^2 \varphi \quad (2)$$

де φ — кут між головною віссю монокристала та кристалографічною віссю c . φ дорівнює в середньому 83° для кристалів по осі a ($\varphi = 79^\circ$ для йодистого кристала та $\varphi = 87^\circ$ для зонного рафінованого кристала) і дорівнює в середньому 27° для кристалів по осі c (26° для йодистого кристала і 28° для зонного рафінованого кристала).

Самі ж концентрації ТД розраховуються в рамках метода кластерної динаміки

$$\frac{dC_j}{dt} = G_j + \sum_k w(k, j) C_k - \sum_k w(j, k) C_j - L_j \quad (3)$$

де C_j — концентрація кластерів типу j , G_j — швидкість їх утворення, $w(k, j)$ — швидкість переходу кластерів C_k типу k у кластери типу j за рахунок поглинання точкових дефектів (ТД), L_j — швидкість втрат кластерів типу j на інших стоках. Саме ці швидкості, окрім коефіцієнтів дифузії $D_{v,i}$, містять величини $Z_{v,i}$ — ефективності поглинання ТД даним стоком.

Фізичний механізм поглинання «закладається» саме в $Z_{v,i}$. Для розрахунку $Z_{v,i}$ використовується здебільшого два підходи: дифузійна анізотропія ТД між площинами [7] і наш підхід анізотропна пружна взаємодія ТД зі стоками кристалу [8].

Ефективність поглинання ТД (анізотропна пружна взаємодія):

$$Z(r_c, R, R_{ext}) = \frac{1}{2\pi R} \iint_S e^{(-E_{int}(r,z))} [n \nabla \psi(r, z)] d\sigma. \quad E_{int}(r) = \beta E_{int} \quad \beta = 1/kT \quad (4)$$

Функція ψ розраховується у системі координат для тороїдального резервуара [9] із квазістаціонарного рівняння дифузії в безрозмірних координатах:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \left(\frac{1}{r} - \frac{\partial E_{int}^D}{\partial r} \right) \frac{\partial \psi}{\partial r} - \frac{\partial E_{int}^D}{\partial z} \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (5)$$

А далі чисельні розрахунки методом кластерної динаміки.

Метою роботи є моделювання явища радіаційного росту цирконію у підході кластерної динаміки у класичній пружній ідеології, але з урахуванням анізотропії взаємодії ТД з реальними петлями Zr. Для виконання поставленої мети необхідно було здійснити низку теоретичних досліджень та розрахунків:

1. Використати метод анізотропної взаємодії точкових дефектів (ТД) зі стоками кристалу для розрахунку ефективності поглинання петлею ТД в залежності від її радіуса.
2. Використати ефективність поглинання для розрахунку деформації. Побудувати криві росту деформації а - осного і с - осного монокристалів, які якісно співпадатимуть з експериментальними точками.
3. Отримати залежність концентрації міжвузельних і вакансійних петель від їх радіусу для різних доз.

Обговорення результатів. Об'єктом дослідження є вакансійні і міжвузельні петлі

радіусу R , які лежать у призматичних площинах Zr . Для площини $(10\bar{1}0)$ вектор Бюргерса $\vec{b} = 1/3\langle 11\bar{2}0 \rangle$ нахилений. І тут аналітика працює тільки в рамках підходу ТФГ (Тензорної функції Гріна). Декартову систему координат повертаємо так, щоб вісь x була по напрямку нормалі до площини. Тоді петля лежить у площині yz , а її координати $(x' = 0; y'; z')$

Розрахунки проводились з використанням стандартної програми LSODA. Залежність ефективності поглинання міжвузельних і вакансійних петель для радіусу впливу $80b$ показана на рис.1

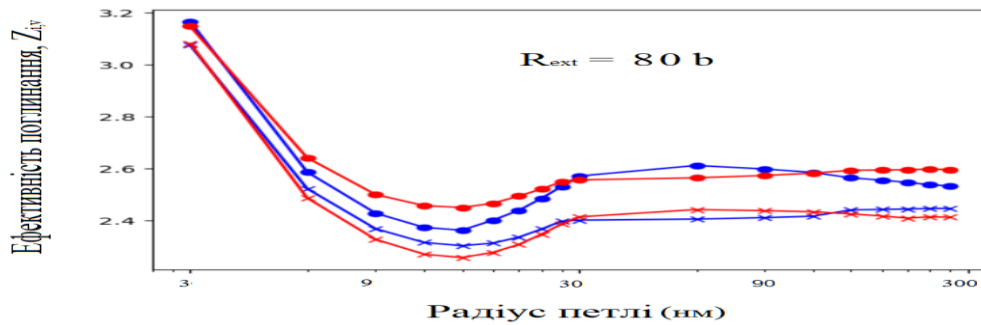


Рисунок 1 — Залежності ефективності поглинання петель різного характеру від їх радіуса. Червоні криві відповідають міжвузельним петлям цирконію. Сині криві — вакансійним петлям цирконію: o — міжвузля, x — вакансії

Зроблені висновки: петлі в призматичній площині краще поглинають міжвузля чим вакансії; до розміру 30 нм міжвузельні петлі краще поглинають міжвузля чим вакансійні петлі, а вакансійні петлі краще поглинають вакансії чим міжвузельні петлі; після розміру 30 нм і до 120 нм ситуація розвертається і тепер вакансійні петлі поглинають більше міжвузля, а міжвузельні петлі більше вакансій.

Дана ефективність поглинання була використана для розрахунку деформації. Результати дослідження деформації вздовж a -осьового і c -осьового монокристалу представлені на рис.2.

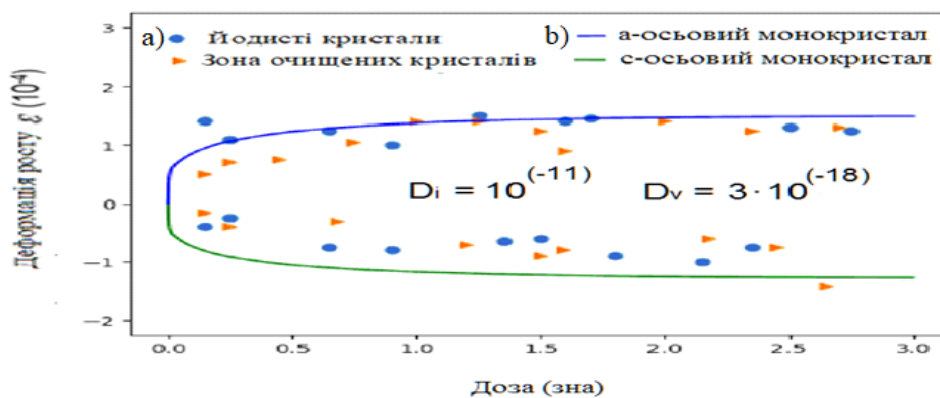


Рисунок 2 — Радіаційний ріст монокристалів цирконію вздовж осей a та c при температурі 553K. а) експериментальні точки [G.J.C. Carpenter, R.A. Murgatroyd, A. Rogerson, J.F. Watters, J. Nucl. Mater. 101 (1981) 28.]. б) розраховані криві росту (анізотропна пружна взаємодія) для коефіцієнтів дифузії $\bar{D}_i = 10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ і $D_v = 3.0 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$

Виявилось, що криві росту деформації a -осьового і c -осьового монокристалів при коефіцієнтах дифузії $\bar{D}_i = 10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ і $D_v = 3.0 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ якісно співпадають з експериментальними точками.

Також, чисельно пораховані: щільність вакансійних і міжвузельних петель у призматичних площинах від їх радіусу при дозах 0.1;1;3;5 зна; щільність вакансійних петель

у базисній площині при 5 зна. Вакансійні петлі у базисній площині у наших розрахунках починають рости після дози 3 зна. Результати представлені на рис.3.

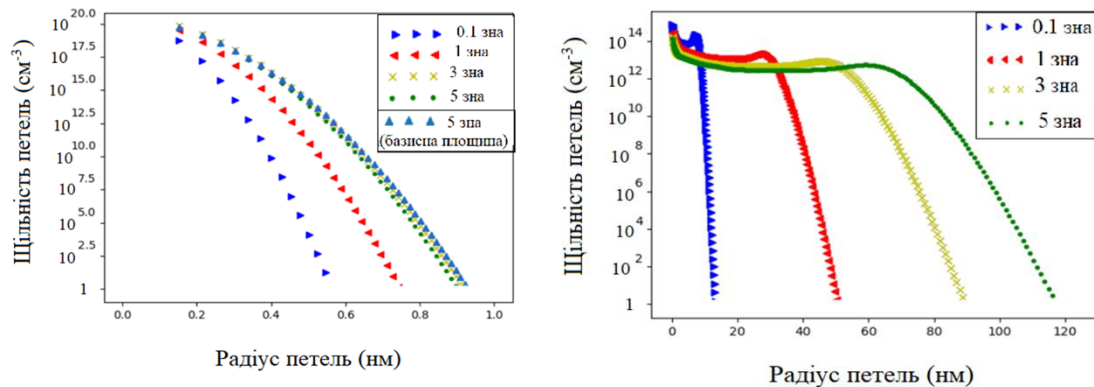


Рисунок 3 — Залежність щільності вакансійних (ліворуч) і міжвузельних (праворуч) призматичних петель від їх радіусу(анізотропна пружна взаємодія)

Щільність і розмір вакансійних петель в призматичних площинах росте зі збільшенням дози 3 зна. При дозі 5 зна розмір і щільність вакансійних петель в призматичних і базисних площинах зрівнюються. Для міжвузельних петель із збільшенням дози збільшується максимальний розмір і зменшується їх максимальна щільність.

Висновки.

1. У даній роботі використано метод анізотропної пружної взаємодії ТД зі стоками кристалу. Завдяки ньому було пораховано ефективність поглинання петлею точкових дефектів в залежності від її радіуса.

2. Дана ефективність поглинання була використана для розрахунку деформації. Виявилось, що криві росту деформації a -осьового і c -осьового монокристалів при коефіцієнтах дифузії $\bar{D}_i = 10^{-11} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ і $D_v = 3.0 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ якісно співпадають з експериментальними точками.

3. Отримано залежність концентрації міжвузельних і вакансійних петель від їх радіусу для доз 0,1;1;3;5 зна.

ЛІТЕРАТУРА

1. Buckley S.N. Irradiation Growth, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, England, AERE R 3674, 1962.
2. Buckley S.N., Irradiation Growth in Uranium, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, England, AERE R 5262, 1966.
3. Griffiths M. J. Nucl. Mater. 1988. V. 159. P. 190.
4. Woo C.H. Defect accumulation behaviour in hcp metals and alloys. J. Nucl. Mater. 2000. V. 276. P. 90.
5. Trotsenko O.G., Babich A.V., Ostapchuk P.M. Bias for prismatic dislocation loops in zirconium. Numerical analysis. Problems of Atomic Science and Technology. Series Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. 2023. N. 2 (144). P. 3–7. doi.org/10.46813/2023-144-003 .
6. R. Bullough, M.H. Wood// J. Nucl. Mater.1980 V. 90 P. 1.
7. C.H. Woo, U. Gosele Dislocation bias in anisotropic diffusive medium and irradiation growth. Journal of Nuclear Materials 119 (1983) 219–228
8. O.G. Trotsenko, A.V. Babich, P.M. Ostapchuk <a> Component radiation-induced dislocation loops of different nature in zirconium // Problems of Atomic Science and Technology. 2024. №2 (150)
9. V.I. Dubinko, A.S. Abyzov, A.A. Turkin Numerical Evaluation of the Dislocation Loop Bias. J. Nucl. Mater. 2005, v. 336, p. 11–21.

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛ-ОРГАНІЧНИХ КАРКАСІВ ЯК СОРБЕНТІВ В ЗАСОБАХ ЗАХИСТУ ОРГАНІВ ДИХАННЯ ВІД ТОКСИЧНИХ ГАЗІВ І ПАРІВ

Удовицький В.Г., Литвиненко В.В.

*Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України
(Україна)*

Вступ. В епоху стрімкої глобалізації є надзвичайно важливими морські перевезення, які наразі забезпечують до 90% світових торгових перевезень. Їх стратегічне становище у глобальній торгівлі та світовому економічному розвитку обумовлюють актуальність всіх питань, що стосуються безпеки морських вантажних і пасажирських суден (як в морі, так і в портах) для команди, працівників портів і населення припортових міст. Незважаючи на постійний розвиток судноплавної галузі (модернізація і підвищення технічного оснащення суден, цифровізація і впровадження електронної навігації, розвиток інфраструктури портів тощо) у цій галузі реальною залишається можливість аварій. Ще 20 років назад в роботі [1] стверджувалось, що судноплавство завжди було і буде пов'язано з ризиками, незважаючи на підвищення стандартів безпеки та удосконалення технологій. Наразі ці ризики, на жаль, підвищуються. Це обумовлюється не тільки збільшенням кількості суден, а і підвищенням міжнародної нестабільності та військовими конфліктами, що призводить до можливих збройних атак на судна, зміни традиційних схем судноплавства і подовження маршрутів, збоями в роботі портів та ін. [2].

Основна частина. Морські перевезення пов'язані з багатьма складнощами і небезпеками. Одну з найбільших потенційних небезпек становить транспортування токсичних хімічних речовин. Вони в разі аварії на різних етапах перевезення (завантаження чи розвантаження в порту чи припортовій зоні, транспортування морем) можуть створити значну загрозу хімічного ураження і навіть смерть членів команди, чи інших людей, які попадуть в зону ураження. Особливо небезпечними є аварії, які поєднуються з пожежами чи вибухами, оскільки вони можуть привести до значних викидів токсичних речовин в оточуюче середовище. Окрім аварійних ситуацій, що можуть призвести до викидів хімічних токсикантів, загрозу хімічного ураження людей можуть створювати також штатні ситуації, пов'язані з розвантаженням в портах хімічно-небезпечних речовин і повторним використанням герметичних контейнерів, в яких ці речовини транспортувались. В роботі [3], наприклад, було досліджено 2113 вантажних контейнерів, що прибули з хімічно-небезпечними речовинами в один з найбільших контейнерних терміналів Європи в порту Гамбурга. Було встановлено, що 70% контейнерів було забруднено токсичними речовинами вище гранично допустимих рівнів хронічного ураження при довгостроковій дії, а в 36% випадків було зафіксовано забруднення вище рівнів гострого ураження навіть при короткостроковій дії. Встановлено також, що забруднення бензолом або формальдегідом було в 4 рази вищим, ніж фумігантами. Кількість морських контейнерів, в яких транспортуються різні вантажі, в тому числі і хімічно небезпечні, налічується сотні мільйонів і питанням безпечної роботи персоналу всередині контейнерів повинна приділятися особлива увага [4,5], як і всім питанням безпеки транспортування хімічно-небезпечних вантажів на кожному з етапів цього процесу.

Термін «безпека» в його теоретичному розумінні та практичному застосуванні у різних галузях розглядається в двох аспектах. У контексті теорії про безпеку та ризик безпеку можна визначити як стан, при якому відсутні небажані події, такі як аварії або інциденти. На противагу цьому в іншому, практичному аспекті, безпека розглядається також як здатність успішно діяти в різних аварійних умовах [6]. В разі виникнення на борту хімічної аварії для забезпечення можливості успішно діяти надзвичайно важливо щоб члени команди мали надійні технічні засоби захисту органів дихання, які б убезпечили їх від хімічного отруєння.

Основними засобами захисту органів дихання від ураження токсичними речовинами

в різних станах (гази, пари, аерозолі) є фільтруючі та ізолюючі протигази, які почали розвиватися ще на початку минулого століття після початку застосування в першій світовій війні бойових отруйних речовин. Основною складовою любого протигаза фільтруючого типу, від якої залежить його захисна дія, є фільтр з сорбенту, який повинен поглинати токсиканти з повітря, що проходить через цей сорбент. За більше ніж 100-літню історію розвитку протигазів досліджувалось багато різних сорбентів для їх фільтрів. До цього часу найбільш доцільним і ефективним вважається використання в якості сорбенту активованого вугілля (АВ), яке може мати розвинену поверхню, що забезпечує його високу адсорбційну здатність. Для підвищення адсорбційної здатності і селективності поглинання конкретних токсикантів використовують модифікацію (імпрегнацію) АВ спеціальними речовинами.

Конкурентом АВ в використанні в багатьох фільтрах, зокрема в протигазових та фільтруючих масках, з часом можуть стати метал-органічні каркаси (МОК, metal-organic frameworks, MOF). Завдяки своїм чудовим характеристикам (досить часто рекордним) вони вже знайшли широке практичне застосування і ще мають значні потенційні можливості практичного застосування за різним призначенням, зокрема, і в якості сорбентів різних токсичних сполук в газових і рідинних середовищах [7, 8]. Вони представляють собою хімічні сполуки, в яких окремі іони металів або поліядерні фрагменти зв'язані між собою органічними «містковими» молекулами (лінкерами). Вони можуть утворювати 1-, 2- і 3-розмірні структури, які умовно показані на рис.1. За відкриття і подальші широкі дослідження МОК в 2025 році була присуджена Нобелівська премія з хімії трьом вченим — Susumu Kitagawa (Японія), Richard Robson (Австралія) та Omar Yaghi (США). Наразі вже опубліковано багато робіт, присвячених питанням синтезу, дослідженню властивостей і практичного використання МОК для різних цілей — каталіз, мембранне розділення газів, поглинання токсичних газів, парів та різних хімічних сполук, зокрема і радіонуклідів, акумулятори водню, суперконденсатори, цільова нанодоставка ліків, сенсори, тощо. Кількість публікацій, присвячених різним питанням синтезу, досліджень властивостей і використанню МОК щорічно значно збільшується, що свідчить про велику актуальність розвитку цього наукового напрямку.

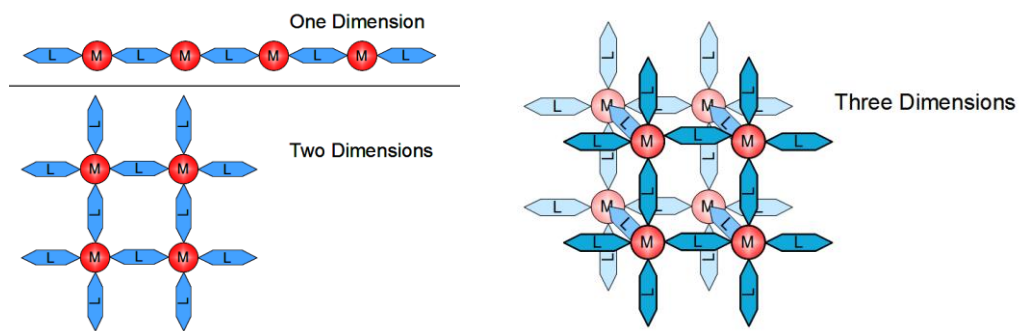


Рисунок 1 — Умовне зображення 1-, 2- і 3-розмірних МОК-структур

Адсорбційна здатність любого пористого сорбента визначається, по-перше, сумарною величиною поверхні його пор. Це одна з найбільш важливих його характеристик. На рис. 2 приведена номограма величин площі поверхні для вже традиційних сорбентів, які найбільш часто використовуються в технічних засобах захисту органів дихання (цеоліти, активоване вугілля), та експериментальні значення цього параметру ряду МОК, а також теоретичні оцінки можливого максимально досяжного значення поверхні МОК. Ці дані наглядно підтверджують переваги МОК надтрадиційними сорбентами за величиною площі поверхні, яка визначає можливу сорбційну ємність сорбента

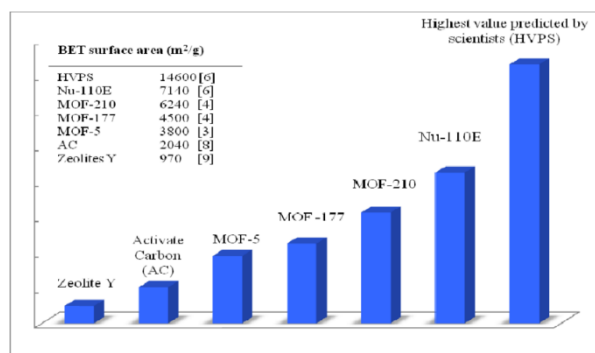


Рисунок 2 — Значення площі поверхні для традиційних сорбентів і МОК

Висновки. Метал-органічні каркаси є новим матеріалом, який вже використовується і має значні перспективи використання в якості сорбентів в різних фільтрах, зокрема, і в фільтрах технічних засобів захисту органів дихання. Їх переваги над традиційними сорбентами полягають в великій площі поверхні, великій сорбційній ємності, можливості отримання універсальних сорбентів широкого спектра токсичних сполук, а також селективних сорбентів на окремі токсиканти. Ядерних фрагментів та органічних лінкерів, які можуть утворювати МОК, існує дуже велика кількість. Це відкриває широкі можливості синтезу МОК-сполук з потрібними характеристиками. Важливим також є те, що МОК-структури з наперед заданими властивостями можуть бути створені з використанням вже добре розвинених методів молекулярного комп'ютерного моделювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Akten N. Shipping accidents: a serious threat for marine environment. *Journal of Black Sea/Mediterranean Environment*, 2006, 12.3: 269–304.
2. United Nations Trade; Development (UNCTAD). *Review of Maritime Transport 202(5): Staying the Course in Turbulent Waters*. Stylus Publishing, LLC, 2025.
3. Baur X. et al. High frequency of fumigants and other toxic gases in imported freight containers — an underestimated occupational and community health risk. *Occupational and environmental medicine*, 2010, 67.3: 207–212.
4. Svedberg U. et al. Work inside ocean freight containers-personal exposure to off-gassing chemicals. *Annals of occupational hygiene*, 2013, 57.9: 1128–1137.
5. Baur, X. et al. Health risks in international container and bulk cargo transport due to volatile toxic compounds. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2015, 10.1: 19.
6. Waskito D. H. et al. Comprehensive literature review of systemic safety analysis: trends and development in the maritime sector. *Safety Science*, 2026, 200: 107208.
7. Islamogly T. et al. Metal–organic frameworks against toxic chemicals. *Chemical reviews*, 2020, 120.16: 8130–8160.
8. Decoste J. B. et al. Metal–organic frameworks for air purification of toxic chemicals. *Chemical reviews*, 2014, 114.11: 5695–5727.

ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ ВИДІВ ЕКОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Шепеленко І. В., Красота М. В., Скібінський С. О.
Центральноукраїнський національний технічний університет
(Україна)

Вступ. Глобальні світові виклики, що пов'язані з підвищенням рівня забруднення навколишнього середовища шкідливими речовинами відпрацьованих газів двигунами внутрішнього згоряння (ДВЗ), ще раз підкреслюють актуальність та перспективність розвитку різних видів «зеленого транспорту».

Для України питання «зеленого» транспорту набуває особливої ваги. Перехід вітчизняних стандартів до рівня вимог Євро-6, а також скорочення викидів транспорту на 30% до 2030 року згідно з Національною енергетичною стратегією визначає впровадження екологічно чистих транспортних засобів як стратегічний пріоритет держави.

Актуальність дослідження. Вдалими прикладами застосування «зеленого» транспорту є впровадження електробусів як громадського транспорту, розвиток мереж тролейбусів з автономним ходом, оснащення більшості міст пунктами для зарядки електромобілів та інші ініціативи.

За даними Global EV Outlook [1], кількість продажів електромобілів у 2025 році значно зросла порівняно з минулими роками (рис. 1).

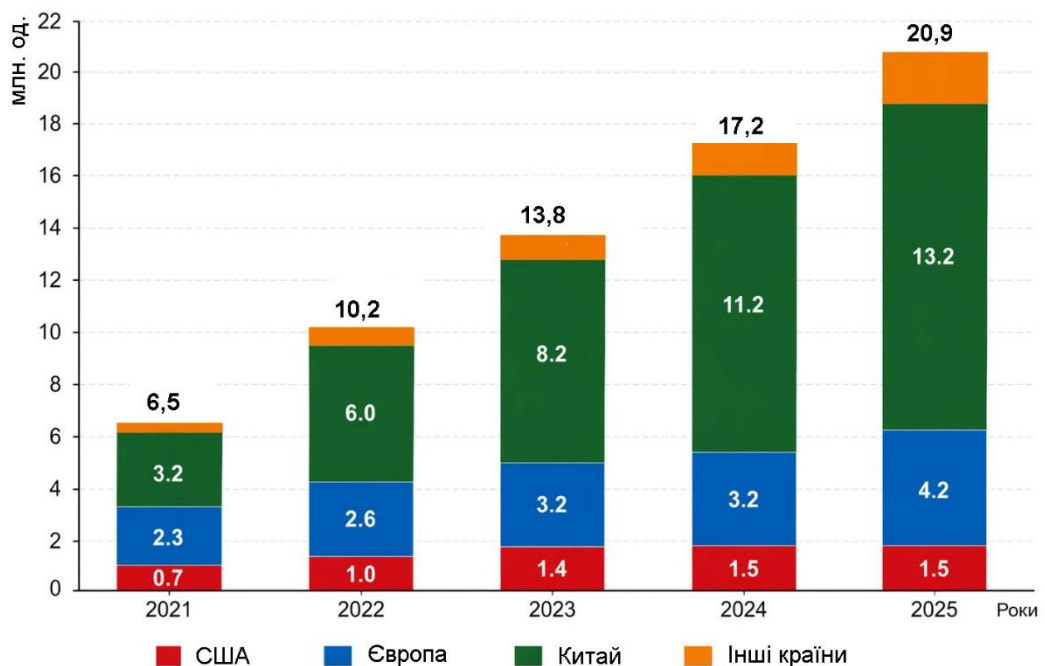


Рисунок 1 — Кількість проданих електромобілів у період 2021–2025 рр. за країнами світу [1]

Разом з тим, ще залишається багато проблем на шляху до широкого впровадження саме цього виду транспорту.

Метою даної роботи є систематичне порівняння різних видів електромобілів за технічними та екологічними показниками.

Викладення основного матеріалу. Розглянемо електромобілі, які мають принципово різні технічні рішення: повністю на акумуляторі (BEV), гібридні електромобілі (HEV), гібридні електромобілі, що підключаються (PHEV), і водневі електромобілі (FCEV). У структурі світового ринку цих видів транспорту переважна частка належить BEV – більше 50% (рис. 2).

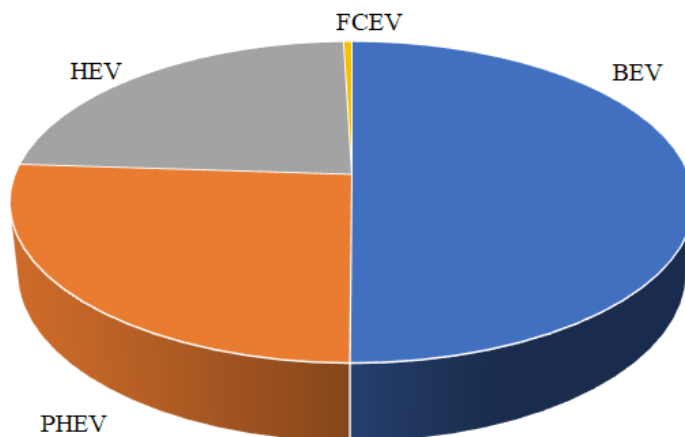


Рисунок 2 — Структура світового ринку електромобілів

Порівняння розглянутих видів електромобілів із традиційним автомобілем з ДВЗ за основними показниками наведено в табл.1.

Таблиця 1 — Порівняльні дані різних видів електромобілів та традиційного автомобіля

Показник	BEV	HEV	PHEV	FCEV	ДВЗ
Викиди CO ₂ , г/км	0	80–110	20–60	0	120–200
Запас ходу, км	300–700	600–1000	50–80 (ел.) + 700 (ДВЗ)	400–750	600–1200
Час заправки/ заряджання	6–12 год.	авто	30–120 хв.	3–5 хв.	3–5 хв.
Рівень розвитку інфраструктури заправки/ заряджання	Середній	Не потрібна	Середній	Низький	Розвинений

Як можна побачити (табл. 1), BEV є повністю екологічними, тобто не виділяють шкідливих викидів під час експлуатації. Але вони значно поступаються запасом ходу та часом заряджання у порівнянні з ДВЗ.

Основною перевагою гібридних електромобілів HEV є їх підвищена енергоефективність та можливість скорочення споживання палива та викидів шкідливих речовин. Крім того, HEV зазвичай мають більш тривалу дальність поїздок в порівнянні з електричними автомобілями BEV, а також не потребують спеціальної інфраструктури [2].

PHEV сприяють зниженню викидів шкідливих речовин, поєднуючи переваги BEV та ДВЗ, але з 2040 р. будуть обмежені в ЄС у зв'язку з угодою про заборону на продаж автомобілів з ДВЗ [3].

Перевагами водневих електромобілів FCEV є швидка заправка та значний запас ходу. Однак, низький рівень розвитку водневої інфраструктури, а також відносно висока вартість виробництва та придбання автомобілів значно обмежують їх широке використання.

Якщо порівнювати найближчі перспективи розглянутих видів «зеленого» транспорту в умовах України, то слід зазначити беззаперечну перевагу BEV, для якого вже існує інфраструктура та державна підтримка. HEV є практичним рішенням для скорочення витрат пального без інфраструктурних вкладень, а використання FCEV наразі варто розглядати як довгостроковий пріоритет.

Висновки. Порівняння різних видів «зеленого» транспорту дозволяє зробити наступні висновки:

BEV (батареїні електромобілі) є на сьогодні домінуючим видом «зеленого»

транспорту у світі та в Україні. Їх ефективність, нульові викиди та розвинена інфраструктура формують перевагу над ДВЗ у майбутньому.

HEV (звичайні гібриди) забезпечують зниження витрат пального до 30%, не потребують зарядної інфраструктури та є рішенням для водіїв, що не готові до повної електрифікації.

PHEV (підзарядні гібриди) є технічно привабливими, але заборона їх продажу у майбутньому значно обмежує перспективність цього виду транспорту.

FCEV (водневі транспортні засоби) у зв'язку з практично відсутньою інфраструктурою в нашій країні слід розглядати в довгостроковій перспективі.

Для України головними бар'єрами для широкого впровадження «зеленого» транспорту є: висока вартість транспортного засобу, недостатня інфраструктура, нестабільність електропостачання в умовах воєнного часу. Водночас подальший розвиток саме «зеленого» виду транспорту є незворотнім процесом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Technology: Electric vehicles: веб-сайт. URL: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026/technology-electric-vehicles> (дата звернення: 08.09.2026).
2. Види електромобілів (BEV, HEV, PHEV, FCEV): веб-сайт. URL: <https://e-auto.in.ua/vidi-elektromobiliv-bev-hev-phev-fcev/> (дата звернення: 08.09.2026).
3. Євросоюз відкладе заборону на ДВЗ до 2040 року: веб-сайт. URL: <https://ev-club.com.ua/news/us/evrosoyuz-vidklade-zaboronu-na-dvz-do-2040-roku> (дата звернення: 08.09.2026).

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ВІТРОВОГО РУХУ (WAPS) ЯК СТРАТЕГІЧНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ НОРМ ІМО

Щедролюсєв О. В., Соценко В. В., Коновалова Г. В.

Херсонський навчально-науковий інститут

*Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Сучасна морська індустрія перебуває на етапі радикальної трансформації, зумовленої прийняттям Стратегії ІМО 2023 року щодо скорочення викидів парникових газів (GHG). Нові амбітні цілі передбачають досягнення нульового рівня викидів до або близько 2050 року, з проміжними контрольними показниками на 2030 та 2040 роки. Оскільки перехід на альтернативні види палива (аміак, водень, метанол) потребує значних інвестицій в інфраструктуру та нові енергетичні установки, технології енергозбереження стають критично важливими.

Системи допоміжного вітрового руху (WAPS — Wind Assisted Propulsion Systems) повертаються в суднобудування на новому технологічному рівні. На відміну від традиційного вітрильного флоту, сучасні WAPS є повністю автоматизованими установками, що працюють у поєднанні з головним двигуном. Вони класифікуються як «fuel-agnostic» рішення, тобто такі, що підвищують ефективність судна незалежно від типу палива, яке воно використовує.

Постановка задачі. Енергія вітру використовується через різні аеродинамічні принципи, що дозволяє адаптувати технологію під конкретні типи суден:

- роторні вітрила (Rotor Sails/Flettner Rotors): вертикальні циліндри, що обертаються. При взаємодії з вітром виникає ефект Магнуса, створюючи тягову силу, перпендикулярну напрямку вітру. Це найбільш перевірена часом технологія, що демонструє високу ефективність на танкерах та балкерах;
- жорсткі вітрила-крила (Wing Sails): використовують принцип аеродинамічного крила для створення підйомної сили (тяги). Вони можуть бути багатосекційними, що дозволяє регулювати площу та кут атаки залежно від сили вітру;
- всмоктувальні вітрила (Suction Wings): це стаціонарні товсті профілі з системою всмоктування повітря через перфоровану поверхню. Це дозволяє уникнути відриву потоку та створювати велику силу тяги при відносно невеликих габаритах установки;
- тягові повітряні змії (Kites/Towed Sails): повітряні змії великої площі, що працюють на висоті 100-300 метрів, де вітер стабільніший і сильніший. Головна перевага – відсутність захаращення палуби, що важливо для контейнеровозів. Порівняльний аналіз основних типів систем вітрового руху (WAPS) представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 — Порівняльний аналіз основних типів систем вітрового руху (WAPS)

Технологія	Фізичний принцип	Потенціал економії палива	Ключові переваги	Основні обмеження
Роторні вітрила (Rotor Sails)	Ефект Магнуса (циліндри, що обертаються)	5–20%	Повна автоматизація, висока питома тяга, компактність на палубі	Висота установки (AIR Draft), значна вага обладнання
Жорсткі вітрила (Wing Sails)	Аеродинамічна підйомна сила (жорстке крило)	10–30%	Максимальна ефективність при гострих кутах вітру, можливість складання	Складність конструкції, вплив на видимість з містка

Продовження таблиці 1

Всмоктувальні вітрила (Suction Wings)	Керування граничним шаром (активне всмоктування)	5–15%	Висока сила тяги при відносно невеликих габаритах профілю	Потреба в додатковій електроенергії для роботи насосів
Повітряні змії (Kites/Parasails)	Тяга за рахунок високошвидкісних потоків на висоті	10–25%	Мінімальне захаращення палуби, доступ до стабільних вітрів	Складність запуску та прибирання, вузький сектор робочих кутів

Вплив WAPS на регуляторні індекси ІМО (EEDI/EEEXI та СІІ)

Впровадження WAPS безпосередньо впливає на математичні моделі енергоефективності судна, що використовуються регуляторними органами.

Індекси EEDI та EEEXI. Ці індекси оцінюють конструктивну енергоефективність судна (нових та існуючих відповідно). Формула розрахунку базується на відношенні емісії CO₂ до корисної транспортної роботи. При встановленні WAPS у розрахунок вводиться від'ємний додаток, який враховує потужність, що генерується вітром, зменшуючи загальний показник викидів судна на певну величину.

Індикатор вуглецевої інтенсивності (СІІ). СІІ є експлуатаційним показником, який оцінює судно щороку за п'ятибальною шкалою (від А (найкращий) до Е (найгірший)). Оскільки WAPS безпосередньо знижує споживання палива під час переходів, це дозволяє судну зберігати високий рейтинг навіть при посиленні норм ІМО. Для суден, що знаходяться у зонах ризику (рейтинги D та E), встановлення вітрових систем може стати єдиною альтернативою обмеженню швидкості головного двигуна (EPL).

Експлуатаційні переваги та інтеграція

Однією з ключових переваг WAPS є їхня здатність працювати спільно з системами метеорологічного планування маршрутів (Weather Routing). Сучасне програмне забезпечення дозволяє прокладати курс судна таким чином, щоб максимально використовувати сприятливі вітрові умови, навіть якщо це дещо збільшує загальну дистанцію. Це створює синергетичний ефект, де економія палива може зрости з базових 5–10% до 20–25% у сприятливих регіонах (наприклад, у Північній Атлантиці).

Проте інтеграція WAPS потребує врахування додаткових факторів:

- вітрові установки створюють додатковий креновий момент, що потребує перерахунку характеристик стійкості судна;
- великі вітрила можуть обмежувати огляд з навігаційного містка, що регламентується конвенцією SOLAS;
- ва балкерах вітрила повинні бути складними або рухомими, щоб не заважати роботі портових кранів.

Економічна доцільність у контексті вуглецевого податку

З впровадженням систем торгівлі викидами (наприклад, EU ETS для суден, що заходять у порти ЄС), викиди CO₂ стають прямими фінансовими витратами для операторів. WAPS дозволяє не лише економити на фізичному паливі, а й значно зменшувати виплати за квоти на викиди вуглецю. При поточному зростанні цін на «зелене» паливо, термін окупності WAPS скорочується до 3–5 років, що робить їх привабливими для середньострокового інвестування. Показники ефективності WAPS для різних типів суден представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 — Показники ефективності WAPS для різних типів суден

Тип	Розмір	Мала	Середня	Велика	Мала	Середня	Велика	Мала	Середня	Велика
	Зона	Тропічна зона			Середній показник по Світовому океану			Високі широти		
кВт / %		Співвідношення потужні WAPS до економії палива								
Балкер	Handysize	105/3	210/5	315/8	294/7	587/14	881/21	555/11	1109/23	1664/34
	Panamax	112/3	224/5	336/8	313/7	626/14	939/21	591/11	1182/23	1773/34
	Kamsarmax	108/2	215/5	323/7	300/6	601/13	901/19	567/10	1135/21	1702/31
	Capesize	111/2	221/3	332/5	308/4	616/8	924/13	581/7	1162/14	1743/21
Танкер	MR	106/3	211/6	317/9	295/8	509/16	885/23	557/12	1144/25	1671/37
	LR	112/2	223/4	335/6	311/5	622/11	934/16	587/9	1174/18	1762/27
	VLOC	113/1	226/3	340/4	314/3	629/7	943/10	592/6	1184/11	1775/17
RORO	Length 150m	114/7	227/14	341/21	318/19	635/38	953/57	600/36	1200/73	1800/100

Висновки. Системи вітрового руху є одним із найбільш зрілих та ефективних рішень для декарбонізації морського транспорту в найближче десятиліття. Вони забезпечують гнучкість у дотриманні норм EEXI та CII, не вимагаючи кардинальної зміни паливної інфраструктури. Майбутнє галузі полягає в гібридизації: поєднанні WAPS, енергоефективних корпусів та екологічно чистого палива, що дозволить досягти

кліматичних цілей без втрати економічної спроможності судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. WAPS: How WAPS can help to comply with GHG regulations. Technical Report. White Paper, 2024. 50 p.
2. IMO. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Resolution MEPC.377(80). 19 p.
3. International Windship Association (IWSA). Annual Progress Report 2023. 29 p.

ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕГРАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ У СУДНОВИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ ФЛОТУ

Щедролоєв О. В., Соценко В. В., Коновалова Г. В.

Херсонський навчально-науковий інститут

*Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
(Україна)*

Вступ. Морська індустрія перебуває під тиском амбітних цілей Стратегії ІМО 2023 року, яка вимагає досягнення нульових викидів парникових газів до 2050 року. Оскільки перехід на «зелений» водень чи аміак супроводжується значними технологічними викликами, пріоритет надається технологіям, що підвищують енергоефективність судна незалежно від типу палива («fuel-agnostic»).

Фотоелектричні системи (SPVS) на судах перейшли з розряду експериментальних рішень у категорію зрілих інженерних інструментів. Сучасні SPVS є повністю автоматизованими і працюють у синергії з головною енергетичною установкою та системами накопичення енергії (ESS), що дозволяє суттєво зменшити навантаження на допоміжні дизель-генератори під час переходів та стоянок.

Постановка задачі.

Енергія сонячного випромінювання на судні використовується через різні типи фотоелектричних модулів, кожен з яких має свої експлуатаційні особливості:

- **кристалічні кремнієві панелі (Mono/Poly-Si):** мають найвищий ККД (18–22%), проте потребують жорстких рам та монтажу на спеціальних фермах, що може збільшувати парусність та центр ваги судна;
- **тонкоплівкові гнучкі модулі (CIGS/CdTe):** мають меншу вагу та можливість монтажу безпосередньо на вигнуті поверхні надбудов або кришки трюмів. Вони демонструють кращу стабільність при високих температурах, що важливо для тропічних зон плавання;
- **двосторонні (Bifacial) панелі:** здатні вловлювати відбите від поверхні води або світлої палуби випромінювання, що підвищує генерацію на 10–15% при обмеженій площі монтажу.

Порівняльний аналіз технологій суднових фотоелектричних систем представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 — Порівняльний аналіз технологій суднових фотоелектричних систем

Технологія	Фізичний принцип	Питома потужність, Вт/м ²	Ключові переваги	Основні обмеження
Жорсткі панелі	Кристалічний кремній	180–220	Максимальний ККД, тривалий термін служби	Вага, крихкість, потреба в складних кріпленнях
Гнучкі плівки	Тонкоплівкові напівпровідники	120–150	Мала вага, стійкість до вібрацій	Нижчий ККД, вища вартість за 1 кВт
Гібридні модулі	Фотовольтаїка+термозбір	200+	Генерація електрики та підігрів води	Складність системи охолодження

Розрахунок необхідної площі панелей

Для інтеграції SPVS у проект судна необхідно визначити корисну площу палуб та

надбудов. Розрахунок площі фотоелектричного масиву (A , m^2) для забезпечення заданої пікової потужності (P_{peak} , кВт) проводиться за формулою [1]:

$$A = \frac{P_{peak}}{\mu_{pv} G_{SIC} PR}$$

μ_{pv} — коефіцієнт корисної дії фотоелектричної панелі,

G_{SIC} — стандартна інтенсивність сонячного випромінювання (зазвичай 1 кВт/м^2),

PR (Performance ratio) — коефіцієнт експлуатаційних втрат, що враховує нагрів панелей, втрати в інверторах, кабелях та забруднення сіллю (типове значення для морських умов 0,70–0,80).

Вплив на регуляторні індекси ІМО (ЕЕХІ та СІІ)

Впровадження сонячних систем безпосередньо впливає на математичні моделі енергоефективності, що використовуються регуляторними органами.

Індекси ЕЕДІ та ЕЕХІ: при встановленні SPVS у розрахунок вводиться від’ємний додаток, який враховує еквівалентну потужність, що генерується без спалювання палива, зменшуючи загальний показник викидів конструкції.

Індикатор СІІ: сонячна генерація знижує річне споживання палива на «готельні» потреби (освітлення, кондиціонування, вентиляція). Це дозволяє судну зберігати високий рейтинг (А або В) навіть при посиленні норм ІМО, уникаючи обмеження швидкості головного двигуна (EPL).

Економічна доцільність у контексті вуглецевого податку

З впровадженням системи EU ETS, викиди CO_2 стають прямими фінансовими витратами. SPVS дозволяє не лише економити на фізичному паливі, а й пропорційно зменшувати виплати за вуглецеві квоти. За умови інтеграції сонячних панелей на великих площах палуб (наприклад, автомобільних перевізників), термін окупності системи скорочується до 4–5 років. Показники ефективності WAPS для різних типів суден представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 — Показники ефективності WAPS для різних типів суден

Тип судна	Встановлена потужність, кВт	Економія палива (річна), %	Зниження CO_2 , т/рік
Балкер	150	2,5	180
Танкер	300	5,0	420
Ro-Ro	600	12,0	950

Висновки. Сонячні фотоелектричні системи є одним із найбільш перспективних рішень для декарбонізації суден, особливо тих, що мають значні вільні площі палуб. Вони забезпечують гнучкість у дотриманні норм ЕЕХІ та СІІ, не вимагаючи зміни паливної інфраструктури порти. Майбутнє галузі полягає в гібридизації: поєднанні SPVS з вітровими установками (WAPS) та накопичувачами енергії, що дозволить досягти кліматичних цілей без втрати економічної спроможності судноплавства.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pengcheng Pan, Yuwei Sun, Chengping Yuan, Xinping Yan, Xujing Tang. Research progress on ship power system integrated with new energy sources. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol. 144. 211 p.
2. IMO. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. Resolution MEPC.377(80). 19 p.
3. DNV. Maritime Forecast to 2050: Energy Transition Outlook. Technical Report, 2024. 73 p.

ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК

В

Belyaev M.O., 330
Berezhnyi D., 137
Bezkrovnyi V.O., 324
Bilan S., 137
Butenko V.I., 490

С

Chaban V.O., 324

Д

Diahyleva O., 436
Doroshenko O., 306

Г

Gorbatyuk Ie. V., 248
Gorzelańczyk P., 251

Н

Hryshechkina T.S., 267

Ж

Jurković M., 251

К

Kalashnyk G.A., 330
Kalashnyk-Rybalko M.A., 433
Kobalava H., 364
Kononova O., 436
Korban D.V., 193
Kornienko V., 364
Kravets V.V., 267
Kravets Vl.V., 267
Kyrychenko K.V., 261, 324

Л

Lasenko I., 469, 493
Lazarieva N.M., 277
Leshchenko A., 105
Lipshyts L. V., 453
Liutak I., 370
Lytvynenko V.V., 490

М

Manuilenko O.V., 490
Melnik O., 168
Moroz O., 458
Movchan P., 89

Н

Nosov A., 54
Nosov P., 54

О

Onishchenko I.N., 490

Р

Panchenko M.V., 261
Pavlii K.V., 490
Píštěk V., 168
Polyvoda V.V., 165
Prokhorenko E.M., 490
Prokhorenko T.G., 490
Prokopchuk Yu., 71

Р

Rubel O., 214

С

Samoilov O.O., 165
Samokhvalov V., 364
Sarsenbayev B.S., 436
Sharko O., 89, 306
Sharko M., 89
Sheryl Jo Urdaneta, 105
Shevchenko M.V., 261
Shumylo O., 168
Shvetsova I., 465
Snigirova A., 214
Sokolovskij E., 251
Stepanchikov D., 89

Т

Tovstokoryy K., 27, 32

У

Yarovenko V., 168
Yurzhenko A., 436

З

Zajtsev B.V., 490
Zhmur V., 186
Zinchenko S., 27, 32

А

Абрамов Г.С., 7
Агоев Є. О., 374
Александровська Н.І., 309
Андрєєв А.А., 311, 315
Андрєєва Н.Б., 311, 315
Андрєєв А.А., 319, 405
Астайкін Д.В., 24
Афанасьєва О. В., 264

Б

Бабій М.В., 374
Бабійчук К. О., 298
Багін Є.П., 173
Барсук С.Л., 442
Банга М.М., 479, 493
Бень А.П., 131
Белюченко Д.Ю., 98
Белінська Т.А., 238
Білан С. М., 52, 177
Біщак Р.Т., 469
Блінцов В.С., 133, 240
Бойко М.І., 471
Борчик Є.Ю., 68
Браїло М.В., 469, 495
Браташ К.Ю., 328
Бублик А.С., 353
Букетов А.В., 333, 474
Бурлака О. О., 11
Бушма О.В., 294

В

Вагін Ф.І., 319, 405
Варбанець Р. В., 243
Васильєв М.М., 61
Велегура Є. А., 245
Величко Т. О., 102
Веселовський Б.М., 14
Воїнов О. П., 335
Волков О. М., 180
Вороненко С.В., 131
Воробйов П.О., 494
Врублевський Р. Є., 339

Г

Гавриш П. А., 17
Гасанов Р.Р., 291
Гаценко Л.В., 423
Геворкян Е. С., 382
Гілевич В.В., 20
Гобатюк Т. П., 254
Голіков В. А., 341

Голікова В.В., 341
Голубенко Б.В., 152
Горячкін В. М., 245
Гречка Н. В., 230
Григоров А.Д., 14
Грищук І.В., 85
Гриценко Н.В., 475
Грудініна Г. С., 240
Гурин К.Ю., 319

Д

Даниленко Д.О., 479
Даниленко О.Б., 479
Данилов К.С., 341, 344
Данько Є.С., 133
Демченко В.Л., 480
Дзигар А.К., 395
Димо Б. В., 335
Добровольська В. А., 102, 117, 123
Добуш А. І., 346
Догодькін І.В., 184
Дорофєєв М.В., 24
Дощенко Г.Г., 349
Дреус А.Ю., 481
Душкін С.С., 427

Є

Єлеонська О. С., 420
Єнчев С. В., 139, 143, 254

Ж

Жищинський Ю. С., 147
Жмур В.М., 65

З

Залож В. І., 412
Зеленський А.С., 78
Зінченко О. Є., 284
Знамеровська Н.П., 431

І

Ібрагім А. М., 190
Ісайчев А.Г., 61

К

Кайдан Е. С., 39, 42, 45, 274
Калашник Г.А., 152, 155, 353
Каратанов С.В., 274
Камінський Ю. В., 284
Касім М.М., 257
Касім А.М., 257
Кім К.В., 291
Кирилаха С. В., 358
Клевцов К. М., 190

Козачок А.Ю., 36
Козодой Д.С., 475
Комарова Г.Л., 264, 284, 382
Кононова О.Ю., 439
Коновалова Г. В., 506, 510
Копильців Д. В., 361
Костенко В.В., 238
Котляревський Д.К., 196
Кравченко В.І., 269
Крапивко Г. І., 271
Красота М. В., 503
Криштопа С. І., 346, 361, 367
Криштопа Л. І., 367
Крицький Д. М., 39, 42, 45, 48, 274
Кручина Є. В., 39
Кудрявцева В.Ф., 442
Кузнєцов А.І., 199
Куклін В.М., 7
Купровський В.І., 204
Кухтіна В.П., 107
Кучеренко Ю. М., 243

Л

Лаврич Ю.М., 210
Лалазарова Н.О., 264
Лебедь О.М., 446, 449
Лебідь І.Г., 455
Личко Б. М., 335
Лисицький І.В., 199
Литвиненко О.В., 494
Литвиненко В.В., 500
Литовченко В.І., 110
Лужанська Н.О., 455
Ляхович В.В., 20

М

Мазур Т.А., 401
Максимов І.О., 52
Макогон А.В., 471
Малахов О.В., 384
Мащенко П. П., 485
Матвієнко Р. М., 346
Мінчев Д. С., 243
Мисів О. О., 361
Молотков О.Н., 302
Мостовой А.А., 158
Мотайло А.П., 280

Н

Нагрибельний Я.А., 7
Настасенко В.О., 374
Нерубацький В. П., 284, 379, 382
Нікітченко О. Ю., 45
Нікольський В.В., 384

Ніколаєва Л.Л., 384
Нужний С.М., 286

О

Одайник Б.В., 155
Овчинникова А.К., 48
Остапчук П.М., 496

П

Палагін О.М., 384
Панченко І.М., 184, 196, 218, 221, 409
Парохненко О. С., 388
Пасічниченко Є. О., 139
Пахолка О. В., 391
Пашенко О.Л., 57
Пацурковський П. А., 335
Пелихівський Л.О., 161
Передерій В.І., 68
Петровський А.В., 61, 65, 107, 110, 114
Півторак Г.В., 20
Підчасов А.Ю., 210

Погорлецький Д.С., 85, 395
Поливода В.В., 36, 158, 461
Приміський І.В., 264
Продашук С.М., 291
Продашук М.В., 291
Прохоренко І.В., 401
Проценко В.О., 374
Прудников І.А., 405
Пташкограй М.С., 409
Пушин О.В., 65

Р

Рихтер М.О., 333
Рябенко Д. В., 180

С

Самойлов С.О., 461
Сапронов О.О., 469, 493
Сапронова Л.О., 474, 494, 495
Сем'янчук А. І., 367
Сергєєв Т. С., 117
Серебряков А.К., 294
Сікірда Ю.В., 78
Сінюта К.О., 341
Сироїжка І.О., 78
Скібінський С. О., 503
Славич В. П., 298
Соколов А. В., 131
Соловійов О. О., 82
Сологубов П.П., 158
Сохацький А.В., 481

Сохацький А.В., 481
Соценко В.В., 333, 495
Соценко В. В., 506, 510
Стовба Т.А., 120, 126, 416
Стрілець В.М., 98
Стулій І.О., 190
Суржик Ю.О., 328
Суслов В.В., 20

Т

Тарануха В.Ю., 294
Тарасенко Д.К., 455
Тарасенко Т. В., 412
Тарасов С.В., 302
Татарінцева Ю.Г., 431
Тачинін Є. В., 143
Тимофєєв К.В., 173
Тимошенко Н.А., 401
Ткачук Т.Р., 416
Товстокорій О.М., 224
Топалов О.І., 123, 173
Торопенко В.В., 479
Троценко О.Г., 496

У

Удовицький В.Г., 500
Устенко Д.П., 14

Ф

Фролова О.О., 442

Х

Харін Р. О., 284
Харченко Р. Ю., 82
Хахалєв Д.В., 269
Худяков І.В., 85, 395

Ч

Червонець К.М., 177
Черненко В.В., 85

Ш

Шалапко Д. О., 230, 234
Шаповал А.Е., 114
Шаранов В.Д., 493
Шарко О.В., 147
Шепеленко І. В., 503
Шилов А.А., 416
Шпак В.В., 126
Шостак В. П., 335, 420
Шпілевая Т.М., 93
Шубний О.Є., 328

Щ

Щедролосєв О. В., 506, 510

Ю

Юдченко О.О., 110
Юрик М.-С.А., 455

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	4
FOREWORD	5
СЕКЦІЯ: ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ SECTION: INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEMS IN THE TRANSPORT INDUSTRY	6
ОСОБЛИВОСТІ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ВЕЛИКИМИ МОВНИМИ МОДЕЛЯМИ <i>¹Абрамов Г.С., ²Куклін В.М., ¹Нагрибельний Я.А.</i> ¹Херсонська державна морська академія (Україна) Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця (Україна)	7
ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ ДЛЯ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ РЕКЛАМИ ТРАНСПОРТНИХ ПОСЛУГ <i>Бурлака О. О.</i> Рекламна агенція «Quick Leads» (Україна)	11
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ МОРСЬКОЇ НАВІГАЦІЇ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОЇ АБО ПОРУШЕНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ <i>Веселовський Б.М., Григоров А.Д., Устенко Д.П.</i> Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)	14
ЦИФРОВІ СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ ЯК ОСНОВА АДАПТИВНОЇ РЕКЛАМИ У ТРАНСПОРТНІЙ ГАЛУЗІ <i>Гавриш П. А.</i> Рекламна агенція «LeadIn» (Україна)	17
КЛАСТЕРИЗАЦІЯ МІСЬКИХ МАРШРУТІВ ЗА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ УМОВАМИ <i>Гілевич В.В., Півторак Г.В., Суслов В.В., Ляхович В.В.</i> Національний університет «Львівська політехніка» (Україна)	20
ВИКОРИСТАННЯ ШІ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКУ ЗІТКНЕННЯ В РАЙОНАХ З ІНТЕНСИВНИМ РУХОМ <i>Дорофєєв М.В., Астайкін Д.В.</i> Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)	24
ROUTE OPTIMIZATION OF A VESSEL'S WITH ADDITIONAL WIND PROPULSIONS <i>Zinchenko S., Tovstokoryu K.</i> Kherson State Maritime Academy (Ukraine)	27

METHOD FOR RANKING WIND TURBINES ACCORDING TO GIVEN CRITERIA <i>Zinchenko S., Tovstokoryy K.</i> <i>Kherson State Maritime Academy (Ukraine)</i>	32
ОПТИМІЗАЦІЯ СТРАТЕГІЙ КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ СУДНАМИ В УМОВАХ НЕПЕРЕДБАЧЕНИХ СТОХАСТИЧНИХ ЗБУРЕНЬ <i>Козачок А.Ю., Поливода В.В.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	36
АСПЕКТИ РЕАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ <i>Крицький Д. М., Кайдан Е. С., Кручина Є. В.</i> <i>Харківський авіаційний інститут «Харківський авіаційний інститут» (Україна)</i>	39
МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ АНАЛІЗУ ВІЗУАЛЬНИХ ДАНИХ У СИСТЕМАХ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ <i>Крицький Д. М., Кайдан Е. С.</i> <i>Харківський авіаційний інститут «Харківський авіаційний інститут» (Україна)</i>	42
МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЗАХИСТУ СТАТИСТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЮ БПЛА <i>Крицький Д. М., Нікітченко О. Ю., Кайдан Е. С.</i> <i>Харківський авіаційний інститут «Харківський авіаційний інститут» (Україна)</i>	45
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ БЕЗПІЛОТНОГО ГЛАЙДЕРА ПРИ АВТОНОМНОМУ ПОШУКУ ТЕРМІЧНИХ ПОТОКІВ <i>Крицький Д.М., Овчинникова А.К.</i> <i>Національний Аерокосмічний Університет «Харківський Авіаційний Інститут» (Україна)</i>	48
ДЕТЕКЦІЯ ШТУЧНО ЗГЕНЕРОВАНИХ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ СУПЕРВІЗІЙНОГО ПІДХОДУ ДЛЯ СИСТЕМ ВІЗУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ТРАНСПОРТУ <i>Максимов І. О., Білан С. М.</i> <i>Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Україна)</i>	52
DEVELOPMENT OF AN EXPLAINABLE MCDA-BASED DECISION SUPPORT PROGRAM FOR SELECTING A TACTICAL APPROACH TO THE PORT OF DOVER ¹ Nosov P., ² Nosov A. ¹ Odesa National Maritime University (Ukraine) ² Outlaw Eagle Manufacturing, Designer and Draftsperson (Canada)	54
ВПЛИВ ДАЛЬНОСТІ РОЗТАШУВАННЯ СУДЕН-ЦІЛЕЙ НА ЗДАТНІСТЬ МОДЕЛІ YOLOv8n РОЗРІЗНЯТИ ЇХ РАКУРСИ <i>Пашенко О.Л.</i> <i>Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)</i>	57

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ РЕАЛЬНИХ ТОЧОК ПОВОРОТУ СУДНА У ECDIS <i>Петровський А.В., Ісайчев А.Г., Васильєв М.М.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	61
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОХИБКИ ПРОГНОЗУ ТРАЄКТОРІЇ СУДНА В ECDIS <i>Петровський А.В., Жмур В.М., Пушин О.В.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	65
НЕЧІТКА КОГНІТИВНО-РЕЛЯЦІЙНА МОДЕЛЬ АДАПТАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СУДНОВОДИЄМ ¹ <i>Передерій В.І.,</i> ² <i>Борчик Є.Ю.</i> ¹ <i>Національний університет кораблебудування ім. адм. Макарова (Україна)</i> ² <i>Миколаївський національний аграрний університет (Україна)</i>	68
PRACTICAL APPLICATIONS OF THE «WHOLENESS, MEANING, AND LIVING (SMART) STRUCTURE» RESEARCH PROGRAM <i>Prokorchuk Yu.</i> <i>Institute of Technical Mechanics of NASU (Ukraine)</i>	71
СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ СТОХАСТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ОПЕРАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ АВІАЦІЙНИХ ОПЕРАТОРІВ <i>Сікірда Ю.В., Сироїжка І.О., Зеленський А.С.</i> <i>Українська державна льотна академія (Україна)</i>	78
ЗГОРТКОВА НЕЙРОННА МЕРЕЖА З ШІ АСИСТЕНТОМ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ BNWAS <i>Харченко Р. Ю., Соловійов О. О.</i> <i>Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)</i>	82
ОСОБЛИВОСТІ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК СУДЕН <i>Худяков І.В., Грицук І.В., Погорлецький Д.С., Черненко В.В.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	85
BINARY RELATIONSHIPS IN MARITIME TRANSPORT LOGISTICS ¹ <i>Sharko O.,</i> ² <i>Stepanchykov D.,</i> ³ <i>Sharko M.,</i> ¹ <i>Movchan P.</i> ¹ <i>Kherson State Maritime Academy (Ukraine)</i> ² <i>Kherson National Technical University (Ukraine)</i> ³ <i>Pryazovsky State Technical University (Ukraine)</i>	89
ЦИФРОВІЗАЦІЯ СУДНОВИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОТИ СУДНА <i>Шнілєвая Т.М.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	93
СЕКЦІЯ: ТРЕНАЖЕРНІ СИСТЕМИ Й ЛЮДСЬКИЙ ФАКТОР НА ТРАНСПОРТІ SECTION:	97

SIMULATOR SYSTEMS AND HUMAN FACTOR IN TRANSPORT	
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПЕРАТИВНОГО РОЗГОРТАННЯ ПОЖЕЖНО-РЯТУВАЛЬНОГО АВТОМОБІЛЯ <i>¹Белюченко Д.Ю., ²Стрілець В.М.</i> <i>¹Національний університет цивільного захисту України (Україна)</i> <i>²Національний університет «Київський Авіаційний Інститут» (Україна)</i>	98
КОМУНІКАТИВНІ ОСОБЛИВОСТІ ЯПОНСЬКИХ МОРЯКІВ ЯК ЧИННИК БЕЗПЕКИ НА СУДНІ <i>Величко Т. О., Добровольська В. А.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	102
THE ROLE OF SOCIAL STEREOTYPE IN INTERCULTURAL COMMUNICATION OF DISTANT SAILORS <i>¹Leshchenko A., ²Sheryl Jo Urdaneta</i> <i>¹Kherson State Maritime Academy (Ukraine)</i> <i>²University of Malaya (Malaysia)</i>	105
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ТА КОГНІТИВНОЇ СУМІСНОСТІ ECDIS РІЗНИХ ВИРОБНИКІВ <i>Петровський А.В., Кухтіна В.П.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	107
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ 3D-НАВІГАЦІЇ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ECDIS <i>Петровський А.В., Литовченко В.І., Юдченко О.О.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	110
ОПТИМІЗАЦІЯ НАВІГАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ ПРИ ФОРМУВАННІ ЛІНІЙ LDL ПОПЕРЕДНЬОЇ ПРОКЛАДКИ <i>Петровський А.В., Шаповал А.Е.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	114
МІЖКУЛЬТУРНА КОМПЕТЕНТНІСТЬ ЯК ФАКТОР БЕЗПЕКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ МОРСЬКИХ МІЖНАРОДНИХ ЕКІПАЖІВ <i>Сергєєв Т. С., Добровольська В. А.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	117
ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ПІДГОТОВКИ ЧЛЕНІВ ЕКІПАЖУ НА МОРСЬКОМУ СУДНІ <i>Стовба Т.А.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	120
ВИБІР ЕФЕКТИВНОЇ СТРАТЕГІЇ КОМУНІКАЦІЇ В ІНТЕРНАЦІОНАЛЬНОМУ ЕКІПАЖІ НА БОРТУ СУДНА <i>Топалов О. І., Добровольська В. А.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	123
МОТИВАЦІЯ ЕКІПАЖУ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОРСЬКОГО СУДНА	126

Шнак В.В., Стовба Т.А. Херсонська державна морська академія (Україна)	
СЕКЦІЯ: КОНТРОЛЬ, ДІАГНОСТИКА Й ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ УПРАВЛІННІ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ SECTION: CONTROL, DIAGNOSTICS AND DECISION-MAKING IN MANAGING MOVING OBJECTS	130
КОМПЛЕКСНА ОПТИМІЗАЦІЯ ВАНТАЖНОГО ПЛАНУ КОНТЕЙНЕРОВОЗУ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ СКЛАДОВИХ Бень А.П., Соколов А. В., Вороненко С.В. Херсонська державна морська академія (Україна)	131
КОМПЛЕКСНА АВТОМАТИЗАЦІЯ МОРСЬКОЇ ТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ НА БАЗІ АВТОНОМНОГО НЕНАСЕЛЕНОГО ПІДВОДНОГО АПАРАТА Блінцов В.С., Данько Є.С. Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)	133
DETERMINISTIC OVERLAP DETECTION IN UAV AGRICULTURAL IMAGERY USING RADON-BASED STRUCTURED WINDOW ACCUMULATION Berezhnyi D., Bilan S. Taras Shevchenko National University of Kyiv (Ukraine)	137
ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ГТД З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ МОДЕЛІ FDI Єнчев С. В., Пасічниченко Є. О. Державний університет «Київський авіаційний інститут» (Україна)	139
ВПЛИВ ІНТЕРАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ ДОКУМЕНТАЦІЇ НА ЕКСПЛУАТАЦІЙНУ ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ ¹Єнчев С. В., ²Тачинін Є. В. ¹ Державний університет «Київський авіаційний інститут» (Україна) ² АТ «Антонов» (Україна)	143
МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОГО СУПРОВОДУ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ Жищинський Ю. С., Шарко О.В. Херсонська державна морська академія (Україна)	147
ОЦІНКА ТОЧНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ ДЛЯ АВІАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ Калашник Г.А., Голубенко Б.В. Українська державна льотна академія (Україна)	152
УДОСКОНАЛЕНА СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ	

УПРАВЛІННЯ ПОЛЬОТОМ БПЛА <i>Калашник Г.А., Одайник Б.В.</i> <i>Українська державна льотна академія (Україна)</i>	155
АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ВІДДАЛЕНИХ ОБ'ЄКТІВ <i>¹Мостовой А.А., ²Сологубов П.П., ¹Поливода В.В.</i> <i>¹Херсонська державна морська академія (Україна)</i> <i>²Приватне підприємство «Відеокомпроект»(Україна)</i>	158
МОДЕЛЬ ОЦІНКИ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ НАВІГАЦІЙНОГО СЕРЕДОВИЩА В ЗАДАЧАХ КЕРУВАННЯ БЕЗЕКІПАЖНИМИ АВТОНОМНИМИ СУДНАМИ <i>Пелихівський Л.О.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	161
PATTERN RECOGNITION IN THE TASK OF PREDICTING THE STATE OF A SHIP'S ELECTRICAL POWER SYSTEM <i>Samoilov O.O., Polyvoda V.V.</i> <i>Kherson State Maritime Academy (Ukraine)</i>	165
ANALYTICAL ASSESSMENT OF HULL-LENGTHENING EFFECTS ON SHIP CONTROLLABILITY WITH INTEGRATED ELECTRIC PROPULSION SYSTEMS <i>¹Shumylo O., ²Přítěk V., ¹Yarovenko V., ¹Melnyk O.</i> <i>¹Odesa National Maritime University (Ukraine);</i> <i>²Brno University of Technology (Czech Republic)</i>	168
ВДОСКОНАЛЕННЯ РІД РЕГУЛЯТОРА В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ СУДНОВИМ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРОМ <i>Тимофеев К.В., Топалов О.І., Багін Є.П.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	173
МУЛЬТИМОДАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ НА ТРАНСПОРТІ <i>Білан С.М., Червонець К.М.</i> <i>Київський національний університет імені Тараса Шевченка (Україна)</i>	177
СЕКЦІЯ: БЕЗПЕКА СУДНОПЛАВСТВА SECTION: SAFETY OF NAVIGATION	179
СТРАТЕГІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА В УМОВАХ РАПТОВИХ ЗБРОЙНИХ КОНФЛІКТІВ <i>Волков О. М., Рябенко Д. В.</i> <i>Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)</i>	180
ПРОБЛЕМИ АДАПТАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ МОРСЬКИХ КОНВЕНЦІЙ ДО ВИКЛИКІВ АВТОНОМНОГО СУДНОПЛАВСТВА	184

Догод'якін І.В., Панченко І.М. Херсонська державна морська академія (Україна)	
THE STRATEGIC TASK OF MODERN SHIPPING IS REDUCING FUEL CONSUMPTION Zhmur V. Kherson State Maritime Academy (Ukraine)	186
КІЛЬКІСНА ОЦІНКА ПРАВОВИХ РИЗИКІВ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ Ібрагім А. М., Стулій І.О., Клевцов К. М. Херсонська державна морська академія (Україна)	190
SOLVING THE PROBLEM OF POLARIZATION SELECTION OF ECHO SIGNALS FROM A NAVIGATION OBJECT IN THE PRESENCE OF SEA-SURFACE WAVES Korban D.V. National University «Odessa Maritime Academy» (Ukraine) Harbin Engineering University (China)	193
ПРОЦЕСУАЛЬНІ АСПЕКТИ РОЗСЛІДУВАННЯ СМЕРТІ ТА ВЧИНЕННЯ ТЯЖКИХ ЗЛОЧИНІВ НА МОРСЬКИХ СУДНАХ Котляревський Д.К., Панченко І.М. Херсонська державна морська академія (Україна)	196
ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКІВ ЗАГАЛЬНОЇ ПОЗДОВЖНЬОЇ МІЩНОСТІ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ КОНСТРУКЦІЙ МАЛИХ СУДЕН ІЗ HDPE ¹Кузнєцов А.І., ²Лисицький І.В. ¹Херсонського ННІ Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна) ²Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)	199
ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ РЛС Х-ДІАПАЗОНУ ЗА КРИТЕРІЄМ СПІВВІДНОШЕННЯ СИГНАЛ/ШУМ Купровський В.І. Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)	204
БЕЗПІЛОТНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАБЕСПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ СУДНОПЛАВСТВА Лаврич Ю.М., Підчасов А.Ю. Інститут транспортних систем і технологій НАН (України)	210
MONITORING AND EVALUATION FRAMEWORK FOR PROJECT BUILDING RESPONSE FRAMEWORKS UNDER EXISTING & NEW MARINE POLLUTION CHALLENGES IN THE BLACK SEA Rubel O., Snigirova A. Black Sea Branch of Ukrainian Environmental Academy of Science (Ukraine)	214

ПРАВОВИЙ РЕЖИМ МІЖНАРОДНИХ ПРОТОК В УМОВАХ ЗБРОЙНИХ КОНФЛІКТІВ: НА ПРИКЛАДІ КРИЗИ В ОРМУЗЬКІЙ ПРОТОЦІ <i>Панченко І.М.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	218
ТРАНСФОРМАЦІЯ МІЖНАРОДНО-ПРАВОВОГО СТАТУСУ АЗОВСЬКОГО МОРЯ ТА КЕРЧЕНСЬКОЇ ПРОТОКИ В УМОВАХ ЗБРОЙНОГО КОНФЛІКТУ <i>Панченко І.М.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	221
ОСОБЛИВОСТІ ЗАПОБІГАННЯ ГІРДІНГУ І ПОЛОЖЕННЯ «В ЛЕЩАТАХ» ПРИ БУКСИРУВАННІ ВРАХОВУЮЧИ НОВУ КОНЦЕПЦІЮ ПОВОРОТУ СУДНА <i>Товстокорий О.М.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	224
СЦЕНАРНО-ОРІЄНТОВАНЕ ОЦІНЮВАННЯ ПОЖЕЖНОЇ БЕЗПЕКИ СУДНОВИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК ПРИ ВИКОРИСТАННІ ВОДНЮ ЯК ДОМІШКИ ДО ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА <i>¹Шалапко Д. О., ²Гречка Н. В.</i> <i>¹Херсонський навчально-науковий інститут НУК імені адмірала Макарова (Україна)</i> <i>²Національний університет цивільного захисту України (Україна)</i>	230
ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВИХ МІКРОДОМІШОК У СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНИХ УСТАНОВКАХ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ <i>Шалапко Д. О.</i> <i>Херсонський навчально-науковий інститут НУК імені адмірала Макарова (Україна)</i>	234
СЕКЦІЯ: ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ, СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ SECTION: INFORMATION TECHNOLOGIES, SYSTEM ANALYSIS AND MATHEMATICAL MODELLING OF COMPLEX OBJECTS	237
ЕВОЛЮЦІЙНА АРХІТЕКТУРА ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ <i>Белінська Т.А., Костенко В.В.</i> <i>Дніпровський Університет митної справи та фінансів (Україна)</i>	238
ВИЗНАЧЕННЯ ІНСТРУМЕНТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ МОРСЬКИХ РОБОТИЗОВАНИХ ЗАСОБІВ УМОВАХ ЗОВНІШНЬОГО ЗБУРЕННЯ <i>Блінцов В. С., Грудініна Г. С.</i> <i>Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)</i>	240
АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК МОРСЬКИХ ДВИГУНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ DEPAS 5.0W. WAVELET VIBROACOUSTICS + ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ	243

Варбанець Р. В., Мінчев Д. С., Кучеренко Ю. М. Одеський національний морський університет(Україна)	
PROXIMITY GOSSIP-ПРОТОКОЛ СИНХРОНІЗАЦІЇ РЕЄСТРУ ПОДІЙ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УМОВАХ ПЕРЕРИВЧАСТОГО ЗВ'ЯЗКУ Велегура Є. А., Горячкін В. М. Український державний університет науки і технологій (Україна)	245
DEVELOPMENT OF AN INFORMATION MODEL OF THE MOVEMENT OF THE WORKING PARTS OF SUBSOILERS Gorbatyuk Ie. V. Kyiv National University of Construction and Architecture (Ukraine)	248
APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR SHORT-TERM FORECASTING OF ROAD ACCIDENT RATES ¹Gorzelańczyk P., ²Jurkovič M., ³Sokolovskij E. ¹Stanislaw Staszic State University of Applied Sciences in Pila (Poland) ²University of Zilina (Slovakia) ³Vilnius Gediminas Technical University (Lithuania)	251
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АВІАЦІЙНОГО СИНХРОННОГО БЕЗКОНТАКТНОГО ГЕНЕРАТОРА Єнчев С. В., Гобатюк Т. П. Державний університет «Київський авіаційний інститут» (Україна)	254
ІНТЕГРАЦІЯ ЗНАНЬ У ТРАНСПОРТНИХ ГІС НА ОСНОВІ ОНТОЛОГІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ¹Касім М.М., ²Касім А.М. ¹Національний університет біоресурсів і природокористування України (Україна) ²Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України (Україна)	257
EXCEL AND AI INTEGRATION FOR SHIP STABILITY CALCULATIONS Kyrychenko K.V., Shevchenko M.V., Panchenko M.V. Kherson State Maritime Academy (Ukraine)	261
МЕТРОЛОГІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ ТРАНСПОРТУ ¹Комарова Г.Л., ²Приміський І.В., ³Лалазарова Н.О., ⁴Афанасьєва О. В. ¹Український державний університет залізничного транспорту (Україна) ²НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського (Україна) ³Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Україна) ⁴Харківський національний університет радіоелектроніки (Україна)	264
MATRIX APPROACH TO ANALYSIS AND VERIFICATION OF KOLMOGOROV CHARACTERISTIC EQUATIONS IN COMPLEX STOCHASTIC SYSTEMS Kravets V.V., Hryshechkina T.S., Kravets Vl.V. Ukrainian State University of Science and Technology (Ukraine)	267

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗРАХУНКУ КОСОЗУБИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗУБЧАСТИХ ПЕРЕДАЧ <i>Кравченко В.І., Хахалєв Д.В.</i> Донбаська державна машинобудівна академія (Україна)	269
ОПТИЧНИЙ РЕЗОНАНС НА ПОВЕРХНІ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ <i>Крапивко Г. І.</i> Херсонська державна морська академія (Україна)	271
ЗАСТОСУВАННЯ ВІМ-ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПРОЄКТУВАННЯ ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМ БУДІВЕЛЬ <i>Крицький Д. М., Кайдан Е. С., Каратанов С.В.</i> Харківський авіаційний інститут «Харківський авіаційний інститут» (Україна)	274
OVERVIEW OF MODERN METHODS FOR MODELLING DYNAMIC PROCESSES <i>Lazarieva N.M.</i> Ukrainian State University of Railway Transport (Ukraine)	277
ОПТИМІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ АДАПТИВНИХ БІПІРАМІДАЛЬНИХ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ <i>Мотайло А.П.</i> Херсонська державна морська академія (Україна)	280
СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОЇ НАНОКЕРАМІКИ $ZrO_2(3 \text{ мол.}\% Y_2O_3)$–WC ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ <i>Нерубацький В. П., Комарова Г. Л., Зінченко О. Є., Харін Р. О., Камінський Ю. В.</i> Український державний університет залізничного транспорту (Україна)	284
УДОСКОНАЛЕННЯ ОСНОВ ПОБУДОВИ СИСТЕМ ЗАХИСТУ МОВНОЇ ІНФОРМАЦІЇ НА ОСНОВІ МОВОПОДІБНИХ ЗАВАД <i>Нужний С.М.</i> Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)	286
СИСТЕМНИЙ АНАЛІЗ НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ <i>Продаишук С.М., Кім К.В., Продаишук М.В., Гасанов Р.Р.</i> Український державний університет залізничного транспорту (Україна)	291
ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ АКУСТИЧНОГО ВИЯВЛЕННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ В ОБЕРТОВИХ МЕХАНІЧНИХ ПРИСТРОЯХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ¹ <i>Серєбряков А.К., ¹Тарануха В.Ю., ²Бушма О.В.</i> ¹ Інститут інформаційних технологій та систем Національної академії наук України (Україна) ² Київський столичний університет імені Бориса Грінченка (Україна)	294

ТРАНСПОРТНА ЗАДАЧА З ПРІОРИТЕТАМИ ПОСТАЧАЛЬНИКІВ ВАНТАЖУ <i>Славич В. П., Бабійчук К. О.</i> <i>Херсонський національний технічний університет (Україна)</i>	298
МОДЕЛЮВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ АЛГОРИТМІВ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ КАНАЛІВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЕРТАННЯ РОТОРУ ВІТРОВОЇ ТУРБІНИ <i>Тарасов С.В., Молотков О.Н.</i> <i>Інститут транспортних систем та технологій НАН України (Україна)</i>	302
SOFTWARE AND HARDWARE FOR MANAGEMENT OF MARITIME TRANSPORT LOGISTICS PROCESSES IN CONDITIONS OF UNCERTAINTY OF THE INFLUENCE OF EXTERNAL FORCES <i>Sharko O., Doroshenko O.</i> <i>Kherson State Maritime Academy (Ukraine)</i>	306
СЕКЦІЯ: ПРОБЛЕМИ НАДІЙНОСТІ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ, ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА ТА РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ SECTION: RELIABILITY AND ENERGY SAVING, ENVIRONMENTAL SAFETY AND RESOURCE-SAVING TECHNOLOGIES	308
ЕКОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ СУДНОВОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ ОРГАНІЧНОГО ЦИКЛУ РЕНКІНА В УМОВАХ ОБМЕЖЕННЯ НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ <i>Александровська Н.І.</i> <i>Одеський національний морський університет (Україна)</i>	309
ТЕПЛОВИКОРИСТОВУЮЧІ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ <i>Андрєєв А.А., Андрєєва Н.Б.</i> <i>Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)</i>	311
УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ОХОЛОДЖЕННЯ НАДДУВНОГО ПОВІТРЯ У СУДНОВИХ МАЛООБЕРТОВИХ ДИЗЕЛЯХ <i>Андрєєв А.А., Андрєєва Н.Б.</i> <i>Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)</i>	315
ГІДРОДИНАМІЧНІ ПРИСТРОЇ ГОМОГЕНІЗАЦІЇ СУДНОВОГО ПАЛИВА <i>Андрєєв А.А., Вагін Ф.І., Гурін К.Ю.</i> <i>Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)</i>	319
IMPROVING THE SAFETY OF VESSEL OPERATION WHEN WORKING WITH SOLID BULK CARGOES <i>Bezkravnyi V.O., Kyrychenko K.V., Chaban V.O.</i> <i>Kherson State Maritime Academy (Ukraine)</i>	324

РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ <i>Браташ К.Ю., Шубний О.Є., Суржик Ю.О.</i> <i>Харківський автомобільно-дорожній фаховий коледж Лозівська філія (Україна)</i>	328
MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMAL MANAGEMENT OF ENVIRONMENTAL SAFETY OF AIR TRANSPORT OPERATION IN ACCORDANCE WITH INTERNATIONAL REQUIREMENTS <i>Belyaev M.O., Kalashnyk G.A.</i> <i>Ukrainian State Flight Academy (Ukraine)</i>	330
МОДИФІКОВАНИЙ ЕПОКСИДНИЙ КОМПОЗИТ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНО-РЕМОНТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСУ <i>Букетов А.В., Соценко В.В., Рихтер М.О.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	333
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ЗА РАХУНОК ВДОСКОНАЛЕННЯ ФОРМИ ОСЦИЛЮЮЧИХ СУДНОВИХ РУШІВ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ <i>Воїнов О. П., Шостак В. П., Димо Б. В., Пацурковський П. А., Личко Б. М.</i> <i>Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)</i>	335
МОДЕЛЮВАННЯ НЕЙРО-НЕЧІТКОЇ МЕРЕЖІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ОЧИЩЕННЯ ПАЛИВА В СЕРЕДОВИЩІ МАТЛАВ <i>Врублевський Р. Є.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	339
АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЙСОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ІОНІЗАЦІЇ ПОВІТРЯ МОРСЬКОГО СУДНА НА ОКЕАНСЬКИХ СПОЛУЧЕННЯХ <i>Голіков В. А., Голікова В.В., Данилов К.С., Сінюта К.О.</i> <i>Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)</i>	341
АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ МОРСЬКОГО КОНТЕЙНЕРОВОЗА ШЛЯХОМ ВСТАНОВЛЕННЯ НОСОВОГО ЗАХИСНОГО ЕКРАНУ (НА ПРИКЛАДІ ULCV MSC NELA) <i>Данилов К. С.</i> <i>Національний університет «Одеська морська академія» (Україна)</i>	344
ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ В АГРЕГАТАХ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ <i>Добуш А. І., Матвієнко Р. М., Криштопа С. І.</i> <i>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (Україна)</i>	346
МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ ЯК ЗАСІБ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ НАДІЙНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ <i>Дощенко Г.Г.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	349
УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ БПЛА НА ВСІХ ЕТАПАХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ	353

Калашиник Г.А., Бублик А.С. Українська державна льотна академія (Україна)	
ФОРМУВАННЯ ТЕРМОНАПРУЖЕНОГО СТАНУ ТА МІКРОСТРУКТУРА ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ ПРИ LHW ТА EBW ЗВАРЮВАННІ Кирилах С. В. Національний університет «Запорізька політехніка» (Україна)	358
ЗБІЛЬШЕННЯ РЕСУРСУ ПАР ТЕРТЯ МОБІЛЬНИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ Копильців Д. В., Мисів О. О., Криштопа С. І. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (Україна)	361
INVESTIGATION OF CORROSION OF CONDENSING HEAT-EXCHANGE SURFACES WHEN WATER-FUEL EMULSION COMBUSTION Kornienko V., Kobalava H., Samokhvalov V. Admiral Makarov National University of Shipbuilding Kherson Educational-Scientific Institute (Ukraine)	364
ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ККД НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ Криштопа С. І., Криштопа Л. І., Сем'янчук А. І. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (Україна)	367
WEB-BASED IOT DATA VISUALISATION FOR ENERGY EFFICIENCY MONITORING IN TRANSPORT SYSTEMS Liutak I. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ukraine)	370
АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ І ПЕРСПЕКТИВ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ НА ТРАНСПОРТНОМУ ФЛОТІ ¹ Настасенко В.О., ¹ Бабій М.В., ² Проценко В.О., ³ Агоєв Є. О. ¹ Херсонська державна морська академія (Україна) ² Херсонський національний технічний університет (Україна) ³ Одеський національний морський університет (Україна)	374
АНАЛІЗ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИЛОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТЯГОВИХ ДВИГУНІВ ЛОКОМОТИВІВ Нерубацький В. П. Український державний університет залізничного транспорту (Україна)	379
РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВУЗЛІВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НАНОСТРУКТУРНИХ КОМПОЗИТІВ Нерубацький В. П., Геворкян Е. С., Комарова Г. Л. Український державний університет залізничного транспорту (Україна)	382
ВДОСКОНАДЕННЯ МЕТОДУ ОБРОБКИ НА СУДНІ РІДКИХ СТОКІВ ¹ Малахов О.В., ¹ Нікольський В.В., ¹ Ніколаєва Л.Л., ² Палагін О.М.	384

¹ Одеський національний університет «Одеська морська академія» (Україна) ² Дунайський інститут національного університету «Одеська морська академія» (Україна)	
ФОРМУВАННЯ МЕХАНІЗМУ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ТРАНСПОРТНИХ КОМПАНІЙ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ, ЕКОЛОГІЗАЦІЇ ТА РИНКОВОЇ НЕСТАБІЛЬНОСТІ <i>Парохненко О. С.</i> <i>Національний транспортний університет (Україна)</i>	388
ІННОВАЦІЙНІ МЕХАНІЗМИ УПРАВЛІННЯ СЕРВІСНОЮ ЯКІСТЮ ТРАНСПОРТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ <i>Пахолка О. В.</i> <i>Національний транспортний університет (Україна)</i>	391
ОПТИМІЗАЦІЯ ВИТРАТИ ВИСОКОЛУЖНОГО ЦИЛІНДРОВОГО МАСЛА СУДНОВОГО МАЛООБЕРТОВОГО ДВИГУНА <i>Погорлецький Д.С., Дзигар А.К., Худяков І.В.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	395
АВАРІЙНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ <i>Прохоренко І.В., Мазур Т.А., Тимошенко Н.А.</i> <i>Національний університет «Київський авіаційний інститут» (Україна)</i>	401
ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАДИСПЕРСНИХ ПОРОШКІВ МІДІ ТА БРОНЗИ ЯК ДОБАВОК ДО МОТОРНОГО МАСЛА СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ <i>Прудников І.А., Андреев А.А., Вагін Ф.І.</i> <i>Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)</i>	405
ПРАВОВІ АСПЕКТИ КОНТРОЛЮ ЗА ДОТРИМАННЯМ ВИМОГ КОНВЕНЦІЇ WWM: РИЗИКИ ТА ВИКЛИКИ ДЛЯ СУДНОВЛАСНИКІВ <i>Пташкограй М.С., Панченко І.М.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	409
ПАРАМЕТРИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ СУДНОВИХ ДИЗЕЛІВ У ЗАДАЧАХ ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДЕН <i>Тарасенко Т. В., Залож В. І.</i> <i>Дунайський інститут Національного університету «Одеська морська академія» (Україна)</i>	412
ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ СУДНОПЛАВСТВА: СТРАТЕГІЧНІ ПРІОРИТЕТИ ТА ЕКОНОМІЧНІ ВИКЛИКИ <i>Ткачук Т.Р., Шилов А.А., Стовба Т.А.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	416
АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ТА ЗМЕНШЕННЯ ОКСИДІВ АЗОТУ У ВІДХІДНИХ ГАЗАХ МАЛООБЕРТОВИХ ДВИГУНІВ <i>Шостак В. П., Єлеонська О. С.</i> <i>Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)</i>	420

СЕКЦІЯ: КОМПЕТЕНТНІСНИЙ ПІДХІД В ПІДГОТОВЦІ ФАХІВЦІВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ SECTION: COMPETENCE-BASED APPROACH IN TRAINING TRANSPORT INDUSTRY PROFESSIONALS	422
КОМУНІКАТИВНО-МОВНА КОМПЕТЕНТНІСТЬ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ: СУЧАСНІ ОСВІТНІ ОРІЄНТИРИ <i>Гаценко Л. В.</i> <i>Національний транспортний університет (Україна)</i>	423
СИСТЕМНА МОДЕЛЬ ЦИФРОВОЇ СТІЙКОСТІ ОСВІТНЬОГО СЕРЕДОВИЩА В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТА ІНФРАСТРУКТУРНИХ РИЗИКІВ <i>Душкін С.С.</i> <i>Харківський національний автомобільно-дорожній університет (Україна)</i>	427
ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕГРАЦІЙНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ІНЖЕНЕРНОЇ ГРАФІКИ У ФОРМУВАННІ КЛЮЧОВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ СУДНОВИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІКІВ <i>Знамеровська Н.П., Татарінцева Ю.Г.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	431
ORGANIZATIONAL AND MANAGEMENT COMPETENCE OF AVIATION SPECIALISTS AS A PROFESSIONALLY IMPORTANT QUALITY <i>Kalashnyk-Rybalko M.A.</i> <i>Ukrainian State Flight Academy (Ukraine)</i>	433
THE USE OF COMPETENCY-BASED APPROACH WHILE TEACHING MARITIME ENGLISH TO FUTURE SHIP ENGINEERS <i>¹Kononova O., ²Diahyleva O., ²Yurzhenko A., ³Sarsenbayev B.S.</i> <i>¹Maritime Applied College of Kherson State Maritime Academy (Ukraine)</i> <i>²Kherson State Maritime Academy (Ukraine)</i> <i>³Sh. Yessenov Caspian University of Technology and Engineering NP JSC (the Republic of Kazakhstan)</i>	436
РОЗВИТОК ПРОФЕСІЙНИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ МАЙБУТНІХ ФАХІВЦІВ ТРАНСПОРТНОЇ ГАЛУЗІ ЗАСОБАМИ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ І ФОРМУВАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ <i>Кононова О.Ю.</i> <i>ВСП «Морський фаховий коледж Херсонської державної морської академії» (Україна)</i>	439
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОФЕСІЙНОЇ ПОВЕДІНКИ МАЙБУТНІХ МОРЯКІВ ЗАСОБАМИ КУРСУ «МОРСЬКА АНГЛІЙСЬКА МОВА» <i>Кудрявцева В.Ф., Барсук С.Л., Фролова О.О.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	442
ВРОВАДЖЕННЯ ВІРТУАЛЬНИХ СИМУЛЯЦІЙ В ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ ТЕХНІЧНИХ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ	446

Лебедь О.М. Херсонська державна морська академія (Україна)	
СПОСОБИ ВПРОВАДЖЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ З ФІЗИКИ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ ЗАКЛАДІВ ВИЩОЇ ОСВІТИ ПРИ ДИСТАНЦІЙНІЙ ФОРМІ НАВЧАННЯ Лебедь О.М. Херсонська державна морська академія (Україна)	449
APPLYING OUTCOME-BASED EDUCATION TO MARITIME ENGLISH TRAINING Lipshyts L. V. Kherson State Maritime Academy (Ukraine)	453
ОРГАНІЗАЦІЯ ДІЯЛЬНОСТІ МИТНИХ ОРГАНІВ ЯК ЕЛЕМЕНТА СИСТЕМИ НАЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ Лужанська Н.О., Лебідь І.Г., Тарасенко Д.К., Юрик М.-С.А. Національний транспортний університет (Україна)	455
DECISION-MAKING SKILLS DEVELOPMENT WHILE TEACHING MARITIME ENGLISH Moroz O. Kherson State Maritime Academy (Ukraine)	458
ВІДКРИТА НАУКА ТА ПРИНЦИПИ FAIR: МЕТОДОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ Самойлов С.О., Поливода В.В. Херсонська державна морська академія (Україна)	461
DEVELOPING MEDIATION COMPETENCE IN MARITIME ENGLISH THROUGH DIGITAL LEARNING ENVIRONMENTS Shvetsova I. Kherson State Maritime Academy (Ukraine)	465
СЕКЦІЯ: ПРОБЛЕМИ ВПРОВАДЖЕННЯ «ЗЕЛЕНОГО» ТРАНСПОРТУ: ДЖЕРЕЛА ТА НАКОПИЧУВАЧІ ЕНЕРГІЇ, НОВІТНІ МАТЕРІАЛИ, БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ SECTION: IMPLEMENTING «GREEN TRANSPORT»: ENERGY SOURCES AND STORAGE DEVICES, LATEST MATERIALS, OPERATIONAL SAFETY	468
АНАЛІЗ ОБМЕЖЕНЬ ПРИ РЕМОНТІ КОРОЗІЙНИХ ДЕФЕКТІВ НАПЛАВЛЕННЯМ НА ДІЮЧИХ ГАЗОНАФТОПРОВОДАХ ¹Біщак Р.Т., ²Сапронов О.О., ³Lasenko I., ²Брайло М.В. ¹ Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (Україна) ² Херсонська державна морська академія (Україна) ³ Riga Technical University (Latvia)	469
АНАЛІЗ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НАНОСЕКУНДНИХ РОЗРЯДІВ У ПОВІТРЯНИХ БУЛЬКАХ У ВОДІ ПРИ ЇЇ ЗНЕЗАРАЖЕННІ	471

¹Бойко М.І., ²Макогон А.В. ¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» (Україна) ²Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України (Україна)	
ТЕРМОСТІЙКІ ПОЛІМЕРНІ КОМПОЗИТИ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ Букетов А.В., Сапронова Л.О. Херсонська державна морська академія (Україна)	474
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ І БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ «ЗЕЛЕНОГО» ТРАНСПОРТУ: ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ Гриценко Н.В., Козодой Д.С. Український державний університет залізничного транспорту (Україна)	475
АНТИКОРОЗІЙНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПОВЕРХОНЬ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ ¹Даниленко Д.О., ²Даниленко О.Б., ¹Торопенко В.В., ¹Банга М.М. ¹Херсонська державна морська академія (Україна) ²Дунайський інститут національного університету «Одеська морська академія» (Україна)	479
СТРУКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ ТА БАКТЕРИЦИДНА АКТИВНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ МЕМБРАН НА ОСНОВІ ПОЛІСАХАРИДІВ І НАНОЧАСТИНОК СРІБЛА Демченко В.Л. Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України (Україна)	480
ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЕКРАНОПЛАНІВ В ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ Дреус А.Ю. Сохацький А.В. Дніпровський Національний Університет імені Олеся Гончара (Україна)	481
ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНА РУШІЙНА СИСТЕМА (WAPS) — ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ ЗАХІД ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ СУДНОПЛАВСТВА. ОГЛЯДОВИЙ АНАЛІЗ АЕРОДИНАМІЧНИХ ЯКОСТЕЙ РІЗНИХ ТИПІВ ВІТРИЛ Маменко П. П. Херсонська державна морська академія (Україна)	485
MODELING OF SURFACE STRUCTURE DAMAGES IN TUNGSTEN DURING ITS USE IN THERMONUCLEAR REACTORS ¹Prokhorenko E.M., ¹Lytvynenko V.V., ^{2,4}Manuilenko O.V., ²Onishchenko I.N., ²Pavlii K.V., ²Zajtsev B.V., ²Butenko V.I., ³Prokhorenko T.G. ¹Institute of Electrophysics and Radiation Technologies NAS of Ukraine (Ukraine) ²NSC «Kharkov Institute of Physics and Technology» (Ukraine) ³Kharkiv National Automobile and Highway University (Ukraine) ⁴V.N. Karazin Kharkiv National University(Ukraine)	490
ДОСЛІДЖЕННЯ КОРОЗІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ У СЕРЕДОВИЩІ МОРСЬКОЇ ВОДИ ¹Сапронов О.О., ² Lasenko I., ³Шаранов В.Д., ¹Банга М.М.	493

¹ Херсонська державна морська академія (Україна) ² Riga Technical University (Latvia) ³ Дунайський інститут національного університету «Одеська морська академія» (Україна)	
БАР'ЄРНІ ВЛАСТИВОСТІ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ У КИСЛОТНИХ СЕРЕДОВИЩАХ ПРИ ЗАХИСТІ ІНЖЕНЕРНИХ СПОРУД <i>Сапронова А.В., Воробйов П.О., Литвиненко О.В.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	494
ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ ЕПОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ НАПОВНЕНИХ ДИСКРЕТНИМ НАПОВНЮВАЧЕМ <i>Соценко В.В., Сапронова А.В., Браїло М.В.</i> <i>Херсонська державна морська академія (Україна)</i>	495
ПРУЖНИЙ ПІДХІД ПРИ МОДЕЛЮВАННІ РАДІАЦІЙНОГО РОСТУ ЦИРКОНІЮ, ВІДПОВІДАЛЬНОГО ЗА СТАБІЛЬНІСТЬ ФОРМИ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕАКТОРІВ НА ТЕПЛОВИХ НЕЙТРОНАХ, КЛАСТЕРНА ДИНАМІКА <i>Троценко О.Г., Остапчук П.М.</i> <i>Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України (Україна)</i>	496
ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ МЕТАЛ-ОРГАНІЧНИХ КАРКАСІВ ЯК СОРБЕНТІВ В ЗАСОБАХ ЗАХИСТУ ОРГАНІВ ДИХАННЯ ВІД ТОКСИЧНИХ ГАЗІВ І ПАРІВ <i>Удовиський В.Г., Литвиненко В.В.</i> <i>Інститут електрофізики і радіаційних технологій НАН України (Україна)</i>	500
ПОРІВНЯННЯ РІЗНИХ ВИДІВ ЕКОЛОГІЧНОГО ТРАНСПОРТУ <i>Шепеленко І. В., Красота М. В., Скібінський С. О.</i> <i>Центральноукраїнський національний технічний університет (Україна)</i>	503
КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ВІТРОВОГО РУХУ (WARS) ЯК СТРАТЕГІЧНОГО ІНСТРУМЕНТУ ДОТРИМАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ НОРМ ІМО <i>Щедролосєв О. В., Соценко В. В., Коновалова Г. В.</i> <i>Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)</i>	506
ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕГРАЦІЇ ФОТОЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ У СУДНОВИЙ ЕНЕРГЕТИЧНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ ФЛОТУ <i>Щедролосєв О. В., Соценко В. В., Коновалова Г. В.</i> <i>Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова (Україна)</i>	510
ІМЕННИЙ ПОКАЖЧИК	512
ЗМІСТ	516

Збірник матеріалів
XVIII Міжнародної науково-практичної конференції

**СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ
ТА ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
НА ТРАНСПОРТІ**

MINTT – 2026

Відповідальний за випуск *Врублевський Р. Є.*
Технічний редактор, комп'ютерна верстка *Радул Т.О.*

Підписано до друку 22.05.2026. Формат 60x84/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Гарнітура Times New Roman.
Умов. друк. аркушів 33,4. Тираж 160 прим.

Херсонська державна морська академія
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 4319 від 10.05.2012
73000, м. Херсон, пр. Ушакова, 20